

М. И. ЯРОСЛАВСКИЙ
А. Г. СМАГИН

**конструирование,
изготовление
и применение
кварцевых
резонаторов**



М. И. ЯРОСЛАВСКИЙ, А. Г. СМАГИН

КОНСТРУИРОВАНИЕ,
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ
КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971

6Ф2.13

Я76

УДК 621.315.4

Ярославский М. И. и Смагин А. Г.

Я76 Конструирование, изготовление и применение кварцевых резонаторов. М. «Энергия», 1971.

168 с. с илл.

В книге рассматриваются основы процессов изготовления, приводятся сведения о конструкциях резонаторов, методах измерения их параметров и характеристик, а также данные о применении резонаторов для стабилизации частоты электрических колебаний кварцевых генераторов и для систем подстройки частоты квантовых генераторов.

Книга рассчитана на научных работников, инженеров и техников, связанных в своей деятельности с изготовлением и применением кварцевых приборов.

3-4-3

270-71

6Ф2.13

*Михаил Иосифович Ярославский,
Александр Герасимович Смагин*

**Конструирование, изготовление
и применение кварцевых резонаторов**

Редактор *Л. Е. Черняк*

Технический редактор *Т. Г. Усачева* Корректор *Н. В. Лобанова*

Сдано в набор 19/ХII 1969 г. Подписано в печать 9/III 1971 г. Т-03075
Формат 84×108^{1/32} Усл. печ. л. 8,82 Бумага типографская № 2
Уч.-изд. л. 9,81 Тираж 7 000 экз. Цена 49 коп. Зак. 1187

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга является продолжением предыдущей работы авторов «Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы». Здесь рассматриваются вопросы, не получившие освещения в упомянутом труде. В частности, приводятся важнейшие сведения о кристаллическом кварце — сырье для изготовления пьезоэлементов, о главнейших операциях технологического процесса производства резонаторов — шлифовании, полировании, очистке, металлизации и монтаже, об их конструкциях, а также данные о применении резонаторов для стабилизации частоты квантовых генераторов.

В книге не нашли отражения некоторые интересные проблемы, возникшие в результате исследований самого последнего времени. Имеются в виду новые области применения кварцевых резонаторов в качестве датчиков температуры, давления, ускорения, влажности и т. п., для которых они только начинают разрабатываться.

Ярославским М. И. написаны гл. 1 и 3, Смагиным А. Г. — гл. 2 и 5, Шуваловым В. В. и Смагиным А. Г. — гл. 4.

Авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам и коллегам, оказавшим помощь в подготовке этой книги.

Глава первая

Монокристаллы кварца как сырье для изготовления пьезоэлементов

1-1. Морфология кристаллов кварца

Каждый, кому приходилось видеть кристаллы (в особенности природные) кварца или любого другого вещества, неизбежно обращал внимание на то, что отдельные кристаллы одного и того же вида часто очень отличаются друг от друга: на некоторых кристаллах могут быть сильно развиты грани, совершенно отсутствующие у других, отдельные образцы могут казаться даже резко асимметричными и т. д. Оказывается, однако, что расположение граней подчиняется определенным закономерностям.

Все кристаллы определенной модификации одного и того же вещества могут быть приведены в такое положение, в котором соответственные группы их граней окажутся параллельными друг другу. Этот факт, подмеченный еще в XVII в. датским ученым Нильсом Стенсенем, послужил основанием для открытия важнейшего эмпирического закона геометрической кристаллографии — закона постоянства углов. Этот закон логически приводит к важному следствию: если углы между соответственными гранями постоянны для разных кристаллов, значит они тем более должны быть равны для одного и того же кристалла на любых стадиях его роста. Отсюда можно сделать вывод, что во время роста грани кристалла перемещаются параллельно самим себе, т. е. его рост происходит параллельными слоями.

Действительно, наблюдения за ростом отдельных кристаллов подтверждают такую точку зрения: если в процессе роста происходят небольшие изменения

в термодинамических условиях, составе маточного раствора или в осаждении механических примесей, то они проявляются в периодических изменениях цвета кристалла, в появлении внутри него газовойжидких или твердых включений и в других подобных явлениях, причем внутри кристалла образуются параллельные слои, обычно хорошо заметные при его внешнем осмотре. Такие слои иногда создают как бы призрак кристалла в другом кристалле (их, кстати, и называют «фантомами» или «призраками»).

Таким образом, можно рассматривать кристалл как совокупность наложенных параллельных оболочек, толщина каждой из которых в предельном случае может быть равна толщине одной молекулы. Такое представление можно рассматривать лишь как самое грубое приближение, поскольку теория роста кристаллов не допускает строго параллельного осаждения молекулярных слоев. Экспериментально доказано, что этот рост может происходить только по спирали, исходя из винтовых дислокаций.

Учитывая это, все же можно с известными допущениями рассматривать грани кристалла как отрезки плоскостей, ограниченные прямыми линиями их пересече-

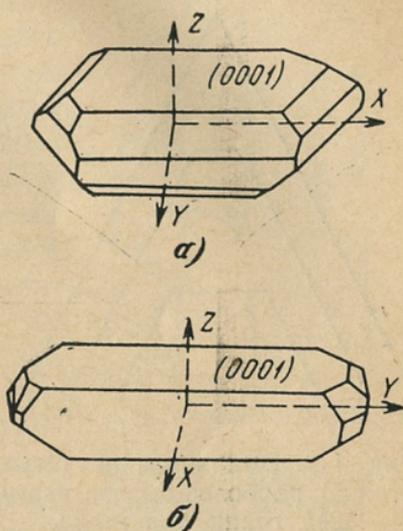


Рис. 1-1. Типы кристаллов синтетического кварца.

а — пластинчатый; б — стержневой.

Таблица 1-1

Углы между различными гранями кристалла α -кварца

Угол	Величина угла
Между гранью ромбоэдра R или r и гранью призмы m	$38^{\circ}12'32''$
Между гранями большого и малого ромбоэдров	$46^{\circ}15'58''$
Между двумя гранями большого или двумя гранями малого ромбоэдра	$85^{\circ}45'24''$
Между двумя гранями призмы	60°
Между гранью пинакоида и гранью призмы	90°

ния друг с другом. Тогда кристалл низкотемпературного α -кварца представляется как объемная фигура, образованная пересечением ряда простых форм: гексагональной призмы m , двух ромбоэдров R и r , тригональной дипирамиды s и тригонального трапецоэдра x . Оба ромбоэдра R и r по форме тождественны, но по физическим свойствам их граней различны, поэтому с точки зрения кристаллографии они не равны друг другу и должны рассматриваться как различные фигуры. Углы между разными гранями кристалла должны иметь в среднем определенные постоянные значения. Эти значения приведены в табл. 1-1.

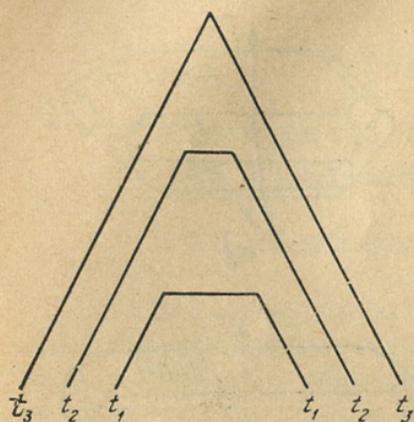


Рис. 1-2. Выклинивание (заращение) наиболее быстро растущей грани кристалла.

t_1 , t_2 и t_3 — положения соседних граней в последующие друг за другом моменты времени.

Характерной особенностью промышленных кристаллов искусственного кварца является наличие у них граней пинакоида $\{0001\}$, отсутствующих у природных кристаллов (рис. 1-1). У последних они не развиваются потому, что рост кварца в перпендикулярном к ним направлении происходит с наибольшей скоростью, вследствие чего такая грань быстро выклинивается (рис. 1-2). Однако именно по этой причине в направлении оси 3-го порядка и выгодно разращивать кристаллы кварца. Естественно, что вести рост до полного зарастания пинакоида нерационально, поэтому затравки стараются выполнять минимальной толщины, но с наибольшими возможными поперечными размерами.

Как известно [Л. 1-12], грани кристаллов кварца, как и грани любых кристаллов, не являются обычно ни плоскими, ни гладкими. В частности, грани призмы m у естественных кристаллов обычно бывают покрыты «горизонтальными» штрихами, т. е. штрихами, идущими параллельно ребру между гранью призмы и гранью одного из ромбоэдров R или r . Эти штрихи являются в сущности ступеньками, образованными узкими полосками граней ромбоэдров, перемежающимися полосками граней призмы (рис. 1-3). Штриховка на гранях призмы часто

позволяет обнаружить зоны кристалла, пораженные теми или иными структурными дефектами. Например, прерывистая штриховка, пересекаемая как бы швами, обычно свидетельствует о выходе на поверхность кристалла двойниковых границ или границ зон с искаженной кристаллической структурой (так называемых «блоков» или «свилей»). В первом случае швы видны чаще всего потому, что одной из компонент двойника соответствует более густая штриховка, чем другой, во втором — из-за несколько отличной ориентации штрихов у отдельных блоков.

На гранях призмы природного кварца довольно часто встречаются также фигуры естественного травления, имеющие характерную форму «лодочек» с одной слегка выпуклой стороной, вытянутых в горизонтальном направлении. Если расположить кристалл так, чтобы выпуклая сторона лодочки находилась снизу, то острый конец («нос») лодочки у правого кристалла кварца будет направлен вправо, а у левого — влево. Этот способ иногда позволяет распознать, к какой из энантиоморфных модификаций принадлежит данный кристалл.

Грани ромбоэдров кварца часто бывают покрыты довольно характерными фигурами, которые необходимо отличать друг от друга для последующей ориентировки кристалла. Следует, впрочем, заметить, что скульптура граней ромбоэдра естественных кристаллов кварца разных месторождений может в значительной степени различаться, а к потребителю кварцевого сырья эти кристаллы зачастую приходят уже обезличенными. Тем не менее в большинстве случаев грани большого ромбоэдра R характеризуются более грубым рельефом, чем грани ромбоэдра r . Наиболее уверенно этот рельеф можно сравнивать у дофинейского двойника, если граница между компонентами проходит по плоскости одного из ромбоэдров. В других случаях обычно оказывается справедливым следующее правило: на грани ромбо-

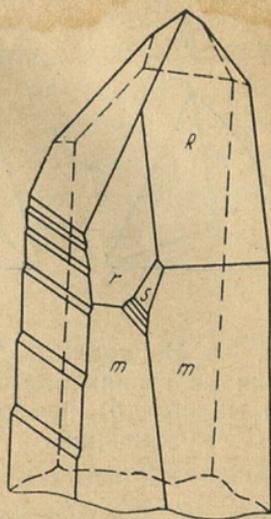


Рис. 1-3. Кристалл кварца с резко выраженной штриховкой грани призмы (по Фронделю).

эдра R вицинальные образования представляют собой трехгранные пирамиды, в основании которых лежит близкий к равностороннему треугольник, иногда с несколько искривленной одной из боковых сторон (рис. 1-4); в основании подобной же пирамиды, образующейся на грани малого ромбоэдра r , лежит треугольник, близкий к равнобедренному, несколько вытянутый в вертикальном направлении (в направлении к вершине кристалла). Однако на практике это правило следует применять с большой осторожностью.

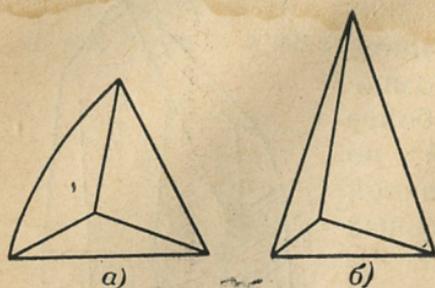


Рис. 1-4. Вицинальные образования на гранях большого (а) и малого (б) ромбоэдров кварца.

Наиболее заметным рельефом — так называемой «структурой булыжной мостовой» — характеризуются грани пинакоида O (иногда их называют гранями базиса) у искусственно выращенных кристаллов кварца (рис. 1-5). Этот рельеф позволяет с первого взгляда определить указанную пару граней. Как правило, синтетические кристаллы хорошо огранены, и у них без труда можно обнаружить грани большого и малого ромбоэдров, чередующихся между собой и обрамляющих базисную грань.

Этот рельеф позволяет с первого взгляда определить указанную пару граней. Как правило, синтетические кристаллы хорошо огранены, и у них без труда можно обнаружить грани большого и малого ромбоэдров, чередующихся между собой и обрамляющих базисную грань.

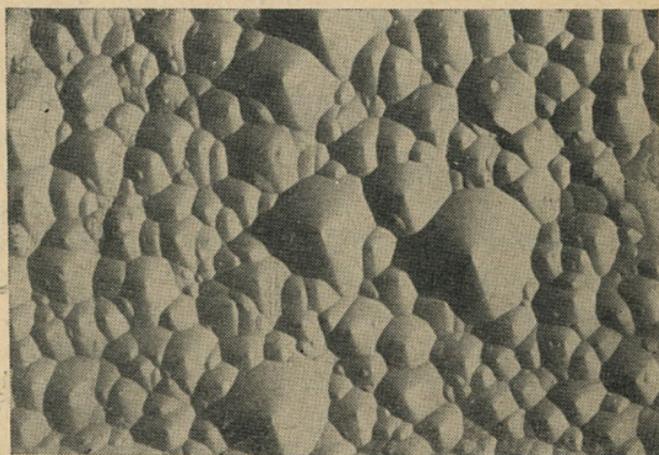


Рис. 1-5. Рельеф типа «булыжной мостовой» на грани пинакоида искусственного кристалла кварца (фото Л. И. Цинобера).

В последнее время появились кристаллы кварца, которым в процессе роста искусственно придается форма стержней, сильно вытянутых в направлении оси Y (рис. 1-1,б). Такие стержни чрезвычайно удобны для изготовления низкочастотных пластин или брусков X -срезов ($xy/s/\alpha^\circ$, $-5^\circ \leq \alpha^\circ \leq +7^\circ \div 9^\circ$), широко используемых в технике. Вообще по своим техническим характеристикам искусственные кристаллы, изготавливаемые отечественной промышленностью, в настоящее время почти не уступают природному кварцу. Более того, процессом производства синтетического кварца можно управлять и получать кристаллы требуемой ориентации, размеров и формы, а также при необходимости в известных пределах можно варьировать их химический состав и окраску.

Типы и размеры изготавливаемых в СССР кристаллов искусственного кварца указаны в табл. 1-2.

Таблица 1-2

Искусственный кварц для изделий электронной техники

Сорт	Минимальные размеры кристаллов, мм		
	по оси X	по оси Y	по оси Z
Крупноразмерный радиотехнический			
КР-1	45	130	37
КР-2	70	45	52
Среднеразмерный радиотехнический			
СР-1	45	80	37
СР-2	60	60	30

1-2. Разновидности кристаллов кварца

В зависимости от условий образования кристаллов (химического состава маточного раствора, термодинамических условий роста и т. п.) они могут приобретать различную окраску. Чаще всего в природных условиях кварц вырастает совершенно бесцветным и прозрачным. Эта разновидность кварца носит название горный хрусталь. Кристаллы горного хрусталя встречаются как в виде хорошо ограненных многогранников (обычно в коренных месторождениях), так и в виде окатанной со всех сторон гальки (в россыпях). Вес таких кристаллов иногда достигает тонны, однако они, будучи столь большими, обычно содержат очень много самых разнообразных дефектов и редко бывают пригодны для промышленных целей.

На территории СССР имеется ряд месторождений окрашенного кварца, причем густота окраски может изменяться от слабой жел-

товатой (цитрин) до густой, почти черной с буроватым оттенком (морион). Кристаллы промежуточной окраски носят название дымчатого кварца или раухтопаза. Окраска кристаллов всех перечисленных разновидностей исчезает после медленного нагревания примерно до 350°С. После этого даже морионы становятся бесцветными и прозрачными, как горный хрусталь. Все эти модификации натурального кварца вполне пригодны для изготовления пьезоэлектрических резонаторов.

В природе встречаются и такие разновидности кристаллов кварца, которые не находят применения в электронной технике, а используются исключительно для ювелирных поделок и тому подобных целей: это прежде всего аметист (кварц фиолетовой окраски) и розовый кварц. Оба они обязаны своей окраской примесям посторонних элементов.

Кроме монокристаллов кварца, в природе встречаются и поликристаллические, агрегатные образования — кварцит, агат и яшма.

Искусственный кварц для электронной техники (радиотехнический кварц) изготавливается бесцветным и прозрачным.

1-3. Дефекты кристаллов кварца

Почти каждый природный и многие искусственные кристаллы кварца содержат более или менее значительные нарушения однородности. В природных кристаллах это могут быть двойники, трещины, газовой-жидкие и твердые включения, свили и т. п. Более того, даже в лучших из них монокристалльные участки сравнительно невелики, а такие экземпляры, у которых области, лишенные видимых глазом дефектов, составляют более 25% от общего объема кристалла, встречаются крайне редко. У искусственных кристаллов двойники наблюдаются только в тех случаях, когда они содержатся в затравочной пластине. Зато трещины, газовой-жидкие и твердые включения (так называемая «присыпка») в синтетическом кварце обнаруживаются весьма часто. Впрочем, бездефектная область в промышленных кристаллах по действующим в СССР условиям поставки должна быть не менее 65% от их общего объема. По этой причине использование искусственного кварца в пьезотехнике оказывается чрезвычайно выгодным, тем более, что цена на него значительно ниже цены на природное кристаллическое сырье.

По морфологическим признакам бразильские двойники отличаются от дофинеиных тем, что границы между компонентами у первых всегда прямолинейны, причем, как правило, сравнительно тонкие слои правого

кварца перемежаются такими же слоями левого. В дофинеиных двойниках границы обычно криволинейные, а монокристалльные участки захватывают довольно крупные области. Поэтому компоненты дофинеиного двойника часто удается разделить и использовать в производстве отдельно друг от друга.

Обнаружить двойники в кристалле можно по внешним признакам (двойниковым швам, фигурам роста и естественного травления), но наиболее уверенно это удается делать после протравливания кристалла в пла-



Рис. 1-6. Схема полярископа.

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — поляризатор; 4 — ванна с иммерсионной жидкостью; 5 — анализатор; 6 — окуляр.

виковой кислоте (подробнее см. ниже). Бразильский двойник легко обнаруживается при просмотре кристалла в поляризованном свете. С этой целью кристалл помещают в прозрачную ванну, наполненную керосином, которую устанавливают между двумя скрещенными поляроидами. В качестве источника света можно использовать лампу накаливания мощностью 150—200 *вт*.

Схема установки приведена на рис. 1-6. Кристалл поворачивают внутри ванны до тех пор, пока его оптическая ось не совпадет с направлением светового луча; при этом, если смотреть в выходное окошко прибора, кристалл окрашивается яркими интерференционными полосами — так называемыми «полосами равной толщины». Окраска обуславливается неодинаковым вращением плоскости поляризации для различных спектральных составляющих белого цвета и различием толщины необработанного кристалла в направлении оси Z^* .

* Если кристалл не имеет естественной огранки, то по появлению яркой окраски в поляризованном свете можно судить о направлении оптической оси, а следовательно, осуществлять его предварительную ориентировку.

Если в кристалле имеются бразильские двойники, то они приводят к появлению мелких пестрых полосок, различным образом наклоненных к полосам равной толщины. Явление этого обусловлено тем, что поверхности раздела компонент двойника обычно располагаются под самыми разнообразными углами к оптической оси; поэтому перемежающиеся слои правого и левого кварца

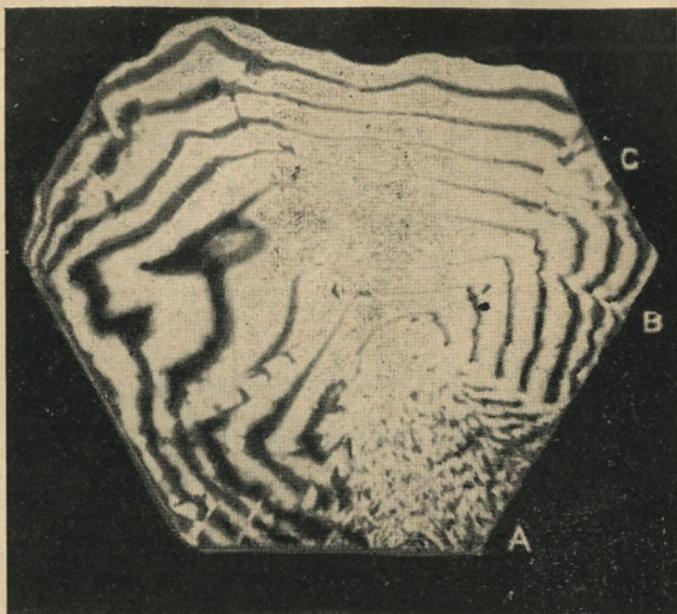


Рис. 1-7. Головка кристалла кварца, наблюдаемая в направлении оптической оси в поляризованном свете.

Видны полосы равной толщины и полоски, обусловленные бразильскими двойниками (обозначены буквами А, В, С) [Л. 1-1].

в бразильском двойнике имеют неодинаковые толщины в направлении этой оси, а значит, компенсация вращения плоскости поляризации происходит неодинаковым образом в различных частях кристалла. Пример картины, наблюдаемой в этом случае, приведен на рис. 1-7 [Л. 1-1].

Дофинейские двойники нельзя выявить с помощью оптических методов, поскольку обе компоненты такого двойника в этом отношении эквивалентны друг другу.

Другие виды дефектов, встречающихся в кристаллах кварца, обычно являются более или менее грубыми механическими нарушениями их структуры. В частности,

как уже указывалось, это могут быть включения маточного раствора, образовавшиеся в процессе роста; такие включения (полости) иногда имеют форму, отвечающую внешним формам кварца («отрицательные кристаллы»). Размеры полостей могут быть микроскопически малы, но могут оказаться и довольно значительными. Во многих случаях они образуют целые скопления (вуаль) и располагаются слоями параллельно какой-либо из граней кристалла. Часто скопления газовой-жидких включений (пузырьков) сопровождаются трещинами, которые также могут быть как крупными, грубыми, так и микроскопическими. Следует сразу же указать, что наличие сколько-нибудь заметных трещин в теле кварцевого элемента пьезоэлектрического резонатора недопустимо. Поскольку газовой-жидкие включения во многих случаях дают начало трещинам, развивающимся в кристалле в процессе его термической обработки, в настоящее время стараются избегать попадания подобных включений внутрь кварцевого пьезоэлемента.

Впрочем, сами по себе газовой-жидкие включения, если они не сопровождаются трещинами, практически не влияют на какие-либо параметры резонатора [Л. 1-2, 1-3].

Твердые включения различных минералов (рутила, пирита, хлорита и т. д.) довольно часто наблюдаются в природных кристаллах кварца. В искусственных кристаллах нередко мелкодисперсные включения так называемой «твердой фазы» (соли некоторых щелочных металлов, входящих в состав маточного раствора и выпадающих при небольших изменениях термодинамических условий роста кварца). Очевидно, что влияние включений этого рода на электрические параметры пьезоэлементов определяется их размерами и массой. В частности, многократные исследования влияния на указанные параметры так называемых «голубых игл», представляющих собой, по-видимому, тончайшие волокна минерала рутила и встречающихся в некоторых природных кристаллах, не выявили сколько-нибудь заметных нежелательных эффектов [Л. 1-3, 1-4]. То же самое относится и к тончайшим включениям твердой фазы в искусственных кристаллах («присыпка»). Однако более крупные включения посторонних минералов в кварц существенно ухудшают некоторые характеристики резонаторов, в частности приводят к заметному снижению их добротности.

Еще одной, часто встречающейся разновидностью дефектов кварца являются свили. Свилеватый кварц характеризуется наличием областей («блоков») внутри кристалла, имеющих небольшие различия в расположении рядов атомов в кристаллической решетке. При рассмотрении такого кристалла в поляризованном свете наблюдается некоторая разница в углах между плоскостями поляризатора и анализатора, при которых происходит погасание отдельных блоков. Признаком, по которому могут быть обнаружены свили при внешнем осмотре кристалла, является так называемая «мозаичная скульптура» на гранях призмы и своеобразная рябь на сколах. Характерным признаком свилеватости кварца является также и то, что при продолжительном травлении в плавиковой (фтористоводородной) кислоте он теряет прозрачность и становится мутным. Это связано с проникновением кислоты внутрь кристалла по местам «разрыхления» кристаллической решетки (границам блоков). Кварц со свиллями не пригоден для изготовления пьезоэлектрических резонаторов [Л. 1-5].

1-4. Обогащение и оценка кристаллов кварца

Перед отправкой кристаллов потребителю их подвергают так называемому обогащению. Процесс обогащения заключается в механическом удалении частей кристаллов, в сильной степени пораженных грубыми дефектами (в первую очередь трещинами, скоплениями включений и т. п.). Предварительно кристаллы просматриваются в проходящем свете и при интенсивном боковом освещении мощной лампой¹.

При таком освещении хорошо просматриваются даже мельчайшие, трудно обнаруживаемые дефекты — голубые иглы, тонкие вуали и т. п. Для того чтобы уменьшить мешающее наблюдателю рассеяние и отражение света на поверхностях кристалла, его иногда смачивают иммерсионной жидкостью².

¹ Если кристалл покрыт так называемой «рубашкой» (коркой различных окислов, чаще всего железа, осевших на него в завершающих стадиях роста), то ее удаляют травлением в азотной или других, соответствующим образом подобранных, кислотах.

² Иммерсионная жидкость имеет одинаковый с кристаллом показатель преломления. Технологические иммерсионные жидкости не должны быть ядовитыми, не должны быстро испаряться, иметь невысокую стоимость. Их показатель преломления выбирается близким к 1,544. Употребляются такие вещества, как монобром-нафталин-а, тетралин (тетрагидронафталин) и смеси керосина или скипидара с канифольным маслом.

Участки кристалла, пораженные грубыми дефектами, скалывают специальными обогатительными молотками. Образующиеся при этом сколы служат для дальнейшей оценки качества кристалла, ибо на них при известном навыке можно обнаружить характерные признаки ряда структурных дефектов, незаметных при просмотре в проходящем или боковом свете: двойниковые швы, рябь, типичную для свилеватого кварца, и т. п. Бездефектным, монокристалльным участкам отвечают гладкие сколы или в зависимости от их ориентации так называемые «раковистые» сколы или сколы со структурой «крышки часов» (т. е. сколы, поверхность которых напоминает поверхность раковины или узор, наносимый иногда на внутреннюю поверхность задней крышки часов); сколы двойников образуют неровные ребристые или ступенчатые поверхности. Газово-жидкие включения оставляют после себя цепочки мелких лунок (как бы перфорацию), тянущиеся в разных направлениях.

Оставшаяся после обогащения часть кристалла оценивается по относительному размеру содержащейся в ней бездефектной области (монообласти). Эта область согласно действующим в СССР техническим условиям на природный кварц должна быть достаточна для изготовления хотя бы одной кварцевой заготовки любого среза размерами $12 \times 12 \times 1,5$ мм. В зависимости от веса кристалла, процента выхода и веса монообласти природные кристаллы разделяются на пять сортов:

1) сорт экстра — кристаллы, их обломки или галька, которые обеспечивают выход монообласти от 30% и выше к общему объему кристалла при массе монообласти не менее 1 000 г;

2) первый сорт — кристаллы, их обломки или галька массой в сырье от 300 г и выше, которые обеспечивают выход монообласти не менее 15%;

3) второй сорт — вес сырого материала не менее 100 г, выход монообласти не менее 10%;

4) третий сорт — вес сырого материала не менее 100 г, выход монообласти не менее 5%;

5) четвертый сорт — кристаллы и их обломки, имеющие хотя бы одну естественную грань, массой от 30 до 100 г; обломки и гальки без естественных граней массой от 60 до 100 г (при выходе монообласти не менее 10%).

Для оценки искусственных кристаллов кварца не прибегают к их механическому обогащению; как правило, они поставляются потребителю целиком. Наиболее часто встречающимся производственным дефектом таких кристаллов являются мелкие газово-жидкие включения, проколы и трещины, скапливающиеся обычно вблизи затравочной пластины. В этой части кристалла (ее толщина не должна превышать 3 мм) указанные дефекты вполне допустимы,

поскольку затравка обычно удаляется при разделке сырья¹. Однако для того, чтобы удостовериться в отсутствии в остальной массе кристалла таких включений, которые могли бы дать начало трещинам, а также в отсутствии заметных механических напряжений внутри кристаллов, каждый из них подвергают отжигу при температуре 530° С, после чего осуществляется их осмотр в проходящем и боковом свете. К поставке для использования в электронной технике допускаются только такие кристаллы, в которых не наблюдается трещин и замутнений внутри полезного объема (из него исключается как сама затравочная пластина, так и некоторая область разрыхленной структуры вблизи нее).

В качестве дополнительной меры, позволяющей гарантировать качество искусственного кварца, производится проверка добротности резонаторов, изготовленных из одного-двух кристаллов, отбираемых из каждой партии по признаку наибольшей скорости роста.

1-5. Травление кристаллов кварца в плавиковой кислоте

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре кристаллический кварц растворяется только во фтористоводородной (плавиковой) кислоте H_2F_2 или в растворе кислых солей этой кислоты, как, например, дифтористого аммония $NH_4F \cdot HF$ или дифтористого калия $KF \cdot HF$ *. Последние значительно лучше растворяют кварц, будучи несколько подогретыми (до 40—60° С). Если травление в растворах бифторидов необходимо производить при

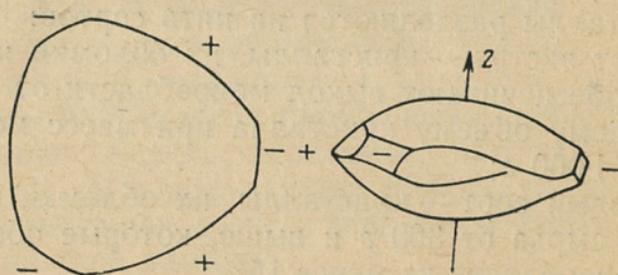


Рис. 1-8. Шар, изготовленный из правого кристалла кварца, после травления плавиковой кислотой в течение месяца.

Знаками плюс и минус обозначены места выходов тех концов электрических осей, на которых появляются заряды соответствующего знака при растяжении.

комнатной температуре, в них обычно добавляют некоторое количество (до 25% по весу) 40%-ной плавиковой кислоты. Такие смеси менее ядовиты, чем плавиковая кислота, и более удобны в производственных условиях.

¹ Следует заметить, что в настоящее время в СССР производятся и такие кристаллы, у которых затравка полностью удалена еще на предприятии-изготовителе (так называемые «кристаллические блоки»). Они поставляются по желанию потребителей.

* Часто применяются коммерческие названия этих солей — бифториды аммония или калия соответственно.

Довольно хорошо растворяется кварц также в горячих концентрированных растворах едких щелочей (NaOH и KOH). Именно эти травители используются обычно как основа для приготовления маточного раствора при промышленном синтезе кристаллов.

Растворение кварца по различным кристаллографическим направлениям вследствие его анизотропии идет с различной скоростью. Быстрее всего кварц растворяется в направлении оптической оси (в этом направлении быстрее всего идет и рост кристалла). Значительно медленнее идет растворение в плоскости, перпендикулярной этой оси. Здесь тоже замечается некоторая неравномерность процесса, ибо несколько скорее травление происходит со стороны положи-

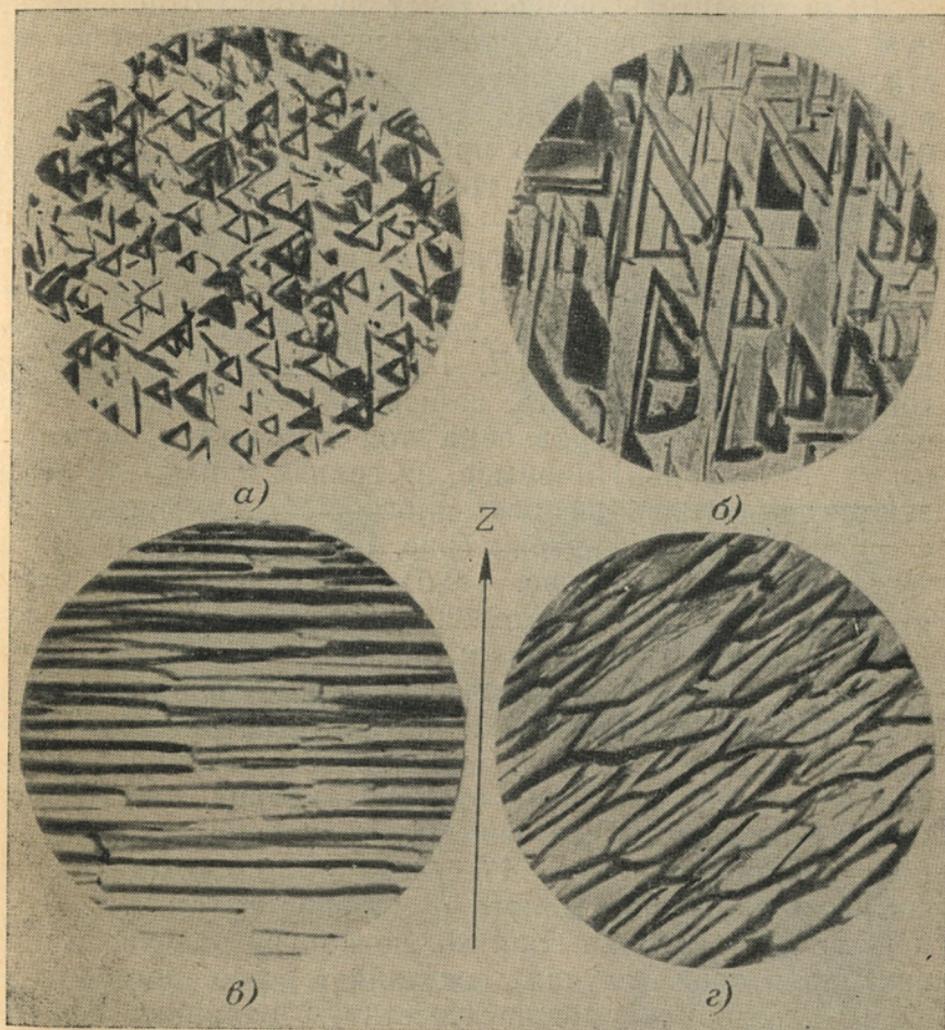


Рис. 1-9. Микрофотографии фигур травления плавиковой кислотой граней кварца.

a — грань базиса (пинаконда) левого кварца; внутренние белые треугольники повернуты относительно внешних на малый угол против часовой стрелки; *б* — грань призмы правого кварца; *в* — грань большого ромбоэдра *R*; *г* — грань малого ромбоэдра *r* [Л. 1-3].

тельных концов электрических осей (здесь положительное направление понимается в физическом смысле — это тот конец оси, которому соответствует положительный пьезоэлектрический заряд при положительной деформации, т. е. при растяжении). Нагляднее всего соотношение скоростей растворения иллюстрируется формой, которую приобретает полированный кварцевый шар после длительного (в течение месяца) травления 40%-ной плавиковой кислотой (рис. 1-8). Интересно, что участки поверхности шара, соответствующие выходам трех отрицательных концов двойных осей (осей X) и приобретающие в процессе растворения форму параллелограммов, практически почти или совсем не подвергаются травлению: через 30 дней на них даже сохраняются следы полировки [Л. 1-12]:

Если травитель воздействует на тонко отшлифованную поверхность кварца, то на ней по прошествии достаточного времени образуются так называемые фигуры травления¹. Они играют очень важную роль в технологии кварцевого производства, так как позволяют идентифицировать грани или — что еще важнее в сомнительных случаях — срезы кварца. Характерные для основных природных граней кварца фигуры травления показаны на рис. 1-9. На рис. 1-10 показаны микрофотографии фигур травления некоторых важнейших срезов кварца [Л. 1-1]. Сравнивая эти фотографии, можно отметить, во-первых, что каждой грани отвечают фигуры травления той симметрии, которую имеет сама грань. Например, на гранях пинакоида образуются треугольники без плоскостей симметрии, но с тройной осью симметрии (рис. 1-9,а); на гранях гексагональной призмы (рис. 1-9,б) — асимметричные четырехугольники, длинная сторона которых протянута вдоль оптической оси кристалла; на искусственных гранях, перпендикулярных электрическим осям — фигуры с осью симметрии второго порядка и т. п. Фигуры травления левого кварца являются зеркальными отображениями соответствующих фигур правого кварца. Во-вторых, можно заметить, что фигуры травления на главных поверхностях пластин AT -среза почти тождественны фигурам на гранях малого ромбоэдра r (см. рис. 1-9,г и 1-10,д), что вполне понятно, поскольку отличие в ориентации в обоих случаях составляет всего примерно 3° .

То же самое можно заметить, сравнивая фигуры травления ромбоэдра R и пластины среза $yxl/-35^\circ$ на рис. 1-9,в и 1-10,ж. Далее, приводимые снимки позволяют

¹ Чтобы получить их, необходимо травить кристалл или изготовленный из него препарат не менее 1 ч в свежей 40%-ной фтористоводородной кислоте.

сравнить действие таких травителей, как плавиковая кислота и раствор кислой фтористой соли (рис. 1-10, *в* и *г*, а также рис. 1-10, *д* и *е* соответственно). Заметно, что бифторид вызывает появление более мелких и менее рельефных фигур травления, чем плавиковая кислота, и по этой причине ему следует отдать предпочтение при обработке тонких пластин.

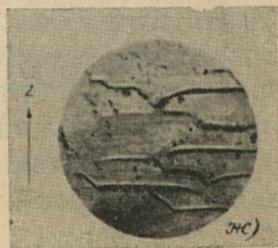
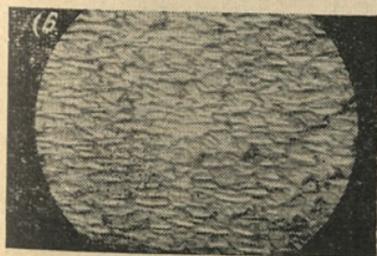
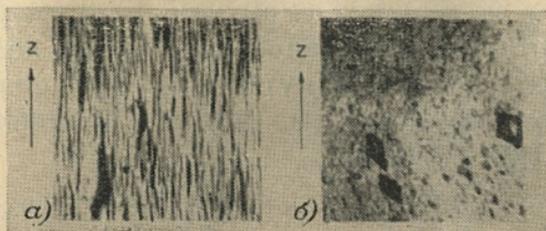


Рис. 1-10. Микрофотографии фигур травления главных поверхностей кварцевых пластин.

а — X-срез со стороны положительного конца электрической оси; *б* — X-срез со стороны отрицательного конца электрической оси; *в* — VT-срез ($yx1/-49^\circ$), травление в 40%-ной плавиковой кислоте; *г* — VT-срез ($yx1/-49^\circ$), травление в бифториде калия $KF \cdot HF$ при температуре $+40^\circ C$; *д* — AT-срез ($yx1/+35^\circ$), травление в 40%-ной плавиковой кислоте; *е* — AT-срез ($yx1/+35^\circ$), травление в бифториде калия $KF \cdot HF$ при температуре $+40^\circ C$; *жс* — срез $yx1/-35^\circ$, травление в плавиковой кислоте; такая фигура может быть приписана пластине AT-среза, если она ошибочно вырезана с поворотом в сторону большого ромбоэдра.

С помощью фигур травления можно при необходимости определить положительное (в физическом смысле) направление электрической оси (ср. рис. 1-10,а и б) или убедиться в наличии грубой ошибки в выполнении кристаллографической ориентации кварцевой заготовки (ср. рис. 1-10,д и ж). Такие ошибки нередки в производственной практике, поскольку рентгеновские замеры угла среза, если они производятся от атомных плоскостей ромбоэдров, не позволяют отличить, например, ориентацию $yx1/+\beta^\circ$ от $yx1/-\beta^\circ$. Подобные случаи недопустимы, поскольку свойства упомянутых срезов резко различаются; данные, необходимые для их сравнения, приведены в табл. 1-3.

Таблица 1-3

Константы, характеризующие правильно и неправильно выполненные срезы кварца

Срез	Частотный коэффициент, кГц·мм	ТКЧ первого порядка, °С ⁻¹
$yx1/+\beta^\circ$ (AT)	1 670*	0
$yx1/-\beta^\circ$	2 400*	$+30 \cdot 10^{-6}$
$yx1/-49^\circ$ (BT)	2 560*	0
$yx1/+\beta^\circ$	1 880*	$-55 \cdot 10^{-6}$
$yx1/+\beta^\circ$ (CT)	3 080*	0
$yx1/-\beta^\circ$	2 100**	$-30 \cdot 10^{-6}$
$yx1/-52^\circ$ (DT)	2 070**	0
$yx1/+\beta^\circ$	2 850**	$+45 \cdot 10^{-6}$

* На 1 мм толщины.

** На 1 мм стороны квадрата.

Направление кристаллографических осей и расположение граней кристалла можно определить и по очертаниям фигур травления. Так, острый угол четырехугольника на грани гексагональной призмы (рис. 1-9,б) всегда направлен к большому ромбоэдру, а длинное прямое ребро этого четырехугольника всегда располагается со стороны того ребра кристалла, сквозь которое проходит положительный конец оси X (т. е. тот конец, на котором образуется положительный заряд при растяжении кристалла). С другой стороны, если присмотреться к фигурам травления на грани большого ромбоэдра (рис. 1-9,в), то можно заметить, что они несколько заострены с одного конца. Это заострение также указывает на то ребро призмы, из которого выходит положительный конец оси X [Л. 1-5].

Фигуры травления на плоской поверхности монокристалла одинаковы по своей форме и ориентировке. Поэтому если направить на кварц параллельный пучок световых лучей, то оптические эффекты, производимые сотнями таких однородных фигур, будут суммироваться. В частности, если лучи будут падать на кристалл сверху, то все одинаково ориентированные грани фигур травления будут образовывать как бы единое зеркало, отражающее свет в соответствующем направлении (рис. 1-11,а). Таких «зеркал» будет столько, сколько

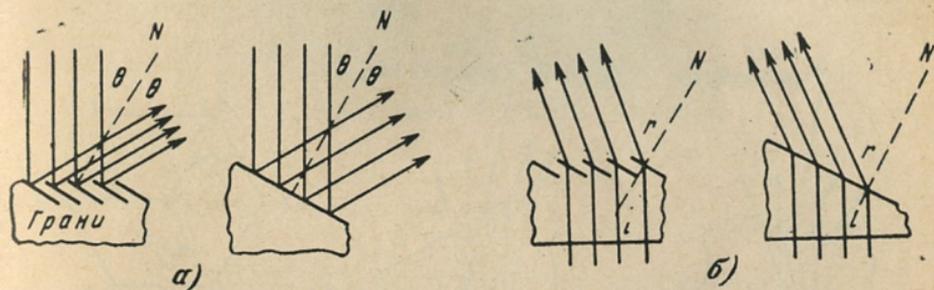


Рис. 1-11. Схемы, поясняющие эффект суммирования отраженных (а) или преломленных (б) лучей света одинаково наклоненными гранями фигур травления.

разных граней имеют фигуры травления определенного вида. В результате образуется несколько отраженных лучей, создающих с точки зрения наблюдателей своеобразные закономерные световые фигуры, называемые фигурами астеризма¹. Подобный же эффект имеет место, если параллельный пучок света проходит сквозь кристалл и преломляется одинаково наклоненными гранями фигур травления (рис. 1-11,б). Применение фигур астеризма, получаемых подобным способом, для кристаллографической ориентации кварца было впервые предложено академиком А. В. Шубниковым [Л. 1-12].

В настоящее время в технологии кварца используются фигуры астеризма, образуемые не параллельным, а коническим пучком света, распространяющимся от точечного источника (рис. 1-12). В качестве точечного источника используется яркая лампа, помещенная в светонепроницаемый кожух с отверстием малого диаметра.

¹ Астеризмом (от греч. «астер» — звезда) называют явление образования закономерных лучистых (звездчатых) фигур при прохождении света от точечного источника через травленные поверхности некоторых кристаллов.

Пучок света, падающий из отверстия на кусок кварца с параллельными сторонами, расходится внутри него в различных направлениях и преломляется гранями фигур травления при выходе из верхней поверхности кристалла. Благодаря этому наблюдатель видит изображение отверстия как бы внутри кварца и несколько смещенным относительно его действительного положения, а также размноженным по числу видов параллельных граней фигур травления. Размеры видимого изображения тем больше, чем толще исследуемый кусок кристалла. Рез-

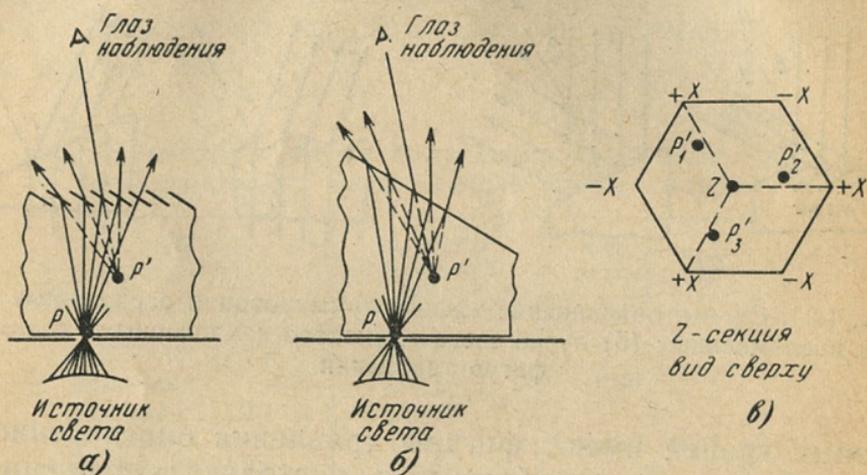


Рис. 1-12. Свет от точечного источника P , проходя через грани фигур травления, преломляется на каждой из них так, как это происходит на грани призмы (а, б); расходившиеся лучи образуют для наблюдателя мнимое изображение источника, располагающееся в точке P' ; каждая группа граней фигур травления образует свое изображение; в частности, три грани отрицательной пирамиды на поверхности базиса в принципе должны дать три изображения P'_1 , P'_2 и P'_3 (в).

кость фигур астеризма определяется в основном качеством обработки поверхности, глубиной травления и активностью травителя (более мягкие травители, естественно, обуславливают менее четкое изображение, а применение более тонких абразивов, наоборот, способствует повышению его резкости).

Фигуры астеризма для главнейших граней кварца показаны на рис. 1-13. С их помощью нетрудно произвести ориентацию кристалла. Практически удобнее всего делать это с помощью фигур астеризма на искусственной грани YZ . Дело в том, что при этом отпадает необходимость в определении того, к какой модификации — правой или левой — принадлежит данный кри-

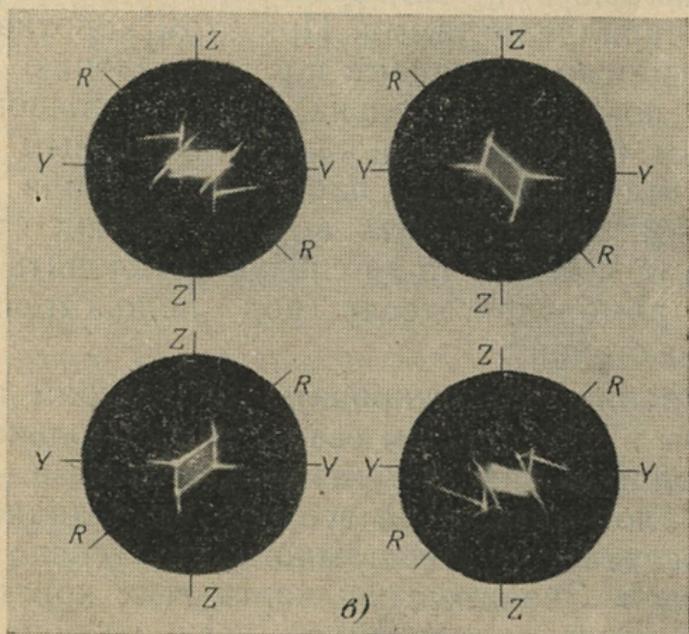
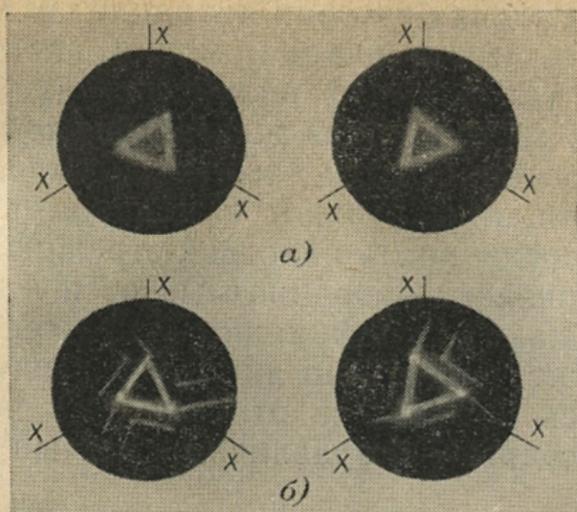


Рис. 1-13. Фигуры астеризма при наблюдении в проходящем свете от точечного источника.

a — на грани базиса (пинакоида) кварца, справа — для правого, слева — для левого кристалла; *б* — то же, но при более тонкой обработке поверхности; *в* — на искусственной грани *YZ* кварца; слева сверху — правый кварц, положительное (в физическом смысле) направление оси *X* на наблюдателя, справа сверху — левый кварц, положительное направление оси *X* от наблюдателя, слева снизу — правый кварц, $+X$ от наблюдателя, справа снизу — левый кварц, $+X$ на наблюдателя [Л. 1-1].

сталл. Универсальная система координатных осей, общая для правого и левого кварца, может быть построена, если принять условно, что положительное направление оси Y у обеих модификаций выходит из той грани призмы, которая располагается *под гранью малого ромбоэдра* r (если при этом поворот к положительному концу оси Z производится против часовой стрелки). Значит, для правильной привязки координатных осей к кристаллу не надо знать, к какой модификации — правой или левой — он принадлежит, достаточно лишь установить, как в нем направлена ось Z и как по отношению к ней располагаются ромбоэдры — безразлично малый или большой.

Рассматривая рис. 1-13,в, можно заметить, что фигура астеризма на искусственной грани YZ в случае, когда физическая ось X направлена от наблюдателя, имеет довольно отчетливо выраженную форму косоугольного параллелограмма. При этом короткая сторона параллелограмма совпадает по направлению с осью Z , а длинная почти параллельна грани большого ромбоэдра. Таким образом, становится несложным разметить кристалл: если например, плоскость распила для среза группы $yx1/\beta^\circ$ должна быть выполнена под отрицательным углом β° к оси Z , то ее следует наклонять в сторону большого ромбоэдра, если под положительным — то в обратную сторону.

К сожалению, ориентировать по фигурам астеризма, получаемым в проходящем свете, можно только прозрачные кристаллы. Правда, с развитием синтеза кварца таких кристаллов становится все больше. Однако к потребителю поступает все еще много интенсивно окрашенных морионов. Значительная часть этих кристаллов добывается в виде окатанной со всех сторон гальки и вообще не имеет каких-либо граней. В этих случаях ориентировка кварца по фигурам астеризма может производиться только путем отражения пучка света от травленных поверхностей минерала. Соответствующая методика разработана и подробно описана в работах [Л. 1-5, 1-8]. В общих чертах эта методика сводится к следующему. Непрозрачный кристалл кварца или кусок кварца без внешней огранки подвергают обработке в пескоструйном аппарате и затем в течение 1—2 ч травят в 40% -ной фтористоводородной кислоте. Затем на кристалл направляют луч от «точечного» источника света и рассматри-

вают его отражение от травленной поверхности. При определенных положениях куска на этой поверхности видна характерная фигура астеризма, схематически изображенная на рис. 1-14.

Такая фигура получается в результате сложения множества отражений от мелких граней, образующихся в результате травления и приуроченных к поверхностям, близким по направлениям к большому ромбоэдру R , призме m и трапецоэдру X . Как правило, фигуру астеризма не удается наблюдать всю сразу при некоторой статической установке кристалла: чтобы увидеть все ее детали, кристалл приходится слегка наклонять в плоскости YZ в ту и другую сторону.

Яркость и резкость отдельных частей фигуры неодинаковы: верхняя часть луча от характерной яркой точки a постепенно увеличивается по направлению к точке выхода оси Z ; от самой верхушки луча и от точки a отходят асимметричные пучки, направленные влево у правого кварца и вправо у левого.

Последнее обстоятельство позволяет распознать при необходимости энантиоморфную модификацию кристалла. Нередко, впрочем в этом нет особой надобности, поскольку выше уже упоминалось о том, что для привязки к кристаллу кварца универсальной системы координатных осей достаточно идентифицировать хотя бы одну из граней большого или малого ромбоэдра и выяснить направление оптической оси. Рассматриваемая фигура астеризма вполне обеспечивает решение обеих задач, поскольку направление ее основного луча указывает на точку выхода оси Z , а его верхняя часть всегда располагается на грани большого ромбоэдра.

Травление кварца плавиковой кислотой позволяет решить важную задачу — обнаружить присутствие в нем как электрических (дофинеиских), так и оптических (бразильских) двойников. Для этого шлифованный и протравленный кристалл кварца (или выре-

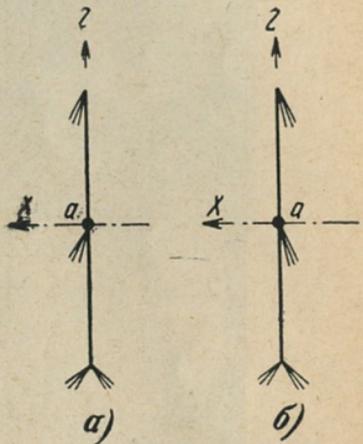


Рис. 1-14. Фигура астеризма, наблюдаемая при отражении света точечного источника от граней m , R , x .

a — правый кристалл; b — левый кристалл.

занную из него пластину) освещают косо падающим пучком света и слегка поворачивают до тех пор, пока не станет четко заметна граница между более сильно и более слабо отражающими участками поверхности. Этот

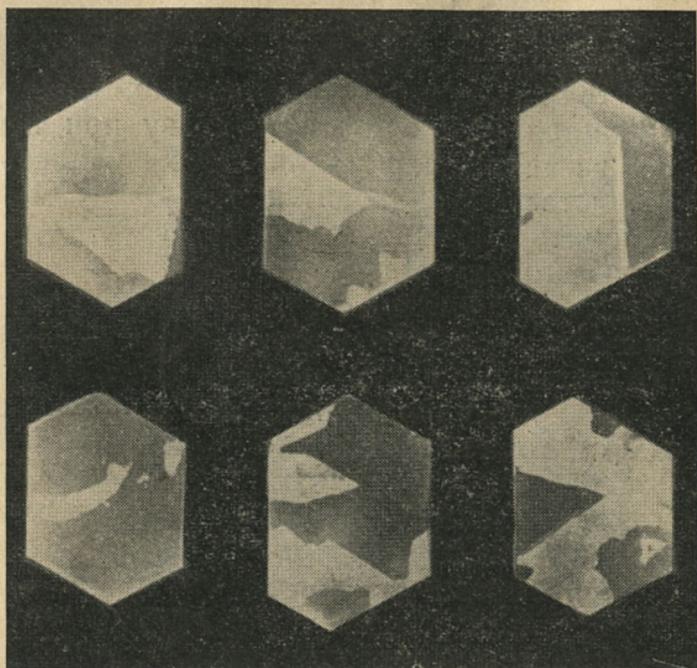


Рис. 1-15. Образцы дофинейских двойников, обнаруживаемых путем травления на плоскости базиса.

Компоненты двойника достаточно крупные, их можно отделить друг от друга и использовать индивидуально [Л. 1-1].

эффект обусловлен различной ориентировкой фигур травления у различных компонент двойника. Дофинейские двойники при таком наблюдении обычно характеризуются неправильными, криволинейными границами (рис. 1-15), в редких случаях часть двойникового шва может быть зазубрена отрезками прямых, параллельных граням кристалла. У бразильского двойника шов почти всегда состоит из прямых отрезков, параллельных граням кристалла. Чаще всего наблюдаются полисинтетические двойники, состоящие из перемежающихся параллельных слоев правого и левого кварца (рис. 1-16). Иногда возможны случаи одновременного существова-

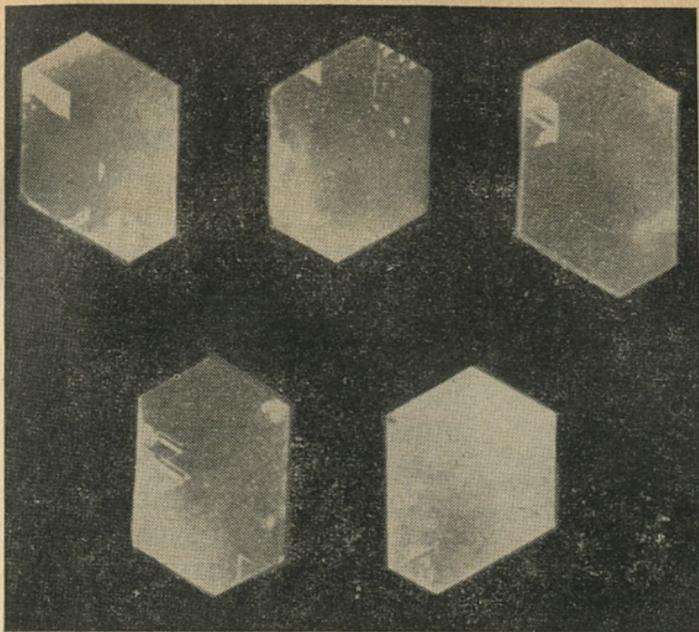


Рис. 1-16. Образцы бразильских двойников на травленой поверхности кристалла кварца.

Мелкие бразильские двойники часто бывают разбросаны по всему объему кристалла [Л. 1-1].

ния бразильских и дофинеиных двойников в одном и том же кристалле. Заметим еще, что прямолинейность или непрямолинейность двойникового шва вовсе не служит достаточным признаком для того, чтобы определить, является ли данный двойник дофинеиным или бразильским.

1-6. Спайность кварца и фигуры удара

Способность кристалла при ударе раскалываться по плоскостям, параллельным его граням, называется спайностью. В зависимости от правильности образующихся при этом поверхностей различают градации спайности: совершенную, несовершенную и заметную. Хорошим примером совершенной спайности служат кристаллы слюды. Кристаллы кварца обладают лишь заметной спайностью по плоскостям, параллельным граням обоих ромбоэдров R и r .

Фигуры, образующиеся на поверхности кварца при ударе, могут наряду с другими способами служить для распознавания граней и для определения ориентации

кристаллографических осей. Этот способ, впервые предложенный А. В. Шубниковым, широко используется в отечественном кварцевом производстве. Наиболее удобно по фигурам удара на грани пинакоида (базиса) распознавать грани ромбоэдров R и r или находить направления осей X или Y в кусках кварца, лишенных огранки. Удар на несколько подшлифованную поверхность кристалла наносится обычно стальным керном или устройством, подобным медицинскому скарификатору. Образующиеся от удара трещины после травления в плавиковой кислоте приобретают общие очертания, напоминающие треугольник с несколько искривленными сторонами (рис. 1-17). Как в правом, так и в левом кварце вершины треугольников всегда обращены в сторону к большому ромбоэдру R , а биссектрисы углов при этих вершинах параллельны механическим осям кристалла. При этом положительным направлениям осей Y соответствуют направления от вершин к основаниям треугольников. Найденные по фигурам удара направления должны быть уточнены по огранке кристалла, а в случае ее отсутствия — оптическими или рентгеновскими методами.

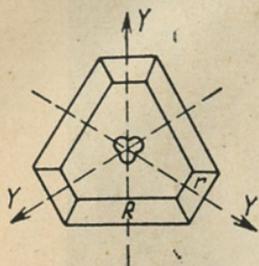


Рис. 1-17. Фигуры удара на грани пинакоида кристалла кварца (по А. В. Шубникову).

1-7. О возможности промышленного использования дефектных кристаллов кварца

В § 1-3 отмечалось, что кристаллы кварца, содержащие цепочки мелких пузырьков (газово-жидких включений), не дающих начала трещинам, вполне пригодны для изготовления пьезоэлектрических элементов большинства типов; наличие внутри них указанных дефектов не сказывается на параметрах резонаторов. То же самое справедливо и для случая, когда внутри кристалла обнаруживаются «голубые иглы».

Совершенно по-иному приходится ставить и решать вопрос о возможности промышленного использования сдвойникованных кристаллов. Дело в том, что долгое время двойники кварца — как дофинеийский, так и бразильский — считались совершенно непригодными для пьезотехники. В частности, симметрия двойников совершенно отлична от симметрии α -кварца. Бразильский двойник относится к гексагонально-пирамидальному классу $6 \cdot m$, а дофинеийский — к гексагонально-трапецеэдрическому классу $6 : 2$. Следовательно, идеальный бразильский двойник не обладает пьезоэлектрическими свойствами,

так как все пьезоэлектрические модули для класса симметрии $6 \cdot m$ равны нулю. Что касается дофинеяского двойника, то хотя класс $6:2$ в принципе и является пьезоэлектрическим, но как по пьезоэлектрическим, так и по своим упругим характеристикам кристаллы этого класса существенно отличаются от тригонально-трапецеэдрических кристаллов, к которым принадлежит α -кварц. Отсюда делается вывод о том, что и дофинеяский, и бразильский двойники в пьезоэлементе кварцевого резонатора недопустимы. При этом не обращают внимания на то, что тензоры упругих констант для бразильского двойника совершенно тождественны аналогичным тензорам монокристаллов кварца. Следовательно, механические колебания пластины, изготовленной из бразильского двойника, должны происходить точно так же, как и колебания однородной, монокристалльной кварцевой пластины. В частности, такие пластины должны иметь одинаковые резонансные частоты, одинаковые изменения частоты колебаний при изменении температуры и т. п. [Л. 1-7]. Правда, поскольку «физические» направления электрических осей компонент бразильского двойника антипараллельны, заряды, возникающие на некоторой поверхности срезка при появлении механических напряжений в кристалле, имеют противоположные знаки на участках, принадлежащих разным компонентам. Это значит, что суммарный пьезоэлектрический заряд будет меньше заряда, возникающего в тех же условиях на грани монокристалльной пластинки, на величину, пропорциональную удвоенной площади, занимаемой меньшей из компонент; если эти площади будут равны, то итоговый заряд окажется равным нулю.

Очень часто, однако, относительные размеры компонент двойника неравноценны: одна из них бывает развита значительно сильнее, чем другая. В таком случае можно выделить области, где сдвойникованная часть будет сравнительно невелика, хотя сами по себе размеры этих областей оказываются недостаточно большими для того, чтобы из них можно было вырезать монокристалльные пластины нужных размеров.

Ясно, что из такого двойникового кристалла все же может быть изготовлена резонаторная пластина, которая по своим свойствам не будет отличаться от монокристалльной; это возможно в том случае, если двойники расположены в той части пластины, которая не должна покрываться металлическими электродами. Приведенное условие может быть достаточно часто выполнено, поскольку в настоящее время кварцевые элементы в большинстве случаев металлизуются не полностью.

Возможность использования бразильских двойников в подобных пьезоэлементах была доказана экспериментально [Л. 1-7]. Установлено, что если области, занимаемые менее развитой компонентой двойника, располагаются вне электрода, то характеристики резонатора совершенно тождественны тем, которыми обладают аналогичные резонаторы с монокристалльными кварцевыми элементами.

Что касается двойников, образованных по дофинеяскому закону, то ситуация, подобная описанной выше, возникает при продольных, а также при изгибных колебаниях в том случае, когда пластина вырезана в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами, параллельными кристаллофизическим осям X , Y и Z . В этом легко убедиться, анализируя тензоры упругих констант кварца и дофинеяского двойника. Если же из сдвойникованного по дофинеяскому закону кристалла изготовить пластину какого-либо косоугольного среза,

например *AT*, *BT* или любого другого, то в этом случае каждая из частей сростка будет иметь свою угловую ориентацию. Так, если одна из них вырезана под углом -49° к оси *Z* (*BT*-срез), то другая часть, принадлежащая к другой компоненте сростка, окажется ориентированной под углом $+49^\circ$ к этой оси. Поскольку частотные коэффициенты каждой компоненты при этом окажутся разными, пластина будет заведомо немоночастотной, а ее параметры в интервале температур будут претерпевать весьма значительные изменения.

В ряде случаев кристаллы, сдвойникованные по дофинеиному закону, могут быть превращены в монокристаллы. Принципиальная возможность такого превращения базируется на том, что при известных условиях лишь определенный способ построения кристаллической решетки кварца обеспечивает минимум ее потенциальной энергии; следовательно, в этих условиях можно добиться переориентации одной из компонент дофинеиного, двойника, что приведет к его превращению в монокристалл.

Первоначально раздвойникование кварца производилось нагреванием сдвойникового кристалла до точки $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения (т. е. примерно до 573°C) и последующего многократного перехода через эту точку в ту и другую стороны [Л. 1-8]. К настоящему времени уже найдены другие, более совершенные способы раздвойникования кварца. Лучший из них — метод кручения сдвойникового кристалла при температуре, близкой к температуре $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения [Л. 1-9, 1-10]. Этим способом могут быть обработаны не целые кристаллы или их куски, а лишь прямоугольные пластины, вырезанные из таких кристаллов. Пара главных граней указанных пластин должна быть параллельна или почти параллельна грани большого ромбоэдра кварца *R*, а две другие грани должны быть вырезаны вдоль осей *X* и *Z'* (срезы *BT*, *DT* и т. п.). Этим же способом могут быть раздвойникованы пластины, пара главных граней которых приблизительно параллельна малому ромбоэдру *r*, но при условии, что боковые грани пластин вырезаны под углом 45° к осям *X* и *Z'* (срезы *GT*, *AT* — $yxls/+35^\circ \pm 45^\circ$ и *CT* — $yxls/+38^\circ \pm 45^\circ$).

Раздвойникованные кварцевые пластины оказываются вполне пригодными для изготовления полноценных кристаллических элементов резонаторов. Такие резонаторы ничем не уступают резонаторам с пьезоэлементами из заведомо монокристалльного кварца [Л. 1-11].

Глава вторая

Основы процессов изготовления кварцевых резонаторов

2-1. Механическая обработка поверхности кристаллов

Шлифование кварца. Механическая обработка поверхности кварцевых элементов определяет основные параметры резонаторов — добротность и долговременную стабильность (старение): чем лучше обработана

поверхность кварца, тем меньше потери в поверхностном слое, обусловленные затуханием упругих волн, возникающих в колеблющемся пьезоэлектрическом кристалле, меньше отрыв частиц, не составляющих единого целого с монокристаллом, и релаксация микронапряжений.

Чтобы получить поверхность с минимальным количеством дефектов, кварцевые элементы сначала шлифуют абразивами различного гранулометрического состава в определенной последовательности, строго соблюдая припуски на величину слоя, удаляемого каждым абразивом, а затем полируют микропорошком. Для ускорения механической обработки рельефный слой можно удалять травлением. Зерна свободного абразива, находясь между кристаллом и шлифовальником, при однократном воздействии образуют трещины на поверхности кварца.

Последующее прокатывание зерен абразива приводит к выкалыванию частиц кристалла, которые удаляются водой вместе с отработанными зёрнами абразива за пределы поля механической обработки. Однако вода в процессе шлифования служит не только для разделения и удаления частиц кристалла и абразива. Проникая в макротрещины, вода вступает во взаимодействие с развитой поверхностью кристалла, продукты гидролиза производят расклинивающее действие, уменьшая энергию связи и облегчая тем самым отрыв частиц твердого тела.

Шлифование характеризуется толщиной рельефного трещиноватого и деформированного слоев, а также производительностью процесса при сохранении высокого качества поверхности кристалла.

Изучение воздействия абразивных зерен электрокорунда, карбида кремния, карбида бора и алмаза размерами 7, 10, 14 и 20 мкм на процессы диспергирования показало, что при шлифовании кварца оптимальный расход абразивов пропорционален хрупкости их зерен, а производительность шлифования — давлению и скорости вращения шлифовальника. Толщина рельефного и разрушенного слоев не зависит от давления и скорости вращения шлифовальника [Л. 2-1, 2-2].

При шлифовании кварца характер зависимости между показателями, определяющими этот процесс, и технологическими факторами, как и при шлифо-

вании стекла¹, определяется линейными функциями

$$N = k_1 d; h = k_2 d; a = k_3 d; a \approx 4h, \quad (2-1)$$

где N — производительность шлифования; d — максимальный размер зерен основной фракции абразива; a , h — толщина разрушенного и рельефного слоев соответственно; k_1 , k_2 , k_3 — коэффициенты.

Для электрокорунда $k_1 = 0,50$; $k_2 = 0,15$ и $k_3 = 0,55$, карбида кремния — 0,60; 0,21; 0,80; карбида бора — 0,70; 0,27; 1,00; алмаза — 1,00; 0,33; 1,3. Сравнивая эти коэффициенты, нетрудно видеть, что наибольшей производительностью обладают абразивные зерна алмаза, наименьшей — зерна электрокорунда. Однако следует иметь в виду, что качество шлифования, если его оценивать по толщине рельефного слоя, ухудшается во столько раз, во сколько увеличивается производительность.

Абразивы из синтетического алмаза на органической связке позволяют получить при шлифовании хорошие результаты [Л. 2-3]. Абразивные зерна этих алмазов обычно имеют шероховатую и пористую поверхность, что приводит к большой сцепляемости со связкой, и обладают большой хрупкостью. Большое число острых выступов у алмазных абразивов обуславливает их высокую режущую способность. При небольших усилиях, возникающих в процессе шлифования, с помощью алмазных абразивов на органической связке, можно обеспечить достаточно высокое качество обработки поверхности твердого тела. Вследствие шероховатости своей поверхности зерна из искусственного алмаза весьма прочно удерживаются связкой почти до полного их износа. Алмазные абразивы отличаются исключительно высокой износоустойчивостью. Широкое распространение получила обработка поверхности твердых тел алмазными зернами в свободном состоянии.

Проведение точной классификации алмазных микропорошков исключает наличие частиц крупной фракции, что обеспечивает отсутствие царапин на обрабатываемой поверхности, а следовательно, ее высокое качество одновременно со значительным увеличением производитель-

¹ Стекло, как и кварц, относится к твердым телам, обладающим гидрофильными свойствами. В этом смысле результаты работ, опыты в которых проводились на стекле, могут быть использованы для кварца.

ности процесса. Поэтому в определенных случаях можно ограничиться только шлифованием алмазными абразивами, зерна которых имеют средние размеры порядка 1 мкм и менее, без полирования окисью железа, хрома или другими полировальными порошками (однако с последующим травлением поверхности кварца). Так, например, при шлифовании кварца абразивными зёрнами алмаза, средние размеры которых составляют 15 мкм, и последующем травлении в четырехфтористом аммонии добротность кварцевых брусков частотой 100 кгц достигает $1,9 \cdot 10^6$, а кварцевых брусков частотой 66,6 кгц — $5 \cdot 10^6$ [Л. 2-4].

В работе [2-3] приводятся данные высокомолекулярных поверхностно-активных веществ, хорошо смачивающих зерна алмаза. Эти вещества содержат синтетические жирные кислоты, вазелиновое или касторовое масло, а в некоторых случаях и олеиновую кислоту. Основное влияние на их полирующую способность оказывают физические свойства зерен алмаза и их гранулометрический состав.

Полирование кварца. Теория процессов полирования.

Механизм процессов полирования является исключительно сложным, многоэлементным. На протяжении 300 лет исследователи пытаются выяснить его природу.

Первой была предложена механическая теория процесса полирования, рассматривающая его по аналогии со шлифованием как процесс хрупкого разрушения поверхности зёрнами полировального порошка (Ньютон, Гук, Лекренье, Гершель). Наличие на полированной поверхности следов абразивного воздействия порошка, зависимость скорости полирования от размеров и свойств полировального порошка, а также и от других механических факторов свидетельствуют о том, что полирование является сложным механическим процессом [Л. 2-5].

Другая теория объясняет полирование как пластическое течение поверхностного слоя твердого тела. Эта теория исходит из того, что вещество поверхностного слоя, снимаемое с выступов, откладывается в углублениях шлифованной поверхности и способствует ее сглаживанию (Бейльби, Френч, Смекал, Боуден). Пластическое течение поверхностного слоя объясняют значительным местным повышением температуры, вызываемым действием полировальных зерен и приводящим к размягчению стекла в отдельных точках поверхности. Не-

которые авторы полагают, что пластические деформации в поверхностном слое стекла могут иметь место вследствие высоких давлений, возникающих в местах воздействия зерен полировального порошка.

И. В. Гребенчиков впервые указал на существенное значение физико-химических и химических явлений

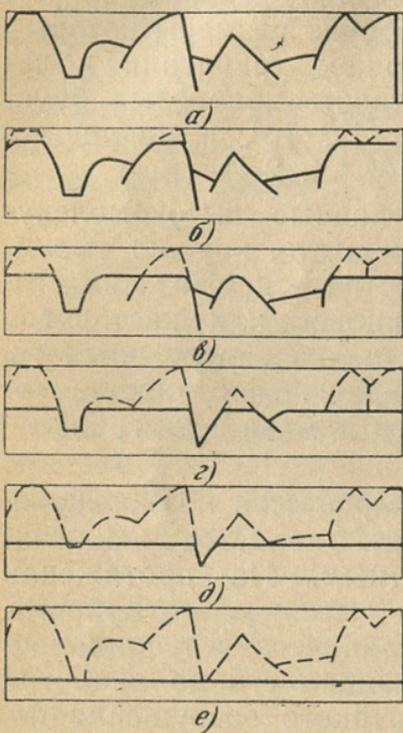


Рис. 2-1. Схема полирования по Брюхе и Поппа.

в процессе полирования стекла [Л. 2-6, 2-7]. Физико-химическая теория полирования основана на том, что поверхностный слой стекла, соприкасаясь с водой, химически с нею взаимодействует, образуя гидролизную пленку. Эта пленка слабо связана с нижележащим слоем стекла и при передвижении сдирается мягкими зёрнами крокуса в первую очередь с выступов, оставшихся после шлифования. Обнажающаяся поверхность снова взаимодействует с водой, при этом вновь образуется гидролизная пленка, которая снимается с поверхности и т. д. до тех пор, пока не закончится процесс расширения полированной поверхности. Таким образом, полированная поверхность возникает в результате последовательного разъедания выступающих над поверхностью частей кристалла и удаления слабо связанных с поверхностью продуктов реакции.

Дальнейшие многочисленные исследования подтвердили правильность основных положений физико-химической теории процессов полирования стекла.

В последнее время проводятся исследования в направлении детализации рассмотренных процессов. В частности, речь идет о характере воздействия зерен полировального порошка на поверхностный слой стекла и характер его удаления.

Результаты изучения различных стадий процесса полирования, проведенного с помощью электронного микроскопа, показывают, что выравнивание шлифованной поверхности стекла происходит не путем перераспределения стекла, снимаемого с выступов и откладываемого

во впадинах, а удалением разрушенного шлифованным слоем при воздействии крокуса на стекло. Предполагается, что при полировании стекла пластические деформации ограничены чрезвычайно тонким поверхностным слоем, измеряемым несколькими десятками ангстрем¹, т. е. они не играют сколько-нибудь значительной роли в процессе полирования. Последовательность стадий процесса полирования иллюстрируется рис. 2-1.

Поверхность изучаемого стекла до полирования представлена на рис. 2-1,а. Вначале происходит удаление кусочков стекла между двумя трещинами, и на самых возвышенных выступах появляются гладкие участки (рис. 2-1,б, в), затем эти участки перемещаются вглубь, образуя гладкую поверхность (рис. 2-1,г). Далее продолжается процесс расширения полированной поверхности (рис. 2-1,д, е). Продукты полирования удаляются. Однако в конце полирования может наблюдаться заполнение неглубоких впадин и отложение вещества на их стенках.

Перед началом полирования на обработанной поверхности должно быть возможно меньше глубоких трещин, чтобы можно было за минимальное время снять весь разрушенный шлифованным слоем вплоть до оснований самых глубоких впадин (рис. 2-2).

Полирование, по мнению Брюхе и Поппа, осуществляется полностью в случае, если удаляется не только рельефный, но и трещиноватый слой² (рис. 2-3). Допускается, что в процессе полирования наряду с физическими явлениями принимают участие и химические.

Интересные результаты по старению приводятся в [Л. 2-8]: через определенное время после полирования поверхности оптического

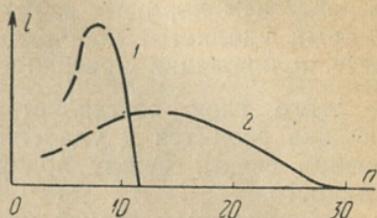


Рис. 2-2. Нормальное (1) и недостаточное (2) распределение глубоких трещин, оставшихся после полирования.

n — число трещин, l — глубина трещин.

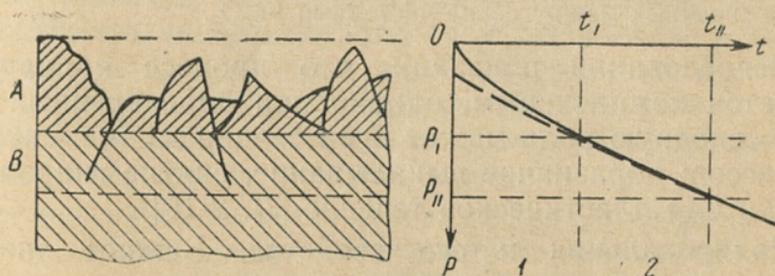


Рис. 2-3. Схема распределения поверхностного и приповерхностного слоев при полировании.

P — степень полирования. A и 1 — рельефный слой, B и 2 — трещиноватый слой.

¹ Это совпадает с нашими измерениями, проведенными при исследовании процессов полировки кварца.

² Это относится и к деформированному слою, если полированию подвергается кварц.

стекла обнаружены выпуклости величиной 0,5—1,0 мкм. Эти выпуклости представляют собой особые коррозионные образования, возникающие вследствие увеличения объема продуктов гидролиза и заполнения дефектов поверхности стекла под полированным слоем. Как было установлено, поверхностный слой на полированном стекле является микропористым. Проникая через него, влага вызывает гидролиз частиц стекла, снятых при шлифовании и полировании и отложившихся в глубоких поверхностных дефектах.

В работе [Л. 2-9] полирование стекла объясняется механическим воздействием порошка и образованием кремниевого слоя типа геля, который удаляется порошком механически или адсорбцией. В процессе полирования поверхность становится гидролизованной; толщина этого слоя составляет 50—100 Å. Воздействие полировального порошка сводится к удалению гидролизного слоя вследствие образования связей между полирующим окислом и атомами Si на поверхности.

Обработанная струей кварцевого песка поверхность имеет многочисленные изломы и трещины. В начале полирования поверхность приобретает грубо однородную структуру с очень мелкими царапинами различной ориентации. Они образуются в результате воздействия частиц стекла, вырываемых с изрезанной трещинами поверхности. Эта структура быстро исчезает. В хорошо очищенном образце обнаруживаются частицы Al_2O_3 , количество которых уменьшается по мере того, как исчезают царапины.

При полировании в одном направлении все углубления приобретают форму овала; один край углубления почти не изменяет формы, а другой значительно изменяется, вплоть до полного соединения с противоположным краем (образование гребня). Крутой край смещается в направлении усилия, что обусловлено текучестью материала в углублении. Частицы стекла, вырывающиеся зернами полировального порошка Fe_2O_3 , собираются в углублениях, образуя ступенчатые слои. Последние располагаются перпендикулярно к наиболее пологой стенке углубления. Для создания такой структуры необходима вода. «Сухое» полирование приводит к скоплению частиц стекла, соединенных между собой частицами Fe_2O_3 .

Исследования показали, что процесс полирования является комплексным, однако при определенных условиях основную роль может играть один из элементарных процессов: абразивное выкалывание, снятие гидролизной пленки или пластическое течение [Л. 2-10].

Полировальник и его свойства. Важное значение в процессе полирования и удаления поверхностного слоя обрабатываемого тела имеют упруго-эластические и вязкие свойства материала полировальника. Природа поверхности полировальника существенного влияния на производительность полирования не оказывает [Л. 2-5]. Это дает основание предположить, что адсорбционная способность материала полировальника не определяет его рабочих свойств. Применялись самые разнообразные полировальники: из различных шерстяных материа-

лов, хлопчатобумажной ткани, стекловолокна и кожи. Производительность процесса во всех случаях оставалась неизменной, если не изменялась эластичность материала.

Опыты показали, что при определенной величине упругости резиновых полировальников производительность достигает максимума. Поэтому, определяя требования к материалу полировальника, прежде всего следует иметь в виду его эластичность.

В качестве материала для полировальников предложены некоторые виды пластмасс, которые обладают почти оптимальными эластическими свойствами. Полирующая способность пластмассовых полировальников увеличивается с возрастанием модуля упругости.

Обычно полирование кварцевых элементов производится на фетровом или смоляном, иногда на металлическом или пластмассовом полировальнике.

Качество поверхности оценивают с помощью оптического микроскопа (метод темного поля) по наличию дефектов после травления поверхностного слоя. Оценка качества полированных поверхностей позволяет утверждать, что лучшей является поверхность, получаемая при полировании крокусом с водой на оптическом смоляном полировальнике. Поверхность кварца, полированная при помощи металлического полировальника, уступает по качеству поверхности, получаемой при полировании на оптической смоле. Даже без травления при увеличении приблизительно в $400\times$ обнаруживаются углубления. После травления поверхностного слоя становятся ясно видимыми структура шлифованной поверхности и прерывистые борозды, образование которых связано с перемещением по поверхности крупных зерен полировального порошка и зерен посторонних частиц.

Высокое качество поверхности кварца, полированного на смоле, объясняется «затягиванием» дефектов, образующихся при шлифовании. Перемещающиеся зерна, прочно связанные смолой, обладают большой механической энергией, что приводит к равномерному снятию поверхностного слоя, в то время как при применении металлического полировальника процесс полирования практически прекращается после образования поверхностного слоя.

В работе [Л. 2-10] описано полирование кристаллов кварца на фетровом и смоляном полировальниках в при-

сутствии крокуса и воды. При полировании кварца на оптической смоле в результате большого локального давления смола размягчается, а затем, спустя небольшой промежуток времени, затвердевает, при этом срываются небольшие участки острой кромки, в частности по периферии кварцевых линз. В случае двояковыпуклых линз с острой кромкой хорошие результаты получены при применении мягкого фетрового полировальника. При этом образуется поверхность высокого каче-

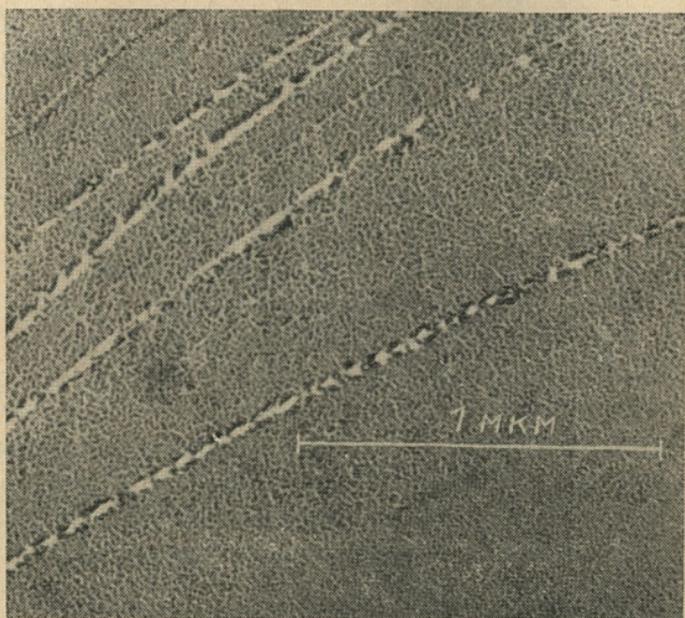


Рис. 2-4. Электронно-микроскопический снимок поверхности кварца с «бороздами».

ства, неровности на которой имеют величину порядка $20\text{--}30 \text{ \AA}$. Иногда на полированной поверхности кварца наблюдаются отдельные царапины — «борозды», ширина которых, как показывают электронно-микроскопические снимки, составляет $60\text{--}300 \text{ \AA}$ (рис. 2-4). Однако борозды наблюдаются весьма редко и не являются особенностью элементарного процесса снятия гидролизной пленки, а возникают вследствие абразивного действия крокуса: при достаточно сильной адгезии зерен крокуса с поверхностью кварца вместе с удалением гидролизной пленки могут вырываться и небольшие кусочки кристалла, причем неровности превышают толщину пленки. Возможна и другая причина появления «борозд» на по-

лированной поверхности кварца. Зерна крокуса, имеющие большие размеры и закрепленные на поверхности полировальника, пронизывают гидролизную пленку и царапают поверхность на некотором участке кристалла.

При полировании поверхности кварцевого бруска окисью железа с водой на тщательно подготовленном смоляном полировальнике таких «борозд» не возникает. Образуется поверхность высокого качества, а потери в поверхностном слое такие же, как и в случае полирования на фетровом полировальнике, т. е. в обоих случаях можно получить максимальную добротность.

Природа и свойства полировального порошка. В процессе полирования порошок активно воздействует на поверхностный слой обрабатываемого твердого тела, обеспечивая его диспергирование. Для полирования обычно применяют крокус, представляющий собой α -модификацию окиси железа (Fe_2O_3), и полирит-смесь окислов редкоземельных элементов с преимущественным содержанием двуокиси церия CeO_2 .

Изучение физико-химических свойств полировальных порошков и их влияния на процесс полирования до настоящего времени не привело к установлению полной ясности в этом вопросе. Одни авторы считают, что активный полировальный порошок обладает значительной твердостью, превышающей твердость обрабатываемой поверхности, и придают большое значение форме частиц полировального порошка. Другие объясняют высокую полирующую способность порошка повышенной реакционной способностью его частиц, обусловленной значительной степенью их дисперсности и незавершенным состоянием кристаллической решетки.

Впервые свойства полирующих порошков были подробно рассмотрены в работах [Л. 2-11—2-13], где указывается, что химическая природа порошка имеет второстепенное значение; на практике с успехом находят применение полирующие вещества различных составов.

Качество полировальных порошков, однородность состава зависят от способа их получения. Оптимальный полирующий порошок должен быть тонкодисперсным, причем диспергирование достигается не путем размола, так как тогда отдельные зерна будут иметь законченную и прочную кристаллическую структуру, а путем разрушения кристаллической решетки при химической реакции.

Эффективность полирования твердого тела окисью железа и полиритом в значительной степени зависит от температуры обжига; оптимальная температура обжига окиси железа составляет 650°C , полирита — 1100°C . Максимальной полирующей способностью обладает крокус, полученный обжигом гидратов окислов железа при температуре около 800°C . Отклонение от этой температуры на ± 100 — 150° приводит к понижению полирующей способности крокуса на 30—40%. При оптимальной температуре обжига кристаллическая решетка крокуса, соответствующая гидрату окиси железа, постепенно изменяется и при полной потере воды или полностью разрушается, или становится малоустойчивой. Получаемый таким способом крокус представляет собой вещество с оптимальной степенью дисперсности. Дальнейшее повышение температуры обжига приводит к росту зерен, т. е. уменьшению дисперсности вещества, и упорядочению кристаллической структуры с образованием решетки, соответствующей окиси железа, что вызывает уменьшение полирующей способности порошка.

В некоторых работах сформулированы требования к свойствам полировальных микропорошков, применяемых для обработки стекла, исходя из того, что в основе процесса полирования лежит механическое выкалывание частиц стекла: а) твердость зерен должна быть больше, чем твердость полируемого тела; б) зерна должны иметь пластинчатую форму; в) зерна должны быть хрупкими, но не чрезмерно; г) при дроблении зерна должны давать осколки с острыми гранями и ребрами; д) предельный размер зерна, определяемый величиной несжимаемого слоя воды, должен быть порядка 0,4 мкм; е) зерна должны обладать гидрофобными свойствами.

Требование, предъявляемое к размерам зерен, обусловлено тем, что средний диаметр частиц микропорошка должен превышать толщину несжимаемого аномального слоя воды, возникающего на границе твердой и жидкой фаз, иначе невозможен контакт полирующей частицы с поверхностью стекла.

Гидрофобность зерен микропорошка обуславливает их способность прочно закрепляться на поверхности полировальника. Типично гидрофобные порошки (окись хрома, крокус) хорошо внедряются в поверхность полировальника и прочно на ней удерживаются. Способность гидрофобного порошка прочно закрепляться на гидро-

фобной поверхности полировальника объясняется тем, что вследствие плохой смачиваемости поверхности полировальника и зерен полировального порошка их соприкосновение происходит без участия слоя воды, поэтому зерна приходят в тесный контакт с поверхностью полировальника и под его давлением внедряются внутрь на некоторую глубину. После снятия давления зерна микропорошка прочно удерживаются полировальником под действием молекулярных сил.

Гидрофильные порошки (кварц, кальций), наоборот, совершенно не закрепляются на полировальнике. Зерна гидрофильного порошка в процессе полирования покрываются тончайшей пленкой воды, которая препятствует плотному контактированию, вследствие чего они не могут закрепляться достаточно прочно.

Полировальные порошки должны обладать большой химической активностью [Л. 2-14, 2-15]. При обжиге некоторое число частиц спекается в конгломераты, при раздавливании которых образуются новые грани, ребра и углы, содержащие большое число дефектов кристаллической решетки (анионно-катионные «дырки»), обладающие свободной энергией связи. Поэтому в момент образования новые частицы обладают большой химической активностью. Бурже и Пайшес считают, что полировальными порошками могут служить такие окислы металлов, катионы которых имеют различные степени окисления, например CeO_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , SnO_2 , MnO , NiO , TiO_2 . Окислы, имеющие одну степень окисления, не активны при полировании, за исключением Al_2O_3 и ZnO .

Твердость частиц полировальных порошков не оказывает значительного влияния на интенсивность полирования, как это вытекает из опытов с измельченными минералами (размеры зерен 1—3 мкм), имеющими различную твердость (рис. 2-5). Полученные данные показывают, что микропорошки CeO_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 с твердостью по шкале Мооса от 5,5 до 6,5 являются наиболее активными. Применение окиси церия в качестве полировального порошка подробно описано в работе [Л. 2-15].

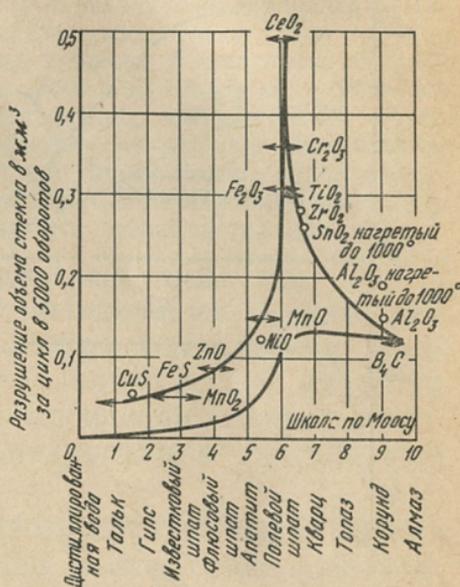


Рис. 2-5. Влияние твердости полировальных порошков на интенсивность полирования (по Бурже и Пайшесу).

По оси ординат — полирующая способность порошков, выраженная в съеме стекла в кубических миллиметрах за 5 000 оборотов; по оси абсцисс — их твердость по шкале Мооса.

Одними из основных показателей, характеризующих свойства микропорошка, являются температура и время обжига; так называемые мягкие, средние и твердые порошки получают только изменением режима обжига. Полирование мягкими порошками приводит к хорошему качеству обрабатываемой поверхности, но скорость процесса в этом случае и срок работы порошков меньше, чем при применении порошков большей твердости. Твердые микропорошки полируют с большей скоростью, срок их работы значительно больше, однако они могут царапать обрабатываемую поверхность.

Влияние температуры обжига на начальную скорость полирования показано на рис. 2-6,а. Уменьшение начальной скорости при полировании окисью, обожженной при более высоких температурах, объясняется как уплотнением окиси, что уменьшает действующую площадь поверхности, так и химической инактивацией. Для окиси с низким содержанием церия характерны большие колебания скорости полирования в зависимости от температуры обжига (пунктирная кривая). Эта окись достигает максимальной производительности полирования только при температуре обжига (1260°C).

Важным фактором является также время обжига. Кривая на рис. 2-6,б показывает, что начальная скорость полирования окисью с высоким содержанием церия резко уменьшается, если обжиг производится в течение недостаточного времени даже при оптимальной температуре.

На рис. 2-6,в показано изменение размеров кристаллитных зерен окиси церия в зависимости от температуры. В работе [Л. 2-16] отмечается большое значение структуры кристаллической решетки окиси церия в процессе полирования.

Кристаллиты с гранцентрированной кубической решеткой размерами $300\text{--}500\text{ \AA}$ обладают хорошими полировальными свойствами. Окись церия с октаэдрической (а не кубической) формой

размера. Кристаллиты с гранцентрированной кубической решеткой размерами $300\text{--}500\text{ \AA}$ обладают хорошими полировальными свойствами. Окись церия с октаэдрической (а не кубической) формой

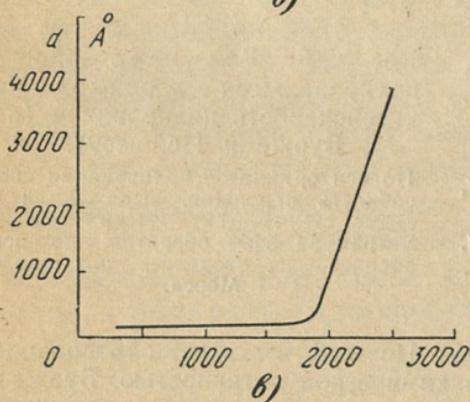
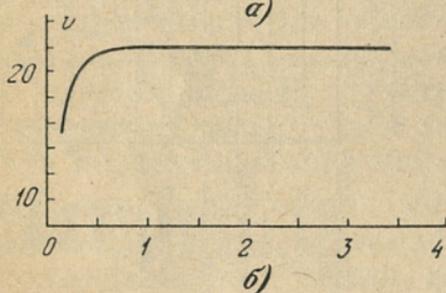
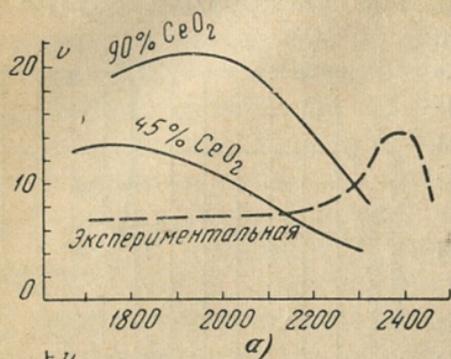


Рис. 2-6. Влияние температуры обжига CeO_2 .

а — зависимость начальной скорости полирования от температуры обжига CeO_2 ; б — зависимость начальной скорости полирования от времени обжига CeO_2 ; в — зависимость размеров кристаллитов CeO_2 от температуры обжига.

размера. Кристаллиты с гранцентрированной кубической решеткой размерами $300\text{--}500\text{ \AA}$ обладают хорошими полировальными свойствами. Окись церия с октаэдрической (а не кубической) формой

менее приемлема для полирования. В данном случае на одну грань кристалла приходится большее число атомов церия по отношению к атомам кислорода.

Взаимодействие поверхности стекла с полирующими окислами согласно теории адгезии осуществляется путем обмена щелочного иона стекла на ион металла, содержащегося в полирующем окисле. При этом возможны и адсорбционные явления. Очевидно, всякие твердые вещества, имеющие в своем составе металлические ионы, способны к такому обмену и могут быть полирующими веществами. На основе этих представлений разработан способ получения так называемых безобжиговых полирующих веществ осаждением из растворов, содержащих, помимо ионов металла, также и комплексообразующие добавки. При выпадении осадка каждая вновь образующаяся элементарная частица сорбирует эти добавки. Безобжиговые вещества успешно применяются при полировании. Использование таких добавок повышает эффективность полирования на 75% (по сравнению с ранее применявшимися полировальными порошками).

Роль жидкости в процессе полирования. Химический состав и свойства применяемой при полировании жидкости оказывают существенное влияние на характер образующейся поверхности и производительность процесса. Наиболее часто при полировании применяется вода.

Сторонники теории микроабразивного выкалывания частиц поверхности в процессе полирования считают, что роль жидкости сводится в основном к равномерному распределению зерен порошка на полировальнике, охлаждению полируемого тела и удалению образующихся продуктов. Так, в работе [Л. 2-16] указывается, что вода воздействует на выступы полируемой поверхности путем «выглаживания», ибо она действует в первую очередь на выступы твердого тела. Полирование в безводных жидкостях всегда приводит к образованию более грубой поверхности.

Некоторые исследователи считают, что вода, химически воздействуя на стекло, вызывает образование гидролизованного поверхностного слоя, менее прочного по сравнению с глубинными слоями и поэтому легче удаляемого в процессе полирования при действии зерен полировального порошка. Замена воды другими жидкостями, например ксилолом или трансформаторным маслом, понижает скорость полирования примерно в 60—70 раз.

Воздействие воды на поверхность твердого тела в процессе его полирования может быть усилено или ослаблено при добавлении в суспензию небольших ко-

личеств некоторых химически активных веществ: кислот, щелочей или солей. В зависимости от природы и количества вводимого в суспензию вещества более или менее значительно изменяется производительность процесса.

При исследовании влияния некоторых химических ускорителей на процессы полирования кварца [Л. 2-17] выяснено, что при полировании кварцевых заготовок, вырезанных параллельно малому ромбоэдру, на оптической смоле в присутствии фтористоводородной кислоты скорость процесса в 2 раза больше, чем при обычных способах. При взаимодействии кислоты с кристаллом и с образующимся при реакции гелем кремнекислоты ограничивается затягивание неровностей поверхностного слоя; получается поверхность, содержащая трещины, образовавшиеся в процессе шлифования.

При полировании кварцевых заготовок, вырезанных параллельно большому ромбоэдру, на оптической смоле в суспензии (1%-ный раствор бифторида калия) процесс протекает со скоростью, в 1,5 раза большей, чем при полировании в присутствии обычной водной суспензии полирита. Однако после снятия полированием слоя толщиной 4 мкм в присутствии бифторида калия на поверхности кристалла еще отчетливо видны «матовые» участки, т. е. полирование нельзя считать оконченным, в то время как при полировании обычным способом после снятия слоя толщиной 4 мкм на поверхности имеются только отдельные «матовые» точки и глубокие царапины, оставшиеся от наиболее крупных частиц абразива и посторонних частиц.

Для доказательства важности физико-химических процессов, протекающих на поверхности кристалла при его полировании, проводились исследования с применением неводных жидкостей [Л. 2-10]. Скорость полирования кварца крокусом с применением воды оказалась приблизительно в 14 раз больше, чем скорость полирования с неводной жидкостью (керосин). При полировании кварца с неводной жидкостью структура поверхности более грубая: максимальная величина неровностей составляет 420 \AA , в то время как при полировании с водой — $20-30 \text{ \AA}$. По мнению авторов, в случае неводной жидкости полирование носит чисто абразивный характер, и ее роль как несмачивающей жидкости сводится к удалению абразива и диспергированных частиц кристалла.

Процессы диспергирования хрупкого тела ускоряют только те жидкости, которые достаточно хорошо смачивают поверхность или содержат вещества, обладающие способностью адсорбироваться на поверхности.

Когда диспергирование твердого тела происходит в жидкости, абсолютно не смачивающей поверхность тела и не содержащей поверхностно-активных веществ, то жидкость не может войти в микротрещины. Разрушение тела в этом случае происходит так же, как и в вакууме. Устья макротрещин заполняются парами жидкости, конденсирующимися на стенках в виде микроскопических капелек, которые в процессе регенерации вытесняются из устья макротрещины. Так создаются условия для залечивания твердого тела. Однако в реальных условиях в атмосфере всегда присутствуют водяные пары.

В том случае, когда жидкость абсолютно смачивает твердое тело, под действием капиллярных сил она заполняет макротрещины. Пары ее могут проникать в устье, переходящее в микротрещину, где расстояние между поверхностями межионного или межатомного порядка. По мере проникновения жидкости в макротрещину давление ее увеличивается и в устье достигает порядка тысячи атмосфер.

В результате ослабляются связи между частицами и облегчается их отрыв друг от друга. В этом случае на диспергирование твердого тела затрачивается меньшая работа.

Поверхностно-активные вещества действуют исключительно селективно, так как для твердых тел и жидкостей существуют законы сродства. Чем выше сродство между кристаллом и жидкостью, тем легче протекает процесс механической обработки.

Методы изучения процессов полирования. При исследовании природы процессов полирования применяют такие методы, как изучение обрабатываемой поверхности при помощи обычного или электронного микроскопа; изучение электронограмм, полученных отражением от поверхностного слоя твердого тела; взвешивание продуктов споллирования, измерение температуры в месте контакта обрабатываемой поверхности с зерном полировального порошка и т. п. Многие авторы изучают характер обрабатываемой поверхности на различных стадиях процесса полирования. Это позволяет проследить

за формированием поверхности и детально изучить ее структуру, ее «дефекты» в виде остаточных выколок, трещин или царапин, которые связаны с предшествующим процессом шлифования или же с самим процессом полирования.

Проведены наблюдения структуры полированной поверхности на различных стадиях полирования при помощи ультрамикроскопа [Л. 2-18]. Для устранения рассеянного света исследуемая поверхность покрывалась слоем сернистого серебра, затем на поверхности стекла цилиндрическим полировальником с закрепленными на нем зернами окиси церия полировалась канавка, которая и подвергалась исследованию. Количественная оценка величины неровностей на поверхности полированного стекла осуществлялась методом многолучевой интерферометрии. Оказалось, что неровности имеют величину $\sim 800-900 \text{ \AA}$.

Изучение поверхности стекла на различных стадиях полирования показало, что отдельные участки с момента образования уже имеют определенную структуру, которая в течение всего процесса полирования остается неизменной. Из этого можно сделать вывод, что механизм образования полированной поверхности заключается лишь в последовательном расширении отдельных элементарных площадок, образующихся в процессе удаления неровностей шлифованной поверхности.

В настоящее время для исследования процесса полирования широко применяют электронные микроскопы просвечивающего ти-

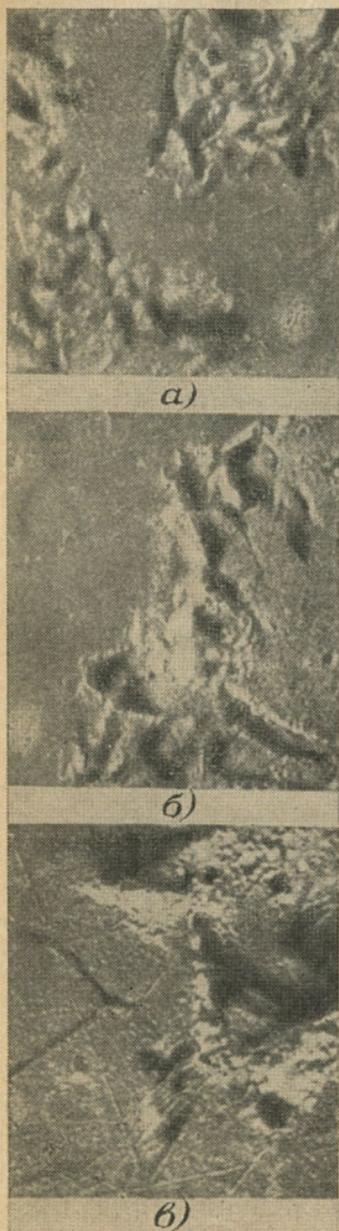


Рис. 2-7. Участок шлифованной поверхности стекла.

а — увеличение 1575х; *б* — 4725х; *в* — 14175х.

па. При этом структуру поверхности твердых тел изучают косвенным методом, когда исследуется не сам объект, а копия его поверхности — реплика.

Реплика, представляющая собой весьма тонкую пленку, должна удовлетворять ряду требований. Она не должна иметь собственной структуры при наблюдении в микроскопе; должна воспроизводить рельеф исследуемой поверхности с точностью, не меньшей разрешающей способности электронного микроскопа; и, наконец, должна быть достаточно механически прочной.

Брюхе и Поппа исследовали поверхности шлифованного и полированного стекла с помощью электронного микроскопа, используя для получения снимков лаковые и углеродные реплики, которые для контрастности оттенялись платиной [Л. 2-19, 2-20]. На рис. 2-7 приведены снимки участка шлифованной поверхности в процессе полирования, выполненные при разных увеличениях. При большом увеличении (рис. 2-7,в) можно обнаружить множество тонких царапин, начинающихся у краев выколки и представляющих собой, по мнению авторов, следы воздействия зерен полировального порошка.

Дальнейшее полирование приводит к тому, что небольшие участки полированной поверхности увеличиваются и занимают почти всю поверхность (рис. 2-8,а и б). В некоторых местах этой поверхности видны отдельные выколки (рис. 2-8,в), оставшиеся от шлифования. На рис. 2-9 представлена полированная поверхность с

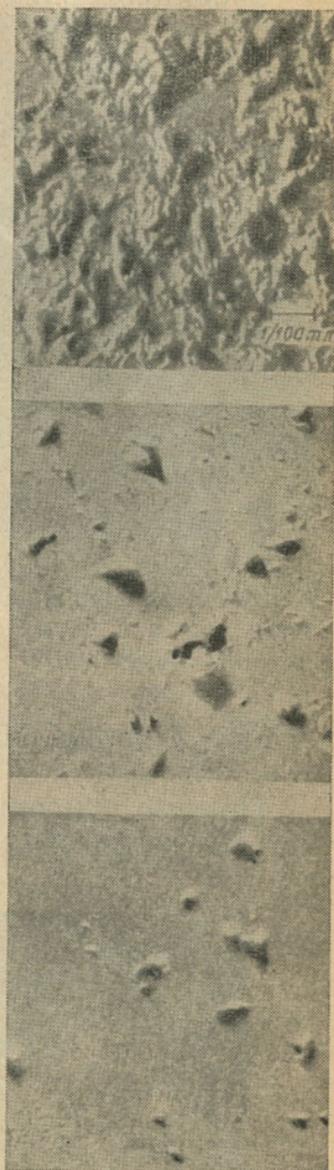


Рис. 2-8. Изменение характера шлифованной поверхности в процессе полирования.

двумя тонкими царапинами, образовавшимися при полировании. На рис. 2-10,а видна группа царапин на полированной поверхности, нанесенных, по-видимому, осколками стекла, застрявшими в полировальнике из войлока (рис. 2-10,б и в), просматривается одиночная царапина при разных увеличениях.

Отполированная и протравленная в плавиковой кислоте поверхность стекла показана на рис. 2-11, на котором можно видеть трещинки, оставшиеся после шлифования, и множество проявившихся после травления следов полирования. При растирании полированной поверхности сухим полировальным или алмазным порошком на ней возникают царапины (рис. 2-12).



Рис. 2-9. Полированная поверхность стекла с двумя тонкими царапинами.

В работе [Л. 2-9] процессы полирования стекла изучали методом измерения весовых потерь в сочетании с электронно-микроскопическим исследованием изменения топографии поверхности при полировании в различных условиях. С выбранного участка изготовляли серию реплик, снимки с которых показывают детали процесса полирования от образования выколов до их исчезновения.

Помимо описанных выше методов, применяют также методы исследования природы процессов полирования,

при полировании поверхности сухим полировальным или алмазным порошком на ней возникают царапины (рис. 2-12).

В работе [Л. 2-9] процессы полирования стекла изучали методом измерения весовых потерь в сочетании с электронно-микроскопическим исследованием изменения топографии поверхности при полировании в различных условиях. С выбранного участка изготовляли серию реплик, снимки с которых показывают детали



Рис. 2-10. Царапины на полированной поверхности.

основанные на пьезоэлектрических свойствах кристалла. Для изучения элементарных процессов полирования кристаллов, обладающих гидрофильными свойствами, А. Г. Смагиным предложен и осуществлен метод измерения частоты пьезокварца как прецизионный метод определения относительного изменения линейных размеров. Этому методу свойственны весьма высокая чувствительность и большая точность измерений.

При использовании кварца AT -среза частотой 500 кгц



Рис. 2-11. Полированная и протравленная в плавиковой кислоте поверхность стекла.



Рис. 2-12. Полированная поверхность стекла после шлифования сухим полировальным порошком.

и с температурным коэффициентом частоты порядка $10^{-8} \text{ град}^{-1}$ можно измерить изменение толщины d кристалла (соблюдая плоскостность и плоскопараллельность) порядка 1 \AA . Так как $f = \frac{1}{2d \sqrt{\rho s}}$, то $\Delta f/f \sim \Delta d/d$.

При $d = 0,38 \text{ см}$ изменение толщины кварца $\Delta d \approx 1 \text{ \AA}$ (частота измеряется при помощи эталона частоты). Если же использовать кварц в форме бруска на частоту 100 кгц и термостатировать его от измерения к измерению, то можно получить $\Delta d \approx 50 \text{ \AA}$. При особо тщательном соблюдении условий измерения можно уменьшить Δd примерно до 5 \AA .

Описанный метод расширяет диапазон измерения относительных линейных размеров до величин порядка

10^{-8} см и открывает новые возможности исследования вклада различных механизмов при полировании.

Механизм полирования кварца. Известно, что строение кристаллических твердых тел нарушается вследствие механической обработки их поверхности на толщине в несколько десятков и сотен молекулярных слоев. Однако нарушение кристаллической структуры может проникать и на большую глубину.

Оптическим путем установлено наличие участков в поверхностном слое, в которых направление плоскостей кристаллической решетки отличается от направления внутри кристалла. Обнаружено, например, что на глубине 100 мкм от поверхности угловое смещение некоторых областей составляет $45'$, на глубине 0,5 мкм достигает 4° . Поверхностная структура представляет собой сеть трещин, расчленяющих ее на механически связанные кристаллиты, при этом чем ближе кристаллиты к поверхности, тем меньше их размеры и тем больше направление плоскостей отходит от первоначального направления кристаллической решетки [Л. 2-21].

Исследовался поверхностный слой кварца методом дифракции рентгеновских лучей при $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращениях кристалла [Л. 2-22]. Дифференциальный термический анализ позволил автору определить количество тепла, поглощенного $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращением известного количества вещества, а отсюда — содержание кварца. В работе сделан вывод, что «декристаллизованная» часть имеется на поверхности в однородном слое толщиной $\sim 700 \text{ \AA}$. Этот слой либо совершенно аморфный, либо в нем остались малые области, в которых сохранился кристаллический порядок.

Интенсивность дифракционных полос пучка рентгеновских лучей, направленных на кварцевый порошок, слабее в случае мелких частиц, чем в случае крупных. Для количественного истолкования этого результата необходимо допустить, что слой зерен у поверхности толщиной около 300 \AA воздействует на рентгеновские лучи как аморфный кремнезем.

При помощи электронной дифракции проведено изучение поверхности полированной кварцевой пластины. Обнаружены отчетливые дифракционные кольца, указывающие на то, что имеет место кристаллическая структура, но без определенной общей ориентации. Хорошо локализованные пятна на поверхности свидетельствуют

не только о кристаллической структуре, но и о том, что ячейки на всей поверхности приближенно параллельны. Опыт Дэвиссона показывает, что поверхность состоит из мелких кристалликов, причем те из них, которые расположены ближе к поверхности, хуже (слабее) связаны между собой, чем те, которые находятся дальше от поверхности.

При полировании кварца одновременно протекают два процесса [Л. 2-17]. Воздействие механических факторов, возникающих при перемещении зерен полировальника и их давлении на полируемую поверхность, приводит к разрушению связей Si—O—Si . Образующиеся катионы и анионы реагируют с водородными и гидроксильными ионами, образуя кремнекислоту в различных формах.

При полировании имеют место дегидратация кремнекислоты на золь и гель и их связывание с нарушенными связями Si—O—Si во впадинах полируемой поверхности. Снятие геля кремнекислоты на выступах полируемой поверхности преобладает над связыванием геля кремнекислоты во впадинах, что и приводит к выравниванию поверхности.

В работе [Л. 2-10] изучалась роль пластических деформаций, микроабразивного выкалывания и водной среды в процессе полирования, при этом поочередно исключались компоненты, не свойственные исследуемому механизму. Для повышения точности измерения относительного изменения линейных размеров был использован метод измерения частоты пьезоэлектрического кварца.

Полированию подвергали кристаллы кварца AT -среза, имеющие температурный коэффициент частоты порядка 10^{-8} град $^{-1}$ в диапазоне температур $-7 \div 44^\circ\text{C}$. В процессе измерений относительного изменения толщины кварц термостатировали при 28°C с погрешностью, не превышающей $\pm 0,1^\circ$. Для сравнения частоты использовали эталон частоты. Плоскостность и плоскопараллельность контролировали с помощью обычных оптических систем.

При исследовании роли пластических деформаций из механизма полирования были исключены абразивные зерна полировального порошка и жидкая среда. Кварц полировали на полировальнике, предварительно достаточно тщательно очищенном с целью исключения абра-

живного действия адсорбированных и абсорбированных посторонних частиц, в герметической камере (влажность 2—4%, температура 16—17°С). При указанных выше условиях скорость процесса полирования составляла около $20 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Механизм полирования, связанный с абразивным характером диспергирования поверхности кварца, изучали в отсутствие жидкой среды, но при наличии крокуса, используемого в качестве абразива. Как показали измерения, скорость процесса абразивного выкалывания частиц кристалла составляла $160 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$. Однако с уменьшением размера зерен полировального порошка скорость также уменьшается, а качество поверхности улучшается.

Скорость полирования кварца крокусом при наличии дистиллированной воды (чтобы исключить абразивное действие различных частиц, находящихся в суспензионном состоянии), т. е. скорость снятия гидролизной пленки зернами закрепленного в поверхности полировального абразива полировального порошка, составляла $0,32 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Для изучения роли физико-химических процессов кварц полировали с применением неводных жидкостей (керосина), причем скорость полирования при всех прочих равных условиях составляла $240 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$, т. е. несколько превышала скорость процесса, обусловленного микроабразивным воздействием зерен крокуса.

Скорость полирования кварца с водой приблизительно в 14 раз больше, чем скорость его полирования с керосином. Это доказывает важность физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое кристалла в присутствии воды. При полировании кварца с керосином имеет место более грубая структура поверхности и величина неровностей составляет 420 \AA , в то время как с водой — $20\text{—}30 \text{ \AA}$. В случае применения неводной жидкости проявляется чисто абразивное действие, и ее роль как несмачивающей жидкости сводится к удалению абразива и диспергированных частиц кристалла. Результаты описанных экспериментов показывают, что при использовании воды механизм процесса полирования заключается в удалении гидролизной пленки зернами закрепленного абразива, а при использовании жидких

сред, не обладающих гидролитическим действием и смазываемостью, полирование можно рассматривать как процесс микроабразивного выкалывания частиц поверхности твердого тела.

Проведенные [Л. 2-10] исследования доказывают, что при определенных условиях все три процесса — истирание поверхности вследствие пластических деформаций, абразивное выкалывание, удаление гидролизной пленки — являются элементарными процессами полирования.

На практике полирование проводят, используя как полировальный порошок, так и жидкую среду, например воду. Если учесть, что скорость абразивного выкалывания в 20 раз меньше скорости удаления гидролизной пленки зернами закрепленного полировального порошка, то следует сделать вывод, что при полировании твердого тела с гидрофильными свойствами (кварц, стекло и т. д.) основным является физико-химический процесс (согласно теории И. В. Гребенщикова).

Подчеркнем, что более общее значение имеет элементарный процесс полирования, связанный с микроабразивным выкалыванием частиц поверхности, так как негидрофильных твердых тел много больше, чем гидрофильных.

Таким образом, нет необходимости в создании единой теории полирования, ибо при определенных условиях каждая из них является справедливой, как это показано нами на примере процессов полирования кварца. По существу каждая из теорий объясняет один из процессов единого механизма полирования.

2-2. Очистка и травление поверхности кристаллических элементов

Очистка поверхности кварцевых элементов. При производстве кварцевых резонаторов особое значение имеет химическая обработка их кристаллических элементов. Она широко применяется почти на всех технологических стадиях, начиная с оценки и контроля качества сырья, поступающего в распиловку, и кончая обработкой полированных, а в некоторых случаях и металлизированных кварцевых элементов, если последние после напыления металлической тонкой пленки в высоком вакууме соприкасаются с атмосферой.

Свойства резонаторов существенно зависят от химической очистки поверхности кварцевых элементов от все-

возможных загрязнений. На поверхности шлифованных кварцевых элементов присутствуют такие загрязнения, как остатки наклейной мастики (смесь канифоли с воском или парафином), частицы абразивного микропорошка (электрокорунд) и металла от шлифовальников (чугун, латунь), частицы, оставшиеся от металлических и графитовых карандашей (латунь, графит), а также загрязнения минерального и органического происхождения, например, мономолекулярные жировые пленки, осаждающиеся из воздуха на кристалл. Поэтому почти все технологические операции изготовления кварцевых элементов проводят с обезжириванием и тщательной промывкой.

Для удаления остатков наклейной мастики и обезжиривания кварцевых элементов используют CCl_4 . Четыреххлористый углерод достаточно хороший растворитель, инертный почти ко всем металлам (за исключением алюминия) и металлоидам, не горюч и не вызывает ожогов при попадании на кожу.

Осколки частиц абразивного порошка, как указывалось, внедряются в трещины, образующиеся на поверхности кристалла в процессе шлифования, которое проводится с помощью микропорошков электрокорунда Al_2O_3 . Химическим путем очистить кварцевые пластины от частиц Al_2O_3 невозможно. Электрокорунд отличается большой твердостью и нерастворимостью в кислотах и не вступает в химическое взаимодействие со шлифуемым металлом. В растворимое состояние электрокорунд можно перевести сплавлением со щелочами или хромовой смесью в автоклаве при температуре выше $300^\circ C$. Однако кварц вступает в реакцию со щелочами с большей скоростью, чем электрокорунд. Поэтому поверхность кварцевых элементов очищают от загрязнений частицами абразива, используя ультразвуковую обработку.

Для очистки кварцевых элементов от частиц металла (Fe, Cu, Zn) и графита применяют химический и механический способы. При химическом способе очистки металлические частицы растворяются в царской водке ($HNO_3 : 3HCl$) с образованием хлористых солей соответствующих металлов. Кроме того, в результате обработки в хромовой смеси (раствор двуххромовокислого калия $K_2Cr_2O_7$ в концентрированной серной кислоте) графит окисляется до углекислоты.

Кварцевые элементы переносят специальным пинцетом с наконечником из фторопласта или органического стекла. После химической обработки их помещают в специальную тару, прошедшую химическую очистку, и подсушивают в вытяжном шкафу, а затем вместе с кварцем ставят в сушильный шкаф, где поддерживается температура 80—100°С. Если сушильный шкаф установлен под вытяжкой, предварительную подсушку в вытяжном шкафу можно исключить. После подсушивания тару извлекают из сушильного шкафа и закрывают ее герметично специальной крышкой, предварительно прошедшей химическую очистку.

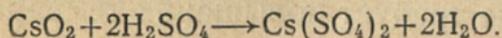
При механическом способе очистки применяют ультразвуковую обработку кварцевых элементов для удаления различных загрязнений: частиц абразивных материалов, металла и графита. В качестве рабочей среды используют четыреххлористый углерод как активное обезжиривающее средство.

На поверхности полированных кварцевых элементов присутствуют такие загрязнения, как остатки полированных и наклеечных смол (канифоль, воск, пек древесный, скипидар, битум); частицы полировального порошка (крокус, полирит), а также загрязнения минерального и органического происхождения, например мономолекулярные жировые пленки, осаждающиеся из воздуха на кристалл.

Для удаления остатков полировочных смол с поверхности кварцевых элементов также применяют CCl_4 . Полировочные смолы гораздо медленнее удаляются с поверхности полированных кварцевых элементов, чем наклеечная мастика. Поэтому обработку необходимо проводить в ультразвуковой ванне.

Методы обработки кварцевых элементов, полированных крокусом и полиритом, различны. Частицы крокуса Fe_2O_3 , которые остаются в поверхностном гидролизном слое кварца и на его кромках, удаляют обработкой в горячем растворе царской водки, представляющей собой смесь одной части HNO_3 и трех частей соляной кислоты HCl .

Полирит представляет собой смесь окислов редкоземельных металлов семейства лантанидов с преимущественным содержанием двуокиси цезия CsO_2 , прокаленной при высоких температурах (900—1300°С). В состав различных полиритов входит не менее 50% двуокиси цезия. Для очистки кварцевых элементов от частиц полирита их обрабатывают в горячей концентрированной серной кислоте, которая вступает в реакцию с двуокисью цезия:



Вместо серной кислоты можно применять хромовую смесь (рас-
твор 30 г $K_2Cr_2O_7$ в 1 000 мл концентрированной H_2SO_4).

При химической обработке полированных кварцевых элементов в хромовой смеси обрабатываемые детали загружают в специальные кислотоупорные кассеты, а затем в ванну и проводят ультразвуковую обработку. Кварцевые элементы в кассете промывают холодной проточной дистиллированной водой (или в нескольких ваннах с дистиллированной водой), затем помещают в сушильный шкаф, температура которого составляет 100—150° С.

В работе [Л. 2-21] в качестве реактива использовали расплавленный едкий натр. После промывки в воде кристаллы промывались в 30%-ной плавиковой кислоте (HF) для устранения следов натриевых солей.

Перед травлением очистку поверхности кварцевых элементов можно проводить следующим образом. Полированные кристаллы погружают в раствор хромовой кислоты и ополаскивают в воде, затем каждый кристалл промывают с мылом и водой, вновь погружают в водный раствор аммиака и промывают в чистой проточной воде. Обезжиривание перед вторым этапом травления производят в растворе K_3PO_4 .

Следует отметить, что в настоящее время очистка кристаллических поверхностей кварцевых элементов мыльным раствором почти не применяется, так как это приводит к зажириванию поверхности.

Качество обезжиривания и промывки проверяют ультрамикроскопом. Обычно на практике применяют самый простой способ определения качества обезжиривания и промывки: если вода полностью скатывается с пластин, то процесс обезжиривания и промывки считается законченным; в противном случае его надо повторить.

Тщательное обезжиривание и промывка — обязательное условие высококачественного вакуумного напыления тонких пленок на поверхность кварцевых элементов.

Травление кристалла. Травление проводится для ускорения процессов механической обработки, уменьшения рассеяния энергии в поверхностном слое, уменьшения старения, снятия механических напряжений шлифованных и полированных кварцевых элементов, для выявления дислокаций, для подстройки частоты резонаторов и других целей.

Кристаллический кварц представляет собой почти чистый кремнезем SiO_2 . Он чрезвычайно стоек химически, малоактивен и взаимодействует только с концентрированными щелочами NaOH, KOH, фтористоводородной (плавиковой) кислотой HF и с кислыми фтористыми солями (дифторидами) калия, натрия и аммония ($NH_4F \cdot HF$, $KF \cdot HF$, $NaF \cdot HF$).

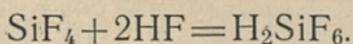
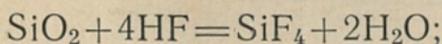
В качестве травителей можно использовать расплавы и растворы едких щелочей. Однако растворы таких щелочей, как едкий натр и едкое кали, при температурах до 100° С слабо растворяют кварц. При температурах выше 100° С скорость его растворения повышается, но травление необходимо проводить в автоклавах, что усложняет процесс обработки и контроля травления.

Наиболее эффективным быстродействующим травителем, который не требует повышения температуры, является

ся плавиковая кислота. В производстве кварцевых элементов используют как концентрированную плавиковую кислоту (свыше 35%), так и ее растворы. Кроме того, плавиковую кислоту применяют в сочетании с дифторидами калия и аммония.

При воздействии плавиковой кислоты на кварц вместо нерастворимого в воде кремнезема SiO_2 образуется кремнефтористоводородная кислота H_2SiF_6 , растворимая в воде, в результате чего разрушается поверхностный слой кристалла.

Воздействие плавиковой кислоты на кварц приводит к следующим химическим реакциям:



Реакция растворения кварца в плавиковой кислоте сопровождается образованием фтористого кремния в газообразном состоянии, который не выделяется в присутствии избытка HF , а растворяется в ней с образованием H_2SiF_6 . В начальный момент плавиковая кислота весьма интенсивно реагирует с кристаллом кварца, если его поверхность хорошо очищена. Особенно велика скорость реакции в случае, когда кислота взаимодействует со шлифованной или полированной поверхностью кристалла (имеет место исключительно развитая поверхность, т. е. поверхность большой площади), на которой расположены слабо связанные или совсем не связанные с общей массой кристалла частицы, а также микро- и макротрещины. Проникая по трещинам в глубь кристалла плавиковая кислота взаимодействует с частицами кристалла почти со всех сторон, что и приводит к большой скорости травления. Через некоторое время наиболее разрыхленные механической обработкой участки разрушенных и нарушенных слоев — рельефного, трещиноватого и деформированного с устьями микротрещин — вытравливаются, и скорость травления уменьшается. Затем кислота вступает в реакцию с ненарушенным механической обработкой слоем кварца, т. е. с монокристаллической структурой, при этом скорость травления в определенных условиях остается постоянной.

Состояние поверхности кристалла после травления зависит от того, удалены ли слабо растворимые или нерастворимые продукты реакции в процессе травления

с поверхности кварца или остались на ней в виде осадка или кристаллитных слоев. Если продукты реакции остаются на поверхности кристалла, то они препятствуют доступу плавиковой кислоты к отдельным участкам поверхности, и травление происходит неравномерно. При удалении с поверхности кварца продуктов реакции, например H_2SiF_6 , травление протекает с большей скоростью и более равномерно, причем величина неровностей в поверхностном слое уменьшается. Скорость травления повышается, если в процессе травления раствор

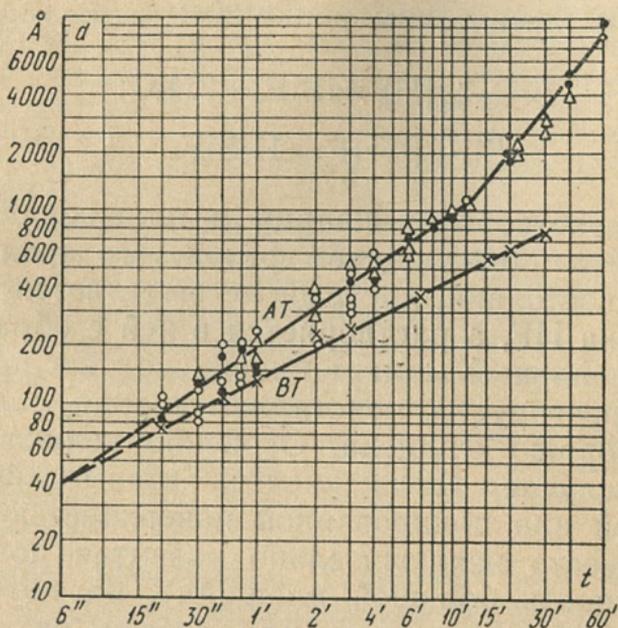


Рис. 2-13. Зависимость толщины травленного слоя, определяемой интерференционным методом, от времени травления (поверхность кварца AT- и BT-среза полирована).

перемешивается например, при воздействии ультразвука.

После шлифовки в поверхностном слое, как указывалось ранее, образуется трещиноватый слой, обуславливающий напряжения, которые могут оказывать влияние как на процессы рассеяния энергии, так и на процессы старения. После полирования также образуется слой, обуславливающий напряжение поверхности кристалла. В результате травления эти напряжения снимаются, что можно определить оптическим путем, используя явление интерференции.

В качестве химического реагента при травлении поверхностного и приповерхностного слоев наряду с плавиковой кислотой приме-

няют фтористо-кислый калий $KF \cdot HF$ (бифторид калия) и двухфтористый аммоний $NH_4F \cdot HF$ (бифторид аммония).

Бифторид аммония менее токсичен и обладает более «мягким» действием (меньшая интенсивность травления) по сравнению с плавиковой кислотой и фтористо-кислым калием. Широко используют также смесь фтористо-кислого калия и двухфтористого аммония.

Нетрудно видеть, что время на механическую обработку можно уменьшить, удаляя травлением нарушенный слой и на определенную глубину рельефный слой. В особенности это существенно для опе-

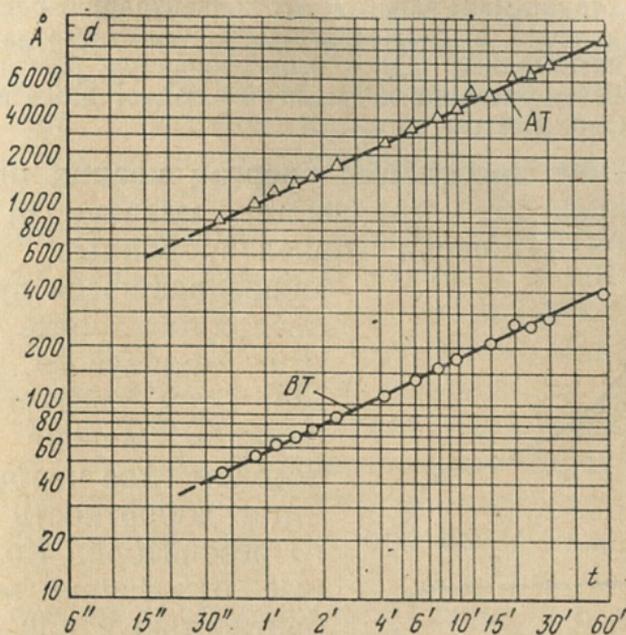


Рис. 2-14. Зависимость толщины травленного слоя, определяемой методом взвешивания, от времени травления (поверхность кварца BT-среза шлифована).

раций, где используют мелкозернистые абразивы и полировальные порошки.

Зависимость между величиной стравленного слоя h (Å) и временем травления (мин) в ванне с насыщенным раствором фтористого аммония при температуре $27,0 \pm 0,2^\circ C$ для кварцевых элементов AT- и BT-среза описывается следующей формулой (с ошибкой до 30%) [Л. 2-23]:

$$h = At^\alpha. \quad (2-2)$$

В случае AT-среза: $A=200$, $\alpha=0,74$, в случае BT-среза: $A=135$, $\alpha=0,50$.

На рис. 2-13 и 2-14 приведены результаты изменения глубины травления в зависимости от времени. Увеличение наклона прямой при травлении пластин AT-среза 12 мин объясняется появлением раковин вследствие удаления двумерных осколков и влиянием ориентации кристаллов. За время травления от 30 сек до 1 мин, когда

наблюдается интенсивная деформация, средняя глубина травления достигает 600 Å и лишь в очень редких случаях доходит до 960 Å. Через 2 мин деформация прекращается, средняя глубина травления достигает 1 400 Å. По-видимому, травлению подвергаются только выпуклости.

Скорость травления кварца сильно зависит от качества обработки его поверхности. Грубо шлифованные кварцевые элементы (микророшками М20 и более) протравливаются намного быстрее, чем тонко шлифованные (микророшками М10, М5 и менее).

Скорость травления зависит от концентрации раствора и его свежести. Травление в свежеприготовленном растворе происходит значительно интенсивнее, чем в использованном растворе. Со временем способность раствора к травлению падает даже в том случае, когда он не используется.

Уменьшение диссипации энергии кварца при травлении. В процессе травления плавиковая кислота растворяет хаотически ориентированные кристаллы,

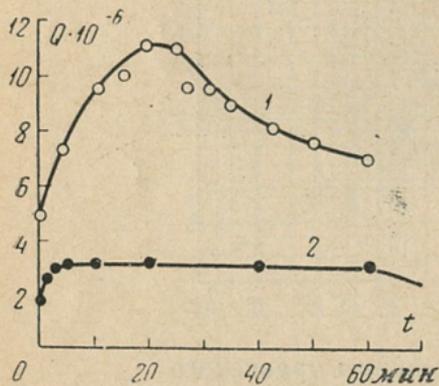


Рис. 2-15. Зависимость добротности кварца от продолжительности его травления.

1 — природный кварц; 2 — искусственный кварц.

образовавшиеся при механической обработке поверхности кварцевого элемента. При этом уменьшается диссипация энергии в поверхностном слое кварца и возрастает добротность кварцевого резонатора. Количественные отношения между добротностью и длительностью травления описаны в работе [Л. 2-27]. Исследование проводилось с кварцевыми брусками из природного и искусственного кварца. После каждого акта травления в плавиковой кислоте кварцевые бруски тщательно про-

мывали в дистиллированной воде и спирте с помощью мягкой беличьей кисточки, затем просушивали в вакуумной печи, помещали в лабораторный держатель, находившийся под колпаком вакуумной установки, и измеряли добротность брусков. Перед измерением добротности кварцевый брусок располагали узловыми линиями на нитях диаметром около 30 мкм в лабораторном держателе, используя специальное приспособление. Для уменьшения погрешности измерения добротности, связанной с отклонением от узловой линии, выполняли десятикратные измерения после каждого акта травления.

В процессе травления природного кварца в 45%-ном растворе плавиковой кислоты наблюдается вначале возрастание добротности, затем через 28—30 мин она уменьшается (рис. 2-15, кривая 1); если этот же брусок оставить в вакууме порядка $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., то добротность кварцевого бруска снова начинает повышаться и приблизительно через 70 ч достигает максимального значения.

Повышение добротности в начале травления связано с растворением поликристаллического вещества в поверхностном слое. Затем из раствора плавиковой кислоты как области с большей концентрацией в структурные каналы кварца начинают проникать диссоциированные ионы и атомы, размеры которых меньше диаметра структурных каналов. Поэтому добротность кварцевых брусков начинает уменьшаться. В вакууме, в который помещают кварц, снова идет процесс выравнивания концентрации. Проникшие ранее в структурные каналы ионы и атомы диффундируют в них и выходят на поверхность. При этом добротность достигает первоначального максимального значения, имевшего место через 28—30 мин после начала травления. Таким образом, при травлении в кварце происходят как необратимые, так и обратимые процессы.

При изучении травления искусственного кварца, выращенного на затравке, вырезанной параллельно базисной грани кварца, выяснилось, что добротность кварцевого бруска вначале повышается и достигает максимального значения, затем на протяжении 10—60 мин остается неизменной, после чего понижается без последующего возвращения к первоначальному значению (рис. 2-15, кривая 2). Аналогичные результаты наблюдались в отдельных случаях и для природного кварца.

Следует отметить, что имеют место случаи запаздывающего воздействия плавиковой кислоты на добротность природного кварца. Если прекратить травление спустя 28—30 мин, то добротность понижается. На рис. 2-16 представлены электронограммы, полученные при отражении электронов от поверхности кварца, обработанных абразивами различного гранулометрического состава. Электронограммы показывают, что поверхность кварца (шлифованного, полированного и протравленного в 5%-ном растворе плавиковой кислоты «ч. д. а.») состоит из монокристалльных блоков идеального строения, ориен-

тированных параллельно друг другу, т. е. на поверхности наблюдаются разрывы сплошности кристалла как результат сдвиговых деформаций при его распиловке и шлифовке. Толщина этого слоя ~ 1 мкм. На рис. 2-17 приводится электронограмма поверхности кварца, шлифованного абразивом, средний размер частиц которого порядка 7 мкм, и протравленного в плавиковой кислоте. Расшифровка этой электронограммы показывает, что на поверхности кварца расположены монокристалльные выступы, правильно ориентированные по отношению к своему основанию. Плавиковая кислота растворяет выкрошившиеся в процессе шлифования частицы кристалла и

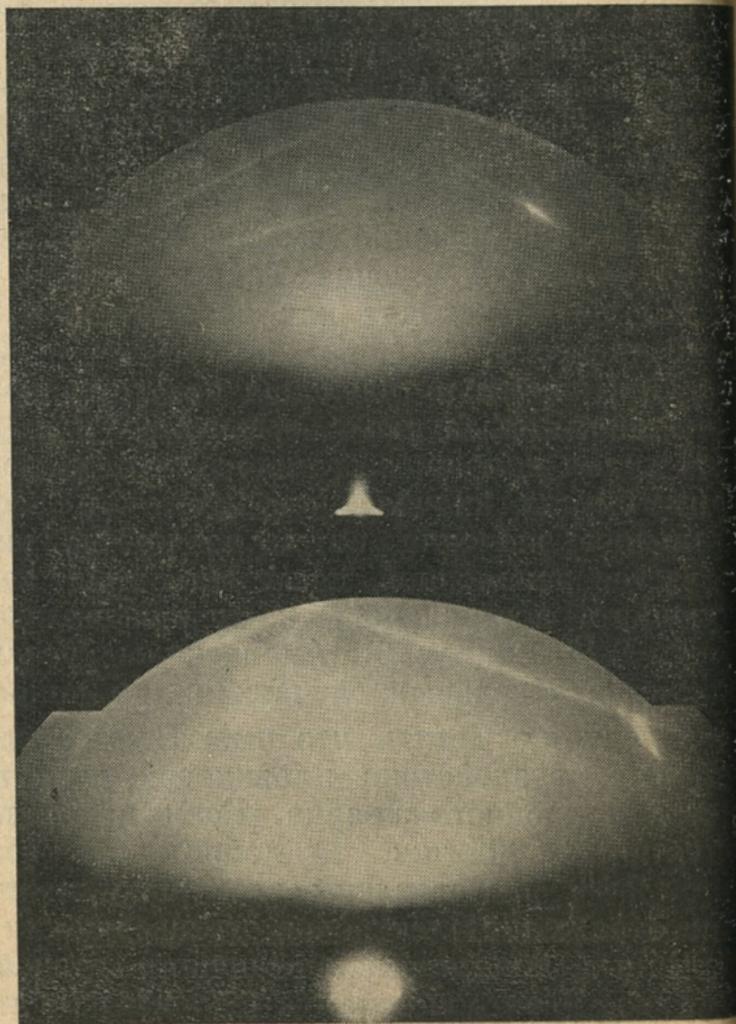
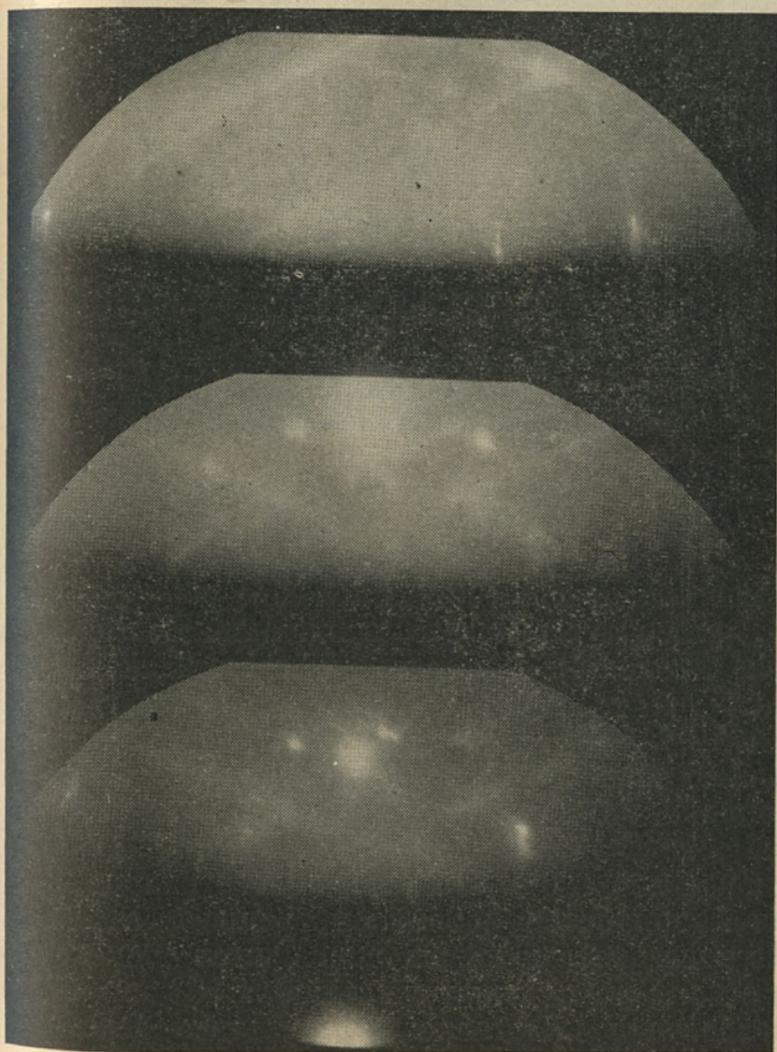


Рис. 2-16. Электронограммы поверхности обра...
Справа — продолжительн...

абразива и обнажает монокристалльный микрорельеф кварца.

Представляют интерес результаты изучения кинетики явлений в структуре поверхностного слоя при воздействии химических реагентов и температуры. Поверхность кварца подвергали травлению в 5%-ном растворе плавиковой кислоты «ч. д. а.» в течение 40 мин. После травления кристалл промывали в спирте, а затем просушивали обеспыленной струей воздуха. Размеры частиц, составляющих неровности протравленного кварца, колебались от величины менее 0,15 до 0,57 мкм, средние раз-



танного асимптотическими методами кварца.
полирования 4 ч; справа — 9 ч.

меры близки к 0,30 мкм. При увеличении продолжительности травления до 90 мин поверхность представляла собой рельеф с нечеткими контурами. Размеры частиц в этом случае колебались от 0,24 до 0,88 мкм; средние размеры частиц составляли 0,53 мкм.

Структуру полированной поверхности кварца изучали при нагреве его до температуры 550°С в течение

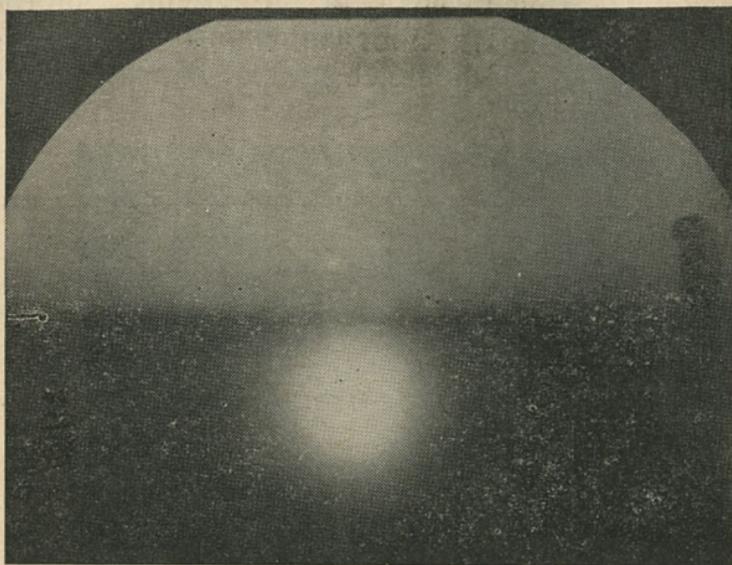


Рис. 2-17. Электронограмма поверхности шлифованного и протравленного кварца.

48—50 ч. Для предотвращения окисления образца при повышении температуры нагрев проводили в высоком вакууме при давлении в вакуумной системе порядка 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст. Образцы кварца имели форму бруска длиной 54,3 мм и сечением $7,8 \times 7,8$ см².

На рис. 2-18 приведен электронно-микроскопический снимок с реплики, которая снята с кварца, нагретого до температуры 550°С (электронное увеличение 11100^x, общее увеличение 48700^x). На поверхности кварца при температурной обработке появились трещины порядка 0,5 мкм. По-видимому, трещины появляются или в результате быстрого охлаждения кристалла с 550 до 400°С, или при нагревании кристалла в результате действия газовых включений, подходящих близко к поверхности.

По мере действия плавиковой кислоты постепенно обнажается ненарушенная монокристалльная структура

кварца, и добротность возрастает, постепенно приближаясь к некоторому максимальному значению, соответствующему чистой поверхности кристалла.

На рис. 2-19 приведена кривая зависимости добротности от времени травления 15%-ной плавиковой кислотой шлифованного и полированного кристалла. Как видно из рисунка, зависимость добротности от длительности травления подчи-



Рис. 2-18. Электронно-микроскопический снимок поверхности кварца, подвергнутого нагреванию до 550°C .

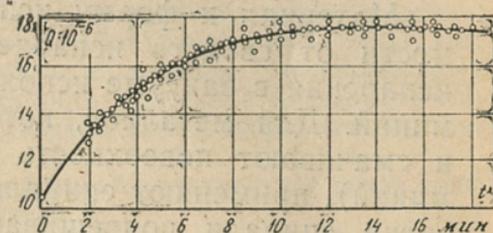


Рис. 2-19. Зависимость добротности от длительности травления кварца.

няется той же закономерности, которая была установлена при изучении процессов шлифования и полирования: добротность в процессе обработки асимптотически приближается к некоторому максимальному значению. Ход кривой позволяет установить оптимальную длительность каждого этапа как механической, так и химической обработки поверхности кварцевых элементов. Следует подчеркнуть, что результаты химической обработки зависят от предшествующей механической обработки.

2-3. Процессы металлизации и их влияние на параметры и характеристики резонаторов

Свойства тонких пленок и условия их получения. Для напыления тонких металлических пленок на поверхность кристалла кварца используют испарение металла в вакууме. При давлении 10^{-4} — 10^{-5} мм. рт. ст.

в вакуумной системе металлы в результате нагревания испаряются с последующей конденсацией паров на поверхности. Расстояние между источником испарения и поверхностью конденсации должно быть меньше свободного пути пробега атомов испаряемого металла. Если это условие не соблюдается, то возможно столкновение атомов с последующим образованием пленок низкого качества вследствие осаждения частиц, превышающих размеры атомов.

Существуют различные способы нагрева металла до температуры испарения в вакууме, но обычно применяют нагрев в испарителях. Для того чтобы металл хорошо испарялся с проволочных испарителей, он должен смачивать их и обладать достаточным давлением паров для испарения при температуре, которая ниже температуры плавления материала испарителя.

Материал и форму испарителя выбирают в зависимости от свойств испаряемого металла. Обычно для испарения в вакууме используют золото, серебро и алюминий. Для металлов, которые до испарения плавятся и смачивают поверхность испарителя (например, алюминий), применяют спирали из вольфрама. При этом на витки спирали подвешивают навески из испаряемого металла. Для напыления серебра и меди применяют испарители из молибдена, который лучше смачивается этими металлами, чем вольфрам.

Скорость испарения зависит от давления паров в вакуумной системе: чем меньше давление, тем больше скорость испарения. С уменьшением давления снижается окисление, и испарение происходит при меньшей температуре. Скорость испарения зависит также от поверхности испарителя.

Структура конденсированных пленок изучалась при помощи электронного микроскопа. Пленки состоят из агломератов, образованных вследствие миграции атомов под действием поверхностных сил, возникающих при конденсации атомов на поверхности кристалла. Такая структура пленок обуславливает особые физико-химические свойства. Так, например, электрическое сопротивление конденсированных пленок больше, чем у массивного металла.

Тонкие металлические пленки, образующиеся при испарении металла в вакууме, характеризуют их толщиной, однородностью, непрерывностью, твердостью, ста-

бильностью, характером поверхности, а также сцеплением с покрываемой поверхностью. Качество пленок зависит также от времени испарения, температуры испарителя, количества газовыделений в вакуумной системе, скорости откачивания, формы и расположения кристаллов по отношению к испарителю, степени очистки и обработки поверхности, адгезии пленки к поверхности конденсации и термообработки.

Тщательная предварительная очистка поверхности конденсации является непременным условием получения пленок высокого качества. Для удаления слоя адсорбированных частиц после химической обработки применяют очистку в вакууме бомбардировкой поверхности кварца ионами при слабом электрическом разряде или прогреванием до высокой температуры в высоком вакууме.

При ионной очистке используют следующий режим разряда: сила тока — 50—100 *ма*, напряжение — 2 000 *в*, время — 5—30 *мин*. Ионная бомбардировка производится с помощью трансформатора высокого напряжения, зажимы которого тщательно изолируют, чтобы предотвратить проникновение разряда внутрь диффузионного насоса.

Толщина пленки определяется временем испарения и силой тока, используемого для нагрева испарителя.

Твердость конденсированной пленки зависит от температуры испарителя: чем выше температура, тем больше твердость пленки.

В процессе получения металлических пленок в вакуумной системе выделяются газ и пары. Если их не удалить полностью, то они попадут под пленку, что приводит к плохому сцеплению пленки с кристаллом. При большой скорости газовой выделении решающим фактором является скорость откачивания до равновесного давления 10^{-4} *мм рт. ст.*

Высоковакуумная установка для напыления тонких пленок металла на поверхность кварца должна обеспечить большую скорость откачивания, отсутствие или минимум обратного потока паров масла механического и диффузионного насосов, ионную очистку и нагрев образца.

При нанесении однородной пленки конструкцию держателя и положение испарителя выбирают в зависимости от геометрии образца. Образцы укрепляют на сферическом держателе. Испаритель располагают вблизи центра радиуса кривизны. Для получения однородной

пленки на больших плоских поверхностях одного испарителя недостаточно. Хорошие результаты дает применение кругового испарителя, радиус которого равен радиусу образца, а расстояние от испарителя до поверхности конденсации также равно его радиусу. В других случаях для получения однородной пленки увеличивают число испарителей или используют вращение образца, на который наносится тонкая металлическая пленка.

Сцепление пленки с поверхностью кристалла. Прочность пленки определяется расстоянием между атомами осаждающегося металла и атомами кристалла. Однако при самом прочном прилипании металлической пленки к подложке она удаляется с поверхности без разрушения кристалла. Это объясняется характером взаимодействия полированной поверхности кварца с парами металла, при котором происходит конденсация паров в пограничном слое кварц — металл с сохранением их индивидуальных свойств.

Образование пленки на кристалле подчиняется закону, согласно которому свободная энергия системы при образовании равновесного зародыша жидкой фазы (в соответствии с уравнением Гиббса) зависит от квадрата радиуса кривизны равновесной капли, краевого угла смачивания капли на поверхности раздела и поверхностного натяжения системы капля — насыщенный пар — поверхность раздела.

С уменьшением краевого угла работа образования капли уменьшается, а при полном смачивании она равна нулю, т. е. капля полностью растечется по поверхности кристалла. С увеличением коэффициента сухого трения краевой угол смачивания уменьшается, что приводит к росту смачиваемости поверхности.

Таким образом, для получения металлической пленки высокого качества непосредственно перед металлизацией необходимо проводить предельную очистку поверхности кварца, добиваясь максимальной величины коэффициента сухого трения.

Поверхность раздела двух фаз оказывает на процесс кристаллизации тем большее влияние, чем меньше коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела между подложкой и зарождающейся фазой. Величина этого коэффициента определяется взаимным расположением атомов двух кристаллических тел. Если расположение атомов на границе раздела, у которой

возникает кристаллический зародыш, то же, что и на соприкасающейся с ним грани этого зародыша, и расстояния между атомами по обе стороны от поверхности раздела равны, то коэффициент поверхностного натяжения весьма мал (в особенности, если совпадает валентность ионов). При этом малы размеры кристаллического зародыша, который должен иметь плоскую форму. При малой величине коэффициента поверхностного натяжения кристаллизующаяся пленка металла смачивает поверхность кристалла, на котором возникает зародыш; он может представлять собой одноатомный слой. Образующаяся кристаллическая пленка как бы продолжает в процессе своего роста кристалл кварца, на котором она возникает и развивается.

Ориентированная кристаллизация из жидкой фазы происходит на анизотропной подложке, например на кварце, и при неполном совпадении структур кристаллов, если в них имеются «сопрягающиеся» атомные комплексы.

Для получения пленки высокого качества большое значение имеет число центров кристаллизации, которое в основном зависит от температуры подложки.

Проводимость серебра и золота, конденсированных на стекле при температуре 20°C , появляется при толщине слоя 5 *мкм*, а конденсированных при температуре 200°C — при 18 *мкм* [Л. 2-24]. Эти данные подтверждаются работой [Л. 2-25], где показано, что при температуре подложки 575°C атомы серебра на ней не конденсируются.

На практике металлические пленки наносят на поверхность кварца при температурах 20 — 200°C ; оптимальное значение температуры, при которой образуются пленки наивысшего качества, еще не установлено.

Термическая обработка пленок и влияние температуры на их структуру и электрические свойства. После конденсации металлических пленок на поверхности кварца их температура понижается, при этом возникают натяжения, в частности растяжение — сжатие. Поэтому получаемая система кварц — металлическая пленка нуждается в термической обработке. В работе [Л. 2-26] приведены данные для пленок толщиной $1\,000$ — $3\,000\text{ \AA}$ (табл. 2-1). При остывании конденсированных пленок из атомов золота ниже температуры 80°C возникают натяжения порядка $850\text{ кг}\cdot\text{см}^{-2}$, а в пленках из атомов серебра — порядка $750\text{ кг}\cdot\text{см}^{-2}$. Существование внутренних натяжений как в металлических пленках, так и на границе пленка — кристалл приводит к ухудшению их стабильности во времени, что проявляется в старении кварцевых резонаторов,

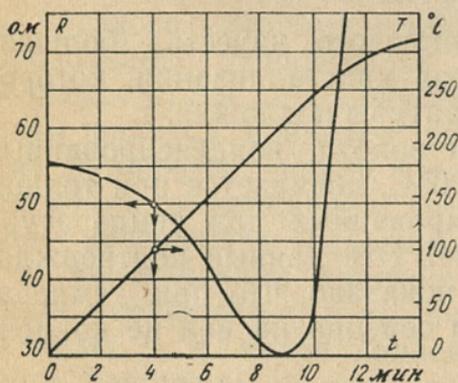
Некоторые физические свойства золота и серебра [Л. 2-26]

Металл	Температура плавления, °С	Температура рекристаллизации, °С	Коэффициент линейного расширения, $\times 10^6$	Область температур, в которой возникают натяжения	(Модуль Юнга) $E \cdot 10^{-11}$, дин/см ²	Среднее натяжение, кг/см ²	
						наблюдаемое	вычисленное
Au	1 063	200	14	80	8	850	900
Ag	960	200	19	80	8	750	1 200

Отметим, что если конденсирование металлических пленок происходит при температуре 20° С, то натяжения, возникающие в пленках при температурах 20—80° С, можно снять температурной обработкой в вакуумной печи при температурах ~200° С с последующим медленным охлаждением. Дальнейшее повышение температуры приводит к возникновению в пленках серебра рекристаллизации (225° С),

т. е. к укрупнению кристаллитных зерен серебра. Это обуславливает уменьшение поверхности сцепления металлической пленки с кристаллом, а следовательно, уменьшение прочности и ухудшение однородности и электропроводности (при определенных толщинах пленки). Электроды, образуемые напылением в вакууме атомов серебра на поверхность кварца, после термической обработки при 300° С становятся практически весьма прочными.

Рис. 2-20. Зависимость сопротивления пленок от времени старения.



Натяжения, возникающие в пленках, в особенности на границе кварц—пленка, приводят к отслаиванию их от полированной поверхности кристалла. Обычно отслаивание наблюдается при многослойном напылении электродов из серебра. Оно возникает у краев металлических электродов и усиливается с каждым последующим напылением. По-видимому, лучшим способом, свободным от указанных недостатков, является однократное напыление металла при температуре подложки 200° С с последующей подстройкой частоты в тех же условиях вакуума, т. е. процесс должен быть непрерывным. Однако достаточно точная подстройка частоты кварцевых элементов в настоящее время не может быть проведена, так как на технологический процесс влияют самые различные факторы, учесть которые очень трудно.

Толщина пленок, используемых в качестве электродов, составляет 600—5 000 Å, а точность при металлизации $\pm 10 \text{ \AA}$ и более.

В специальных случаях интервал толщин пленки расширяется, а интервал точности сужается. Толщину электрода и его геометрию, в частности диаметр и отводы металлической пленки, подбирают эмпирически, стремясь получить наилучшие эквивалентные, температурно-частотные и спектральные характеристики. Один из основных параметров тонких пленок — долговременная стабильность — зависит в основном от технологического режима их получения (высокий вакуум без содержания «загрязняющих» паров, соответствующая температура образца, его подготовка непосредственно перед металлизацией и т. п.) и последующего искусственного старения. Нагревание в вакууме пленок, нанесенных на стеклянную подложку при температуре выше 200°C , при которой происходит рекристаллизация, приводит к повышению их сопротивления (рис. 2-20 и табл. 2-1).

Данные об изменении электрического сопротивления пленки во времени позволяют судить о величине старения. Старение пленок, полученных испарением серебра в вакууме с конденсацией паров на стеклянной подложке при температуре 20°C , при нагревании их до 250°C приближается к старению монокристаллического образца серебра. С повышением температуры старение образца скачкообразно ускоряется.

Как было указано выше, уменьшение проводимости в результате нагревания пленок выше температуры рекристаллизации обусловлено ростом изолированных кристаллов, что приводит к укрупнению зерен структуры пленки и появлению разрывов сплошности.

При исследовании зависимости сопротивления пленок из золота от частоты оказалось, что с повышением частоты сопротивление однородной пленки изменяется меньше, чем неоднородной (рис. 2-21).

Термическая обработка тонких металлических пленок для стабилизации их физических и электрических свойств должна проводиться с соблюдением требований строгой вакуумной гигиены при давлении $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и менее, так как нагревание в воздухе приводит к возрастанию электрического сопротивления пленок вследствие абсорбции кислорода (рис. 2-22).

Вакуумная система и очистка поверхности кварца перед металлизацией. Из приведенных выше данных о характере сцепления металлической пленки с поверхностью кристалла следует, что очистка подложки должна осуществляться таким способом, который обеспечивает получение максимального коэффициента сухого трения (коэффициент сухого трения пропорционален силе сцепления пленки с поверхностью кристалла). Большую роль играют конструкция вакуумной системы, состав атмосферы вакуумной камеры, а также адсорбция газов и паров на поверхности кварца при его нагревании.

Обычно вакуумная система, применяемая для металлизации поверхностей кварцевых элементов, состоит из механического и диф-

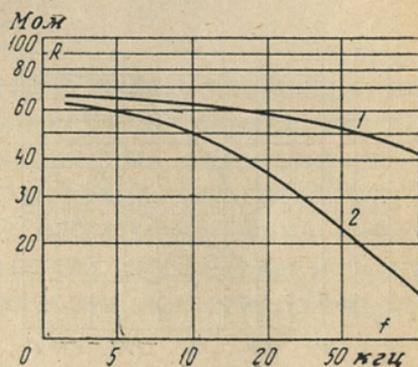


Рис. 2-21. Зависимость сопротивления золотой пленки от частоты.

1 — однородная пленка; 2 — неоднородная пленка.

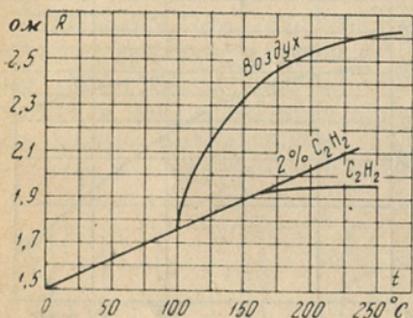
фузионного насосов, создающих давление 10^{-3} — 10^{-4} и 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст. соответственно, и ловушки, охлаждаемой водой, или полупроводниковой ловушки. Ловушки ставят между вакуумной камерой, в которой происходит напыление металлических пленок, и диффузионным насосом. В таких системах при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. присутствуют молекулы воздуха, воды, органических соединений, а иногда и пары масла.

Пары масла, образующиеся при работе диффузионного и механического насосов, оказывают отрицательное влияние на процессы металлизации.

Воздействие ионной очистки на подложку из стекла, которая подвергалась нагреванию, уменьшает коэффициент сухого трения при образовании на поверхности пластины масляной пленки. Образование этой пленки объясняется следующим образом. Пары масла, как известно, состоят из молекул сложного химического состава. Попадая на горячую подложку, они разлагаются на ней, образуя весьма прочное химическое соединение с поверхностью. Этот процесс протекает при нагревании образца от 50 до 300° С. Молекулы различных газов и паров, снижающие активность образования масляной пленки, удаляются при ионной очистке.

Наблюдались случаи появления масляной пленки на поверхности кварца, что приводило к уменьшению добротности при его на-

Рис. 2-22. Зависимость сопротивления пленок серебра от температуры и среды.



гревании и без ионной бомбардировки. Для предотвращения появления масляной пленки на поверхности кварца перед металлизацией применяют специальные вакуумные системы, в которых откачка воздуха из-под колпака производится с помощью ртутных насосов, причём для вымораживания молекул воздуха используют высокоэффективные ловушки, наполненные жидким азотом. Давление в рабочем объеме (под колпаком) вакуумной системы должно быть не более $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., так как в течение 1 сек на поверхности кварца при таком давлении адсорбируется одноатомный слой остаточных газов.

Если скорость испарения металла меньше, чем $300 \text{ \AA} \cdot \text{сек}^{-1}$, то основным источником загрязнения тонких пленок являются молекулы адсорбированного слоя. Поскольку при нанесении пленки на поверхность кварца скорость испарения металла составляет 100 — $140 \text{ \AA} \cdot \text{сек}^{-1}$, влияние молекул адсорбированных газов весьма существенно.

Зависимость коэффициента сухого трения от температуры стеклянной подложки изучалась в работе [Л. 2-25] при выборе оптимального режима ионной очистки. В результате нагрева подложки при одновременном действии газового разряда коэффициент сухого трения резко падает. Нагрев пластин, имеющих полированную поверхность, в газовом разряде (при температурах свыше 40° С) приводит

к резкому ухудшению сцепления пленки серебра с поверхностью твердого тела.

Однако и без нагревания подложки ионная очистка позволяет получить весьма большой коэффициент сухого трения. Так, удалось получить коэффициент трения по стеклу 1,027 и по кварцу 0,873. Эффективное действие ионной очистки в данном случае может быть объяснено тем, что в газовом разряде происходит разложение углеводородов и паров масла и воды при одновременной реакции соединения углерода с водородом воды и воздуха, т. е. образование CO и H_2 с последующей откачкой их насосами.

В высоковакуумной системе (остаточное давление 10^{-7} — 10^{-8} мм рт. ст.) не удается получить коэффициент сухого трения по стеклу при его нагревании, такой, как в обычной вакуумной системе, путем очистки поверхности стекла бомбардировкой ионами [Л. 2-26].

Способы улучшения параметров и характеристик металлизированных кварцевых элементов. Эквивалентные параметры и характеристики кварцевых резонаторов во многом определяются выбором металла для электродов, их качеством, натяжениями, методом подстройки частоты, режимом термической обработки, проведением предварительной подготовки поверхности кристалла перед металлизацией и т. д.

Для нанесения электродов на поверхность кварца применяют преимущественно золото, серебро, никель, иногда — алюминий. В вакууме предварительная очистка и обезгаживание проводятся в ограниченной степени. Образующаяся при вторичной металлизации пленка электрода получается пористой, частично окисляется и способна адсорбировать значительное количество молекул газа и паров. Именно поэтому для вторичной металлизации используют золото, которое мало восприимчиво к загрязнению.

Однако в некоторых случаях золото вызывает ухудшение характеристик кварцевых элементов. Так, например, резонаторы, кварцевые элементы которых покрыты золотом, на высоких частотах и гармониках оказываются весьма чувствительными к уровню возбуждения. В связи с этим для вторичного покрытия электродов высокочастотных резонаторов некоторые авторы рекомендуют применять серебро.

Однако при нанесении на поверхность кварцевого элемента золотой однослойной пленки в вакууме резонаторы приобретают исключительно высокую долговременную стабильность, достигающую $1 \cdot 10^{-9}$ в сутки.

Кроме того, золото легко испаряется, обладает хорошей электропроводностью, высокой сопротивляемостью по отношению к химическим воздействиям.

При нанесении металлической пленки должно быть обеспечено строгое соблюдение чистоты на всех без исключения стадиях технологического процесса.

Для высококачественного напыления тонких металлических пленок на поверхность кварца целесообразно использовать вакуумную систему с безмасляными соле-ноидными кранами и ловушками, вымораживающими загрязнения при температурах жидкого азота. С целью получения равномерного распределения металла по поверхности кварца испарение в высоком вакууме проводилось А. Уорнером из восьми небольших вольфрамовых нагревателей одновременно на обе стороны кристалла. Толщина электрода составляла около 800 \AA . После приварки стеклянного баллона к основанию резонатор припаивали к вакуумной установке и в течение 6 ч производили непрерывную откачку при температуре 140°C . Затем после вакуум-температурной выдержки при давлении порядка $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ производили отпайку штенгеля микрогорелкой.

Прецизионные кварцевые резонаторы, полученные таким образом, имеют добротность $4-5 \cdot 10^6$ и старение порядка $1 \cdot 10^{-9}$ и менее за месяц.

В некоторых работах указывается, что старение металлизированных кварцевых резонаторов в основном вызывается уменьшением натяжения на границе кварц — металлическая пленка из-за температурных изменений и переносом массы металла. Воздействие этих факторов носит противоположный характер, и в некоторых конструкциях резонаторов они скомпенсированы почти полностью. Поэтому очистка кварцевых резонаторов высокотемпературным отжигом в процессе изготовления должна приводить к снижению долговременной стабильности, поскольку при этом увеличиваются натяжения и уменьшается перенос массы металла. Нам представляется, что этот вопрос нуждается в дополнительном изучении.

Одной из основных задач при создании прецизионных кварцевых резонаторов является уменьшение давления газа внутри вакуумного баллона, в который помещен резонатор. Эту задачу можно решить, используя технологические приемы и методы очистки, применяемые в электровакуумной и транзисторной промышленности. Однако этому мешает недостаточное качество крепления токоотводов — пластин к кристаллу, которые при соответствующих высоких температурах отплавляются, если не используется термокомпрессионная сварка.

Технологический процесс металлизации кварца. Добротность и долговременная стабильность резонаторов, на кварцевые элементы которых в высоком вакууме напыляется тонкая металлическая пленка, в существенной мере определяются технологией процесса металлизации. По существу весь технологический процесс производства различных кварцевых резонаторов, в частности и процесс металлизации, должен быть аналогичен технологическому процессу производства «холодных» электровакуумных приборов, т. е. протекать в условиях вакуумной гигиены.

Особое внимание необходимо уделять обезгаживанию кварцевого элемента, металлических и диэлектрических деталей резонатора в высоком вакууме, выбирая соответствующие оптимальные температуры. Материалы, помещенные в вакуум, выделяют различные газы до тех пор, пока не наступает динамическое равновесие процессов адсорбции и десорбции. Если материалы поместить в замкнутый объем, в котором давление, например, порядка 10^{-2} мм рт. ст., то вследствие выделения газов давление повысится. С повышением давления в вакуумном стеклянном баллоне, в котором находится кварцевый резонатор, его добротность уменьшается и наблюдается систематический сдвиг частоты резонатора, который может быть отождествлен со старением [Л. 2-27]. При определенном давлении (и напряжении на кварце) возникает электрический пробой в газовой среде, который иногда носит периодический характер и сопровождается вспышками («ионизационные толчки»).

Таким образом, из-за повышения давления в вакуумном баллоне резонатора не только ухудшаются его основные свойства, но и резко ухудшается надежность, а следовательно, и срок работы. Поэтому необходимо проводить весьма тщательное обезгаживание всех без исключения элементов и деталей, входящих в кварцевый резонатор, соблюдая оптимальные условия (давление в вакуумной системе, температура и т. д.).

Одновременно с обезгаживанием должна проводиться термическая обработка каждой из входящих в резонатор деталей для снятия напряжений, возникающих при их механической обработке. Эту операцию нельзя проводить на полностью смонтированном резонаторе,

так как многие детали необходимо нагревать до температуры, превышающей 200°C , при которой кварцевый элемент отходит от опор держателя вследствие плавления припоя. Это подчеркивает необходимость применения технологии термокомпрессионной сварки, позволяющей производить нагрев до 400°C и выше.

Свойства обезгаженных деталей кварцевого резонатора должны сохраняться на протяжении всего технологического процесса металлизации поверхности кристалла. Межоперационное хранение поэтому проводится при давлении того же порядка, что и давление в вакуумном баллоне в эксплуатационных условиях, т. е. при 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. Хранение и транспортирование должны осуществляться в вакуумных ампулах или в вакуумных термостатах¹.

Перед напылением металлической пленки на поверхность кристалла необходимы тщательное химическое травление и очистка.

Монтаж кварцевого элемента в кристаллодержателе должен проводиться в герметической камере, в которую поддувается нейтральный осушенный газ, например азот. Сборку следует осуществлять со строжайшим соблюдением условий гигиены. Однако этот способ монтажа все же имеет существенный недостаток: при сварке ножки, на которой смонтирован кварцевый резонатор с баллоном, резонатор соприкасается с воздухом, и его детали адсорбируют частицы газов. В связи с этим представляет интерес возможность металлизации кварцевых элементов, закрепляемых в кристаллодержателе без последующего вынесения их в атмосферу воздуха [Л. 2-27]. При этом обезгаживание, термическая обработка, ионная очистка, нагрев подложки, металлизация, подстройка частоты и искусственное старение проводятся в высоком вакууме за один цикл, что приводит к отсутствию загрязнений и позволяет соблюдать требования вакуумной гигиены на всех без исключения операциях.

Обычно высоковакуумная система с форвакуумным и диффузионным насосами, в которой для вымораживания паров используются ловушки с жидким азотом, дает возможность получать в объеме, где происходит метал-

¹ Вакуумная гигиена должна быть обеспечена на всех без исключения операциях технологического процесса.

лизация, достаточно низкое давление (порядка 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.) (рис. 2-23).

Подготовка поверхности кварца непосредственно перед металлизацией — нагревание кристалла и ионная очистка поверхности — должны проводиться последовательно, причем сначала ионная очистка, а затем нагревание кристалла.

Повышая энергию ионов определенных газов, содержащихся в воздухе, можно обеспечить отрыв слабо

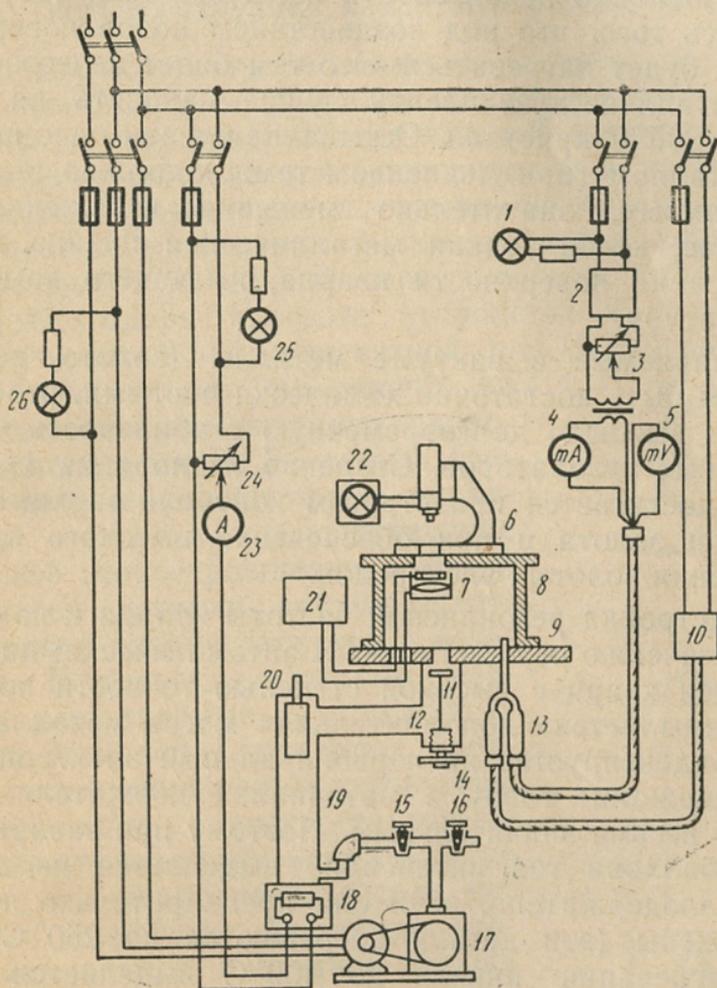


Рис. 2-23. Схема высоковакуумной установки.

1, 25, 26 — сигнальные лампы; 2, 4, 5 — ионизационный манометр; 3, 24 — автотрансформаторы; 6 — вакуумно-температурный микроскоп; 7 — кварцевый резонатор; 8 — металлический вакуумный колпак; 9 — вакуумная плита; 10 — термометрический манометр; 11, 12, 14 — вакуумный затвор; 13 — радиометрические лампы; 15, 16 — краны; 17 — форвакуумный насос; 18 — подогреватель диффузионного насоса; 19 — диффузионный масляный насос; 20 — азотная ловушка; 21 — автоматический измеритель добротности и частоты с цифрпечатающей машиной; 22 — осветитель; 23 — амперметр.

связанных частиц кварца и адсорбированных частиц. Воздействие ионов малых энергий приводит к удалению с поверхности адсорбируемых молекул воды, масла и углеводородов, входящих в состав атмосферы высоковакуумной установки с форвакуумным и диффузионным насосами. При проведении металлизации в высоковакуумной системе, откачка в которой производится с помощью ртутных насосов с безмасляными соленоидными кранами, указанные выше процессы не имеют места, поэтому можно использовать ионы больших энергий, не опасаясь того, что под воздействием ионов поверхность кварца будет нагреваться. Это тем более целесообразно, что металлическую пленку лучше наносить на нагретый до 200°C кристалл. Остывание пленки одновременно с кристаллом (при медленном темпе) должно вызывать, по-видимому, значительно меньшие натяжения, чем в случае, когда тонкая металлическая пленка конденсируется на поверхности кварца, имеющего комнатную температуру.

Испаряемые в вакууме металлы (золото, серебро) должны быть достаточно химически чистыми, чтобы обеспечить высокую долговременную стабильность частоты кварцевых резонаторов. Старение их порядка $1 \cdot 10^{-9}$ за месяц достигается при строгом контроле за химической чистотой золота и при обеспечении высокого качества напыления золотых электродов.

Подстройка резонансной частоты кварца к номинальному значению осуществляется автоматически; на колеблющийся кварц с высокой степенью точности по частоте «подпыляется» дополнительная масса металла, который конденсируется на первоначальный электрод.

Содержание газов в материалах держателя иногда бывает весьма значительным. Поэтому при заварке ножки и баллона газ интенсивно выделяется из деталей кристаллодержателя, если они предварительно не были обезгажены (эти детали нагреваются до 250°C). Так, при нагревании никеля до 400°C выделяется около $1,8 \text{ л} \cdot \text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$. В результате заварки вакуумного баллона возникает сдвиг резонансной частоты кварцевого резонатора, и еще не установлен оптимальный режим, при котором изменение частоты было бы минимальным.

При давлении порядка 10^{-6} — 10^{-7} мм. рт. ст. проводится вакуум-выдержка (обезгаживание, термическая

обработка, искусственное старение кварца и напряженных элементов конструкции) в течение 8—14 ч, а затем готовые резонаторы отпаиваются от вакуумной установки при помощи микрогорелки.

Глава третья

Конструирование кварцевых резонаторов

3-1. Типы конструкций кварцевых резонаторов

По конструктивному выполнению, точнее, по материалам, используемым для изготовления наружных кожухов (баллонов) кристаллодержателей, кварцевые резонаторы, выпускаемые промышленностью в настоящее время, можно разделить на четыре основных класса. Это, во-первых, резонаторы в пластмассовых корпусах, разработанные в начальный период производства резонаторов; благодаря простоте устройства и связанной с этим относительной дешевизной они и сейчас еще широко применяются во многих не очень ответственных изделиях радио- и электронной техники. Во-вторых, герметизированные резонаторы в металлических корпусах, переживающие теперь свое второе рождение в связи с развитием техники вакуумноплотной холодной сварки кожухов с основаниями. В-третьих, вакуумные резонаторы, выполняемые в стеклянных баллонах. Наконец, в-четвертых, керамические влагозащищенные резонаторы различных видов, в частности микроплаты для этажерочных модулей; надо заметить, что, несмотря на весьма интенсивные разработки элементов этажерочных модулей, последние отнюдь еще не нашли столь широкого применения в радиоэлектронике, как этого ожидали ранее; поэтому производство резонаторов-микроплат в промышленных масштабах еще не организовано.

Кварцевые резонаторы в пластмассовых корпусах, выпускаемые в СССР,

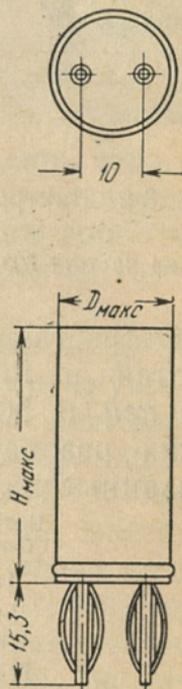


Рис. 3-1. Внешний вид и габариты резонатора в пластмассовом корпусе.

по своим внешним формам и габаритам отличаются от тех, которые предусмотрены нормализационными документами Международной электротехнической комиссии [Л. 3-1]. Это вызвано причинами исторического характера, а поскольку рассматриваемые резонаторы ныне являются малоперспективными, нет смысла изменять существующее положение.

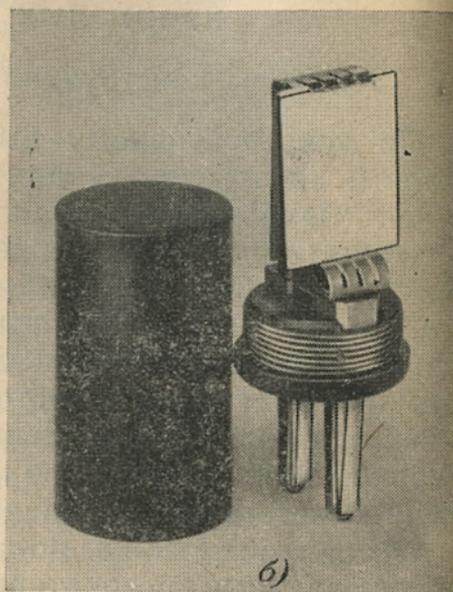
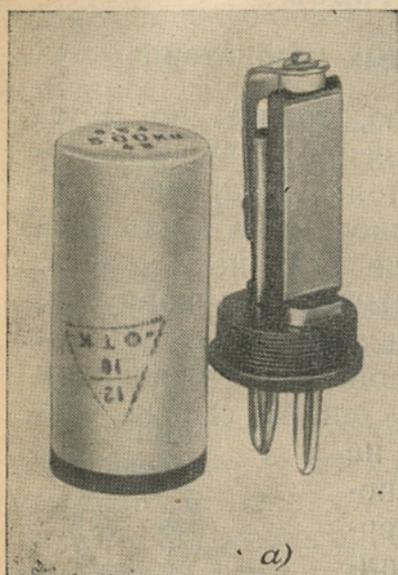


Рис. 3-2. Внутреннее устройство высокочастотных кварцевых резонаторов в пластмассовом корпусе.

а — на частоту 500 кГц с пластиной АТ-среза; *б* — на частоту 5 МГц с пластиной ВТ-среза.

Отечественные пластмассовые резонаторы изготавливаются в цилиндрических корпусах на частоты 10—300 кГц и 500—16 000 кГц. Внешний вид и габариты таких резонаторов показаны на рис. 3-1. Приведем указанные на этом рисунке значения $H_{\text{макс}}$ и $D_{\text{макс}}$:

Частоты колебаний, кГц	$H_{\text{макс}}$, мм	$D_{\text{макс}}$, мм
10—50	76,5	25
50—100	65	25
100—300	58	25
500—2 000	50	22,5
2 000—16 000	40	20

Примеры выполнения внутренней конструкции резонаторов с пьезоэлементами, совершающими колебания сдвига по толщине, приведены на рис. 3-2.

В таких резонаторах на частотах свыше 500 кгц используются прямоугольные пластины срезов АТ и ВТ, длина которых совпадает по направлению с электрической осью кристалла X. На торцевых гранях пластин выполняются фаски, хорошо видные на приводимых фотоснимках, с помощью которых создается острый край, совпадающий с нейтральной линией при толщинных колебаниях и используемый для закрепления пьезоэлементов в пружинных зажимах. Длина пьезоэлемента подбирается таким образом, чтобы при изменении силы

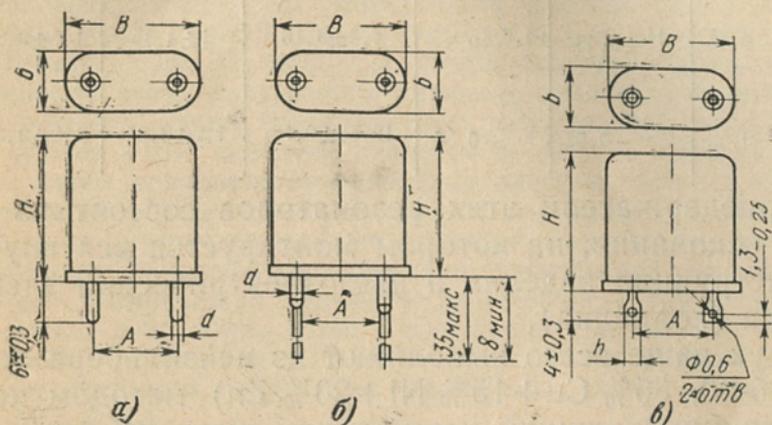


Рис. 3-3. Внешний вид резонаторов видов М1 и Б1 (а), М2 и Б2 (б), М3 и Б3 (в). (Размеры указаны в табл. 3-1).

зжатия в пружинах частота колебаний резонатора не изменялась; критерием правильности выбора ширины пластины является постоянство динамического сопротивления кварца в достаточно широком интервале температур.

Герметизированные кварцевые резонаторы в металлическом корпусе изготавливаются в СССР преимущественно на частоты свыше 750 кгц. В этом диапазоне (вплоть до 100 Мгц) их внешний вид, габаритные и установочные размеры определяются ГОСТ 6503-67 «Резонаторы кварцевые герметизированные на частоты колебаний от 0,75 до 100 Мгц». Согласно этому стандарту резонаторы рассматриваемого класса должны выпускаться следующих типов: М — миниатюрные, на диапазон от 5 до 100 Мгц; Б — малогабаритные, на весь диапазон частот, охватываемых ГОСТ, они могут выполняться с жесткими выводами для вставки в панель (рис. 3-3,а), с мягкими выводами для непосредственной припайки в схеме (рис. 3-3,б) и с жесткими луже-

ными выводами для подпайки к ним монтажных проводов (рис. 3-3,в). В табл. 3-1 даются основные размеры резонаторов, приведенных на рис. 3-3.

Таблица 3-1

Основные размеры (мм) резонаторов типов М и Б

Резонатор	H	B	b	A	d	h	Вес, г (не более)
М1	13,5 $_{-0,43}$	11 $_{-0,43}$	4,6 $_{-0,3}$	4,9 $\pm 0,15$	1 $\pm 0,05$	1,5 $\pm 0,3$	2
М2							
М3							
Б1	19,7 $_{-0,52}$	19,2 $_{-0,52}$	8,9 $_{-0,36}$	12,35 $\pm 0,15$	1,2 $\pm 0,05$	1,8 $\pm 0,3$	6
Б2							
Б3							

Кварцедержатели этих резонаторов состоят из двух частей: основания, на котором монтируется вся внутренняя конструкция изделия и пьезоэлектрический элемент, и кожуха (колпачка).

Кожух чаще всего выполняют из нейзильбера (сплав МНЦ 15-20, 65% Cu+15% Ni+20% Zn) методом холодной вытяжки; толщину кожуха при вытяжке стараются довести до минимума, во всяком случае нежелательно, чтобы она превышала 0,3 мм.

Материалом для изготовления основания обычно служит ковар (сплав Н29К18); достоинством этого сплава является то, что его коэффициент термического расширения близок к коэффициенту термического расшире-

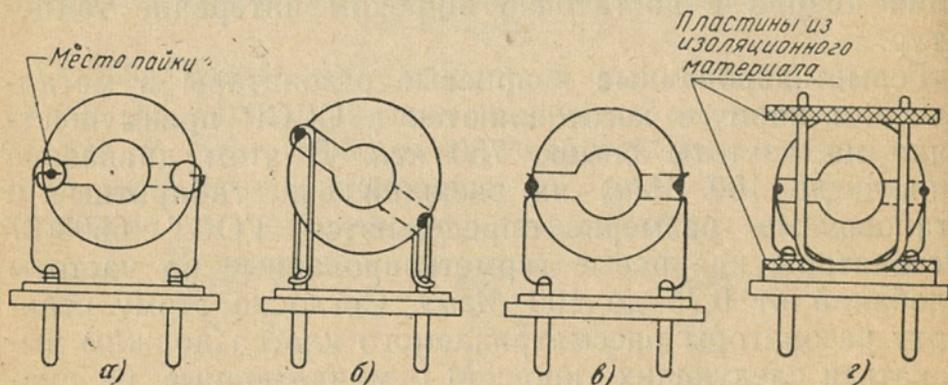


Рис. 3-4. Типы конструкций кварцедержателей высокочастотных герметизированных резонаторов.

а — спиральные пружинные зажимы, применяются для монтажа плоских пластин; *б* — П-образные проволочные стойки, применяются для монтажа линз на частоты не ниже 1 Мгц и плоских пластин в резонаторах типа Б; в ленточный держатель, применяется для монтажа линз на частоты не ниже 2,5 Мгц и плоских пластин; *г* — держатель с механическим зажатием пьезоэлемента, применяется для монтажа линз на частоты не ниже 1 Мгц.

ния стекол С-49-1 (ЗС-5Na) и С-49-2 (ЗС-5K), которые используются для изоляции наружных выводов резонатора, впекаемых в основание кварцедержателя.

Внутренняя конструкция резонатора выполняется в разных вариантах. В частности, крепление кварцевой пластины (при толстых колебаниях) нередко осуществляют с помощью двух спиральных пружинных зажимов (рис. 3-4,а) из бронзовой или стальной проволоки диаметром от 0,15 мм (преимущественно для стали) до 0,3 мм (фосфористая бронза типа бронзы БрОФ). Применяются и более «жесткие» держатели. Последние представляют собой либо пару равновысоких стоек из относительно жесткой никелевой проволоки диаметром 0,4—0,5 мм, согнутой в виде прямоугольного параллелограмма, одна из коротких сторон которого приваривается к внутреннему вводу контактного штырька, либо пару отрезков никелевых ленточек, также привариваемых к внутренней части штырька; на другом конце ленточки делается прорезь, в которую вставляется и затем припаявается кварцевая пластина (рис. 3-4,б и в).

Монтаж кварцевых элементов на частоты ниже ~ 1 МГц в держателях всех рассмотренных конструкций недопустим, поскольку такие элементы обладают уже довольно значительной массой; вследствие этого механическая прочность их крепления «на весу», с помощью одной лишь пары паяных соединений, на которые ложится вся нагрузка, недостаточна. В подобных случаях прибегают к закреплению кристалла с помощью специальных распорок (например, как на рис. 3-4,г).

Основание кварцедержателя соединяется с кожухом обычно путем пайки мягким припоем. По давней традиции для этой цели используется эвтектический оловянно-свинцовый припой ПОС-61. Поскольку при пайке для повышения прочности шва должно обеспечиваться затекание припоя между соединяемыми деталями под действием капиллярных сил, в конструкции рассматриваемого соединения предусматривается соответствующий зазор, величина которого должна быть около 0,1 мм. Если (как это обычно бывает) пайка осуществляется после предварительного облуживания соединяемых поверхностей кожуха и основания, то этот зазор может быть значительно меньшим. Во всех случаях зазор не должен превышать 0,25 мм, поскольку иначе капиллярные силы, обеспечивающие заполнение его припоем, не проявляются.

Предварительное покрытие тонким слоем припоя участков, подлежащих спаиванию, производится для того, чтобы свести до минимума вероятность попадания паров флюса, используемого для очистки этих участков, внутрь резонатора. Поэтому сам процесс пайки желательнее вести в вакууме или в инертной среде. Для обеспечения возможности свободного выхода газа из внутреннего объема резонатора в процессе пайки (если его герметизация производится не в вакууме), а также для последующего заполнения этого объема, в кожухе резонатора предварительно просверливают небольшое отверстие, которое запаивают уже по завершении всех других операций¹.

¹ Заполнение внутреннего объема резонатора, герметизация которого осуществляется мягкими припоями, каким-либо химическим малоактивным газом (азотом, лучше неоном или аргоном), а не его полная откачка необходимо потому, что мягкие припои не создают вакуумноплотного соединения.

Газонаполнение резонатора даже инертными газами полностью не устраняет взаимодействие кристалла (и тем более нанесенных на него электродов) с внешней средой. Поэтому все более жесткие требования, предъявляемые к необратимым изменениям параметров резонаторов с течением времени, обуславливают необходимость перехода к вакуумным конструкциям. Складываются два параллельных пути решения этой проблемы: один из них, исторически более ранний, — это переход к вакуумным стеклянным резонаторам, второй путь — попытки (как оказалось, весьма успешные) применить последние достижения транзисторной техники в области создания вакуумноплотных соединений методом холодной сварки металлических деталей.

Стеклянные вакуумные резонаторы появились уже в 20-х годах. Это были так называемые «светящиеся резонаторы», использовавшиеся не для стабилизации частоты, а скорее как точные индикаторы настройки радиочастотных генераторов. Они не были в строгом смысле слова вакуумными, поскольку для большей яркости свечения заполнялись смесью неона и гелия (под давлением в несколько миллиметров ртутного столба). Надо заметить, что и в настоящее время многие резонаторы заполняются гелием (примерно под тем же давлением: от 1 до 5 мм рт. ст.), но при этом преследуется другая цель: такое заполнение способствует лучшей теплопередаче от стенок баллона к кварцевому элементу, что очень важно при термостатировании резонатора. Гелий в данном случае выбирается потому, что его теплопроводность лишь на 15% меньше теплопроводности водорода, но обращение с ним в отличие от водорода безопасно.

Вакуумные кварцевые резонаторы в качестве компонент генераторов и фильтров начали применяться примерно с начала 40-х годов; во многих случаях, однако, их использование ограничивалось из-за того, что внешние размеры таких резонаторов сначала были чрезвычайно велики. Только в середине 50-х годов, когда были разработаны малогабаритные вакуумные резонаторы в баллонах радиоламп «пальчиковой» серии, их удельный вес в общем числе производимых кварцев начал быстро возрастать¹. К 1960 г. отечественной промышленностью были освоены и миниатюрные вакуумные резонаторы в габаритах радиоламп типа «дробь»². Именно

¹ В СССР первые образцы малогабаритных вакуумных резонаторов были выполнены З. Э. Хайкиным, М. И. Ярославским и П. Г. Поздняковым в 1955 г., а их промышленный выпуск начался с 1956 г.

² Первые образцы резонаторов этой разновидности были выполнены М. И. Ярославским и З. Э. Хайкиным при участии И. Г. Васина, П. Г. Позднякова и З. И. Кирсановой.

Эти модификации вакуумных резонаторов наиболее широко распространены в СССР, хотя наряду с ними продолжается еще выпуск резонаторов, относительно больших по современным представлениям габаритов (в баллонах радиоламп «октальной» серии). Габаритные и установочные размеры всех перечисленных типов резонаторов в СССР устанавливаются ГОСТ 11599-67 «Резонаторы кварцевые вакуумные на частоты колебаний от 4 кГц до 100 МГц» и соответствуют уже упоминавшимся рекомендациям Международной электротехнической комиссии [Л. 3-1].

По этому ГОСТ вакуумные резонаторы подразделяются на следующие четыре типа:

Э — миниатюрные, в баллоне диаметром до 10,2 мм, на частоты от 40 до 200 кГц и от 4 500 кГц до 100 МГц*, с восемью наружными выводами;

С — малогабаритные, в баллоне диаметром до 19 мм, на частоты от 4 кГц до 100 МГц, с семью наружными выводами;

Д — малогабаритные, в баллоне диаметром до 22,5 мм, на частоты от 100 до 150 кГц и от 490 до 3 000 кГц, с девятью наружными выводами;

Ц — нормального исполнения, в баллоне диаметром до 30 мм, на диапазоны частот от 100 до 120 кГц и от 1 до 8 МГц, с двумя наружными выводами.

Резонаторы типов С и Д могут выполняться как с жесткими выводами (штырьками) для вставления в панель (С1 и Д1), так и с мягкими (гибкими) выводами для непосредственной припайки к другим элементам схемы (С2 и Д2). Резонаторы типа Э выполняются только с гибкими наружными выводами (Э2), а резонаторы типа Ц — либо с гибкими выводами (Ц2), либо с жесткими лужеными лепестками для подпайки к ним монтажных проводов (Ц3).

Основные наружные размеры резонаторов приведены в табл. 3-2. На рис. 3-5 показан внешний вид резонаторов.

Размер *H* отсчитывается от плоскости, перпендикулярной оси баллона резонатора и образующей при пересечении с наружной поверхностью купола баллона резонатора окружность диаметром $5,2 \pm 0,1$ мм для резонаторов.

* В последнее время диапазон низкочастотных резонаторов расширен примерно от 20 до 600 кГц.

Размеры H и H_1 (по рис. 3-5) вакуумных резонаторов

Резонатор	Поддиапазоны частот, кГц	H , мм	H_1 (не более), мм
Э2	40—60	80 ± 2	87
	60—75	70 ± 2	77
	75—85	60 ± 2	67
	85—100	50 ± 2	57
	100—120	45 ± 2	52
	120—150	40 ± 2	47
	150—200	32 ± 2	39
	4 500—100 000	32 ± 2	39
С1, С2	4—6	90 ± 3	100
	6—60	75 ± 3	85
	60—65	65 ± 3	75
	65—160	60 ± 3	70
	160—200	55 ± 3	65
	200—250	50 ± 3	60
	250—350	45 ± 3	55
	350—500	38 ± 3	48
	500—840	75 ± 3	85
	840—100 000	32 ± 3	42
Д1, Д2	100—150	75 ± 3	85
	490—3 000	60 ± 3	70
Ц2, Ц3	100—120	—	75
	1 000—8 000	—	85

Примечание. Допускается изготовление резонаторов с размерами, меньшими H и H_1 , но выбранными из ряда значений размеров, указанных в таблице; при этом размеры резонаторов вида Э2 могут быть равны $H = 15$ или 20 мм, $H_1 = 22$ или 27 мм соответственно.

наторов вида Э2 и $11,1 \pm 0,1$ мм для резонаторов видов С1, С2, Д1, Д2.

Расположение штырьков и их размеры определяются по ГОСТ 7842-64, тип РШ4 для резонаторов вида С1 и РШ8 для резонаторов вида Д1. Вывод 8 у резонатора Э2 должен быть обрезан. Для резонатора Ц2 допускается применение штенгелеванных баллонов или ножек, но при этом высота резонатора не должна выходить за пределы размера H_1 , указанного в табл. 3-2. Штенгелеванные баллоны допускаются также для резонаторов других видов. Для этих резонаторов допускается также применение цоколя другой конструкции с выводами (лепестками) под пайку. На рис. 3-6 приведены

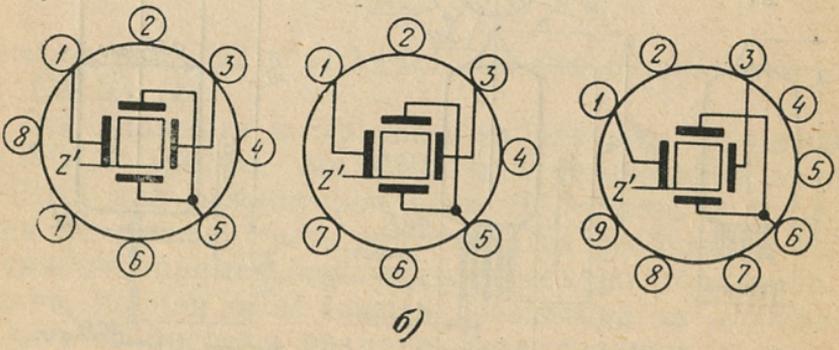
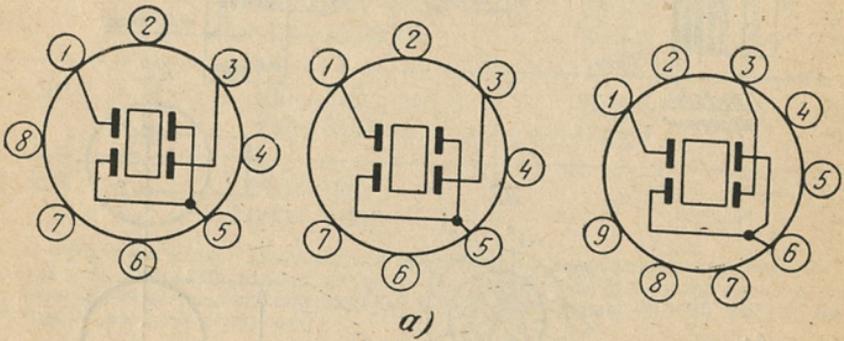
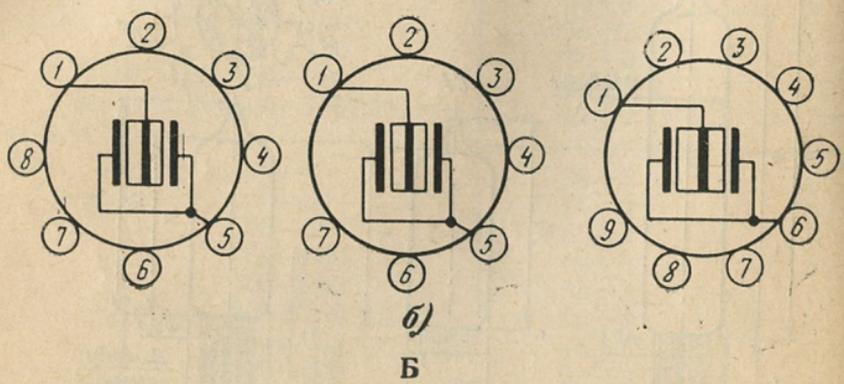
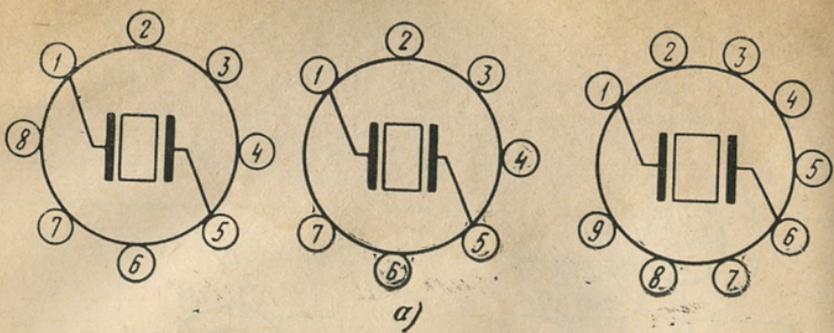
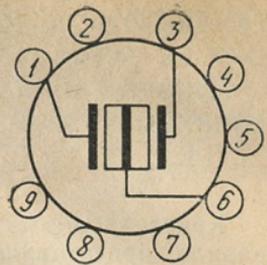
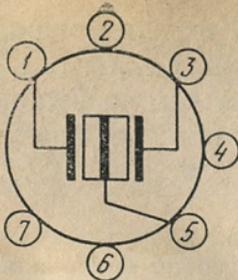
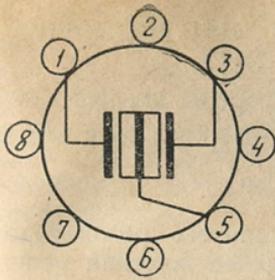
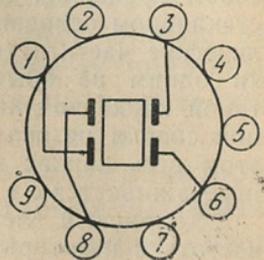
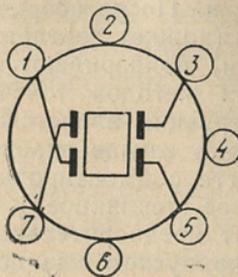
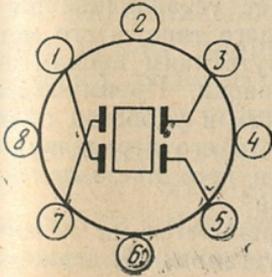


Рис. 3-6. Схемы цоколевки стеклянных вакуумных резонаторов. А — двухполюсные резонаторы с 7, 8 и 9 выводами: а — общий случай; б — част. полюсные резонаторы с 7, 8 и 9 выводами: а — изгибные пластины; б — изгибные четырехполюсные резонаторы с 7, 8 и 9 выводами: а — изгибные пластины, пла. деленных электродах); б — изгибные и крутильные бруски; в — фильтровые пла. основной

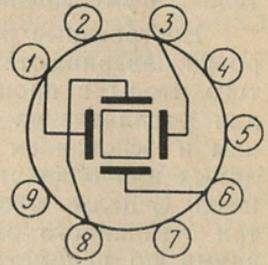
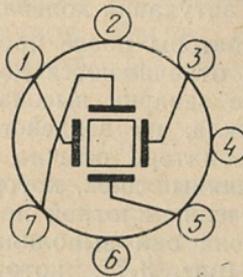
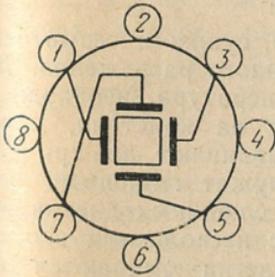


б)

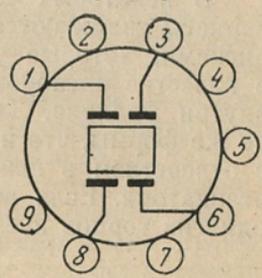
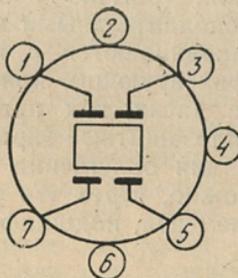
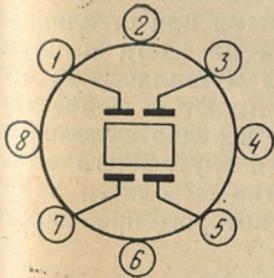
В



а)



б)



в)

Выполняемых в баллонах радиоламп различных серий.
 ный случай — биморфный вибратор с выводом от среднего электрода; Б — трех-
 и крутильные бруски; в — биморфные с выводом от среднего электрода; В —
 стины с продольными и сдвиговыми колебаниями на второй гармонике (при раз-
 стины с разделенными электродами при продольных и сдвиговых колебаниях
 частоты.

стандартные схемы их цоколевки в соответствии с правилами, установленными МЭК [Л. 3-1].

Длина гибких выводов резонаторов выбирается заказчиком из следующих четырех номинальных значений: 8₋₁, 14₋₁, 20₋₁ и 35₋₁ мм.

Кристаллодержатели вакуумных стеклянных резонаторов, как правило, представляют собой более или менее жесткий решетчатый каркас, выполненный из никелевой или стальной проволоки и слюдяных или стеклянных распорок. Отдельные особенности конструкции каркаса связаны, естественно, с особенностями кварцевых элементов, для монтажа которых он предназначен: их размерами, способом крепления и т. п. После сборки каркас устанавливается на стеклянном основании (ножке) соответствующего типа, и его металлические части (стойки) привариваются к внутренним вводам ножки одним из обычных методов точечной сварки. Преимуществом такой каркасной конструкции является легкость и удобство повторной сборки резонатора в случае необходимости его переделки: при этом весь каркас вместе с смонтированным в него пьезоэлементом пересаживается на новое стеклянное основание¹.

Кварцевый элемент предварительно настраивается на заданную частоту с некоторым припуском еще до его установки в держатель. После монтажа производится окончательная настройка, в процессе которой следует учитывать, что после откачки воздуха из баллона частота резонатора может несколько измениться в связи со значительным уменьшением затухания колебаний.

Настроенные резонаторы после промывки, сушки и термотренировки завариваются и откачиваются до заданного разрежения. Для того чтобы в процессе заварки высокая температура, необходимая для расплавления стекла, не воздействовала на кристалл, между ним и основанием резонатора обычно устанавливают два-три слюдяных или один стеклянный диск, которые служат тепловыми экранами. С целью обеспечения плотной посадки слюдяных дисков внутри стеклянного баллона они выполняются с несколькими заострениями по периметру (рис. 3-7), которые слегка сминаются при вставлении каркаса в баллон. Стеклянные диски часто снаряжаются дополнительными распорными пружинами.

В некоторых случаях (обычно у низкочастотных резонаторов) каркасы снабжаются дополнительными слюдяными или стеклянными дисками, которые устанавливаются в верхней их части и служат в качестве распорок, фиксирующих положение металлических стоек внутри баллона. Такие диски, как правило, имеют в поперечнике те же формы, что и теплозащитные экраны, но нередко выполняются с отверстием в центре для облегчения откачки внутреннего объема резонатора. Если возможно, через это отверстие выводится наружу один из торцов пьезоэлемента, подшлифовкой которого производится

¹ Необходимость в такой переделке возникает в тех случаях, когда после заварки и откачки резонатора его частота оказывается за пределами установленных допусков.

подгонка частоты собственных колебаний резонатора. Поперечные размеры у распорных слюдяных дисков ввиду некоторой конусности внутренней части баллонов приходится делать несколько меньшими, чем у нижних экранирующих слюд (при использовании стеклянных дисков в этом, как правило, нет надобности, ибо ими обеспечиваются достаточно большие зазоры, компенсируемые металлическими пружинами).

Некоторые разновидности наиболее распространенных в СССР конструкций вакуумных резонаторов показаны на рис. 3-8.

С недавних пор в ряде стран довольно высокими темпами стало развиваться производство стеклянных вакуумных резонаторов нового типа, по своему внешнему виду, конструкции и габаритам подобных металлическим герметизированным резонаторам, выпускаемым в СССР по ГОСТ 6503-67. Преимуществами этих резонаторов являются сравнительно малый объем, удобная «плоская» форма, а главное — взаимозаменяемость с менее совершенными и уже неудовлетворительными, с точки зрения современных требований по долговременной стабильности, герметизированными резонаторами. Первые образцы таких резонаторов были созданы в Канаде в 1955 г. [Л. 3-2]. Подобные кварцы изготавливаются и в СССР.

Наиболее сложной при разработке стеклянных аналогов герметизированных резонаторов в металлических корпусах была проблема сварки в вакууме основания и кожуха в непосредственной близости от пьезоэлемента и притом без использования каких-либо теплозащитных экранов. Решалась эта проблема по-разному. В Канаде, например, усовершенствовали способ огневой запайки газовым пламенем, причем удалось столь значительно сократить время, необходимое на проведение этой операции, что изменения в кварцевом элементе из-за теплового воздействия не выходили за допустимые пределы. В Австрии разработан другой способ герметизации резонаторов — путем разогрева токами высокой частоты коварового кольца, предварительно впаянного в основание кристаллодержателя. Сейчас еще трудно отдать предпочтение какому-либо из этих способов, хотя метод разогрева коварового кольца токами высокой частоты кажется на первый взгляд более перспективным хотя бы потому, что он в принципе допускает автоматизацию процесса. Именно по этому пути пошли при разработке подобных резонаторов и в СССР. Возможно, что заварка резонаторов сможет быть заменена клеевой вакуумноплотными эпоксидными компаундами.

Конструкции рассматриваемых резонаторов свойственны некоторые особенности, обусловленные необходи-

мостью противостоять воздействию относительно высокой температуры, развивающейся при запайке оболочки. В таких конструкциях неприменимы мягкие припой, плавящиеся при температуре ниже 300°C ; поэтому в них и не используются паяные соединения.

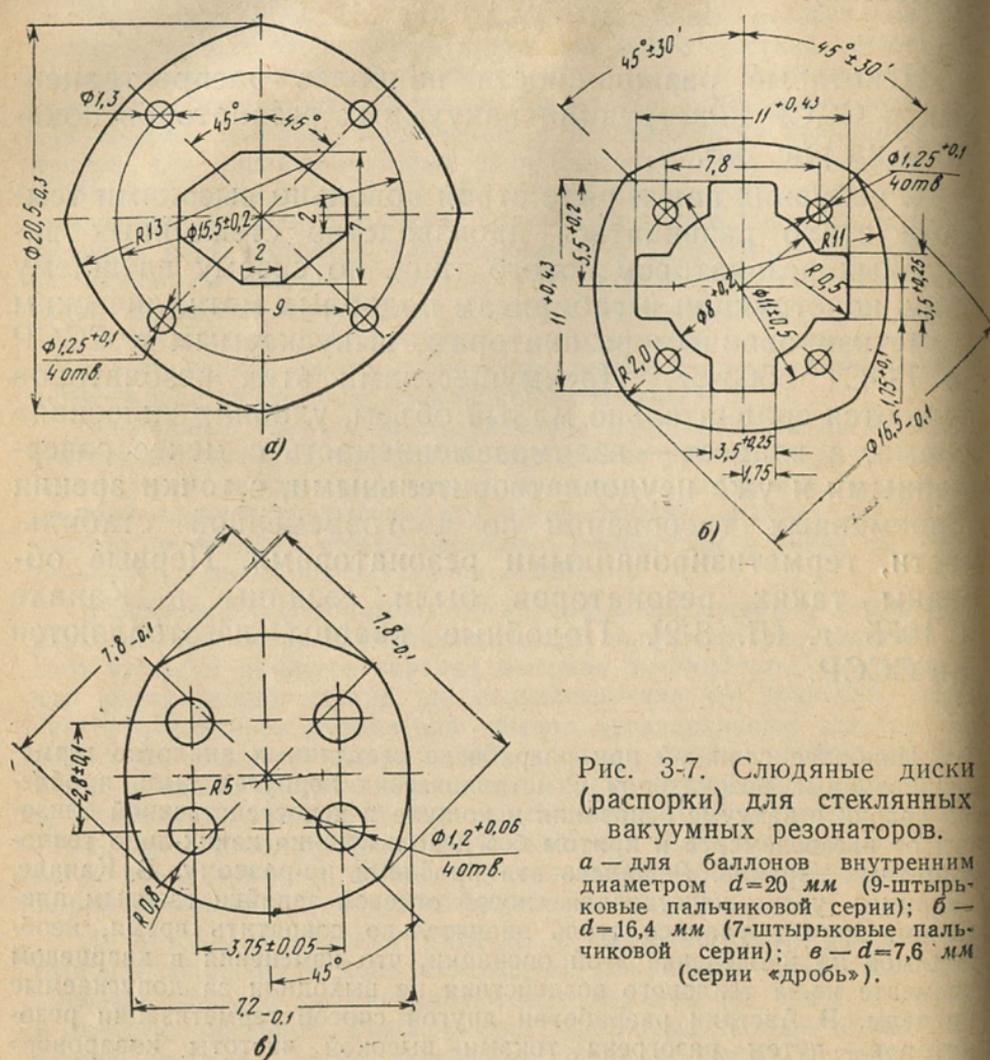
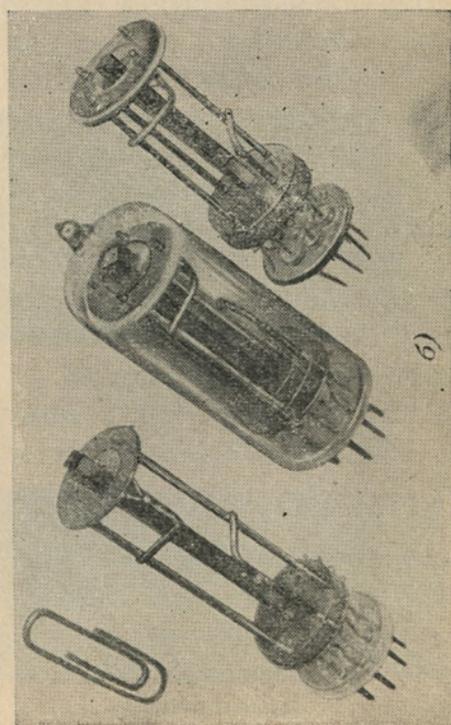
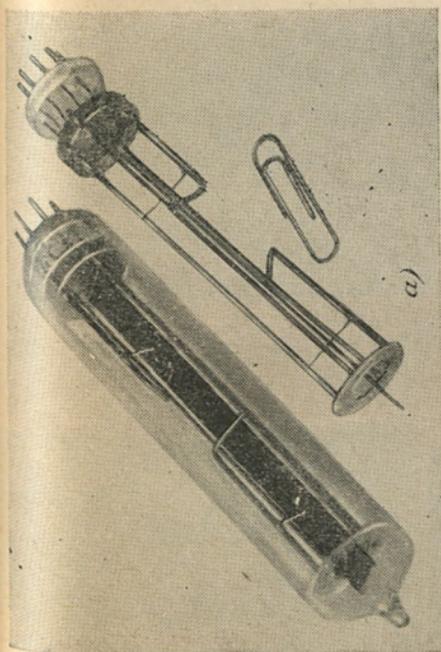
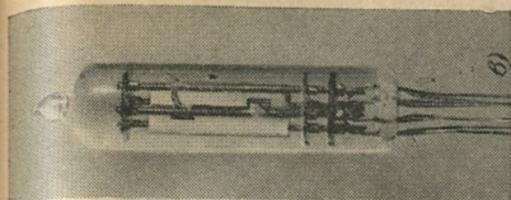


Рис. 3-7. Слюдаые диски (распорки) для стеклянных вакуумных резонаторов.

a — для баллонов внутреннего диаметром $d=20$ мм (9-штырьковые пальчиковой серии); *б* — $d=16,4$ мм (7-штырьковые пальчиковой серии); *в* — $d=7,6$ мм (серии «дробь»).

Внутреннее устройство кристаллодержателя напоминает устройство держателя в герметизированных резонаторах с металлическими кожухами и основаниями. Однако для крепления пьезоэлемента к стойкам вместо припоя здесь применяют токопроводящие пасты или цементы, состоящие, например, из смеси тонко измельченного серебра, легкоплавкого стекла и органической связки. Такую пасту вжигают при температуре 450 —



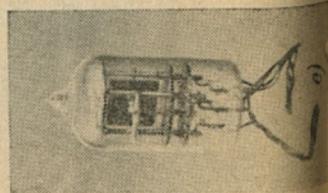
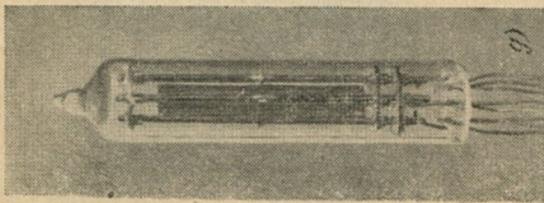
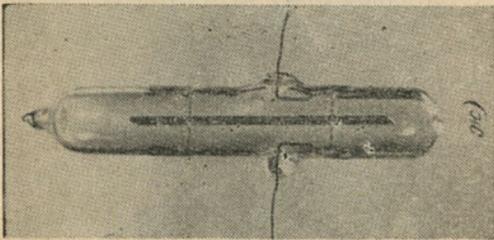
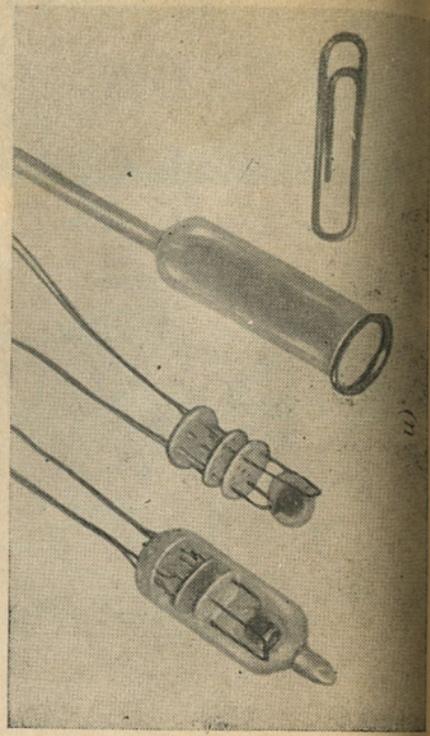
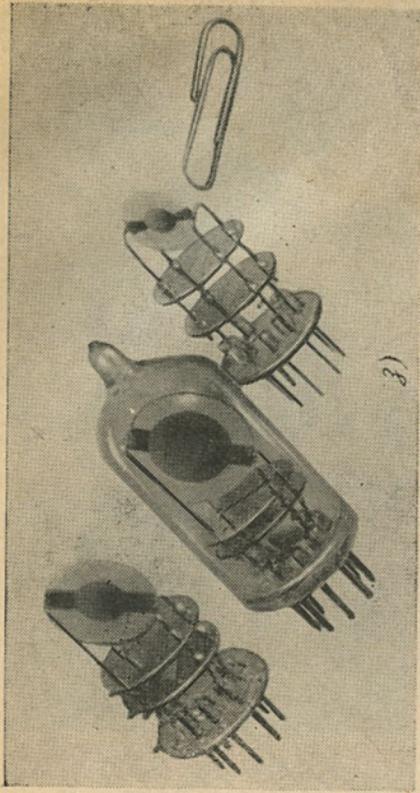
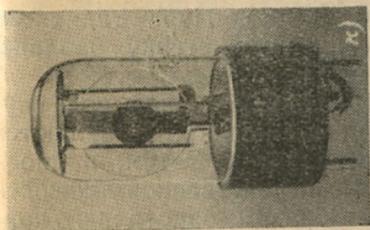
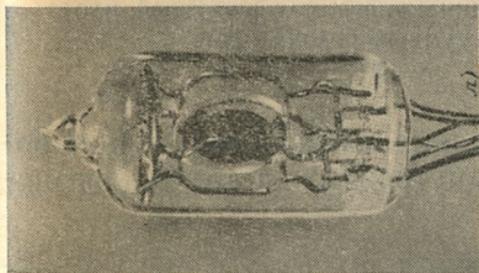


Рис. 3-8. Вакуумные стеклянные кварцевые резонаторы, изготовляемые отечественной промышленностью.

а — биморфные, на частоты 0,5—3 кгц (пальчиковые); *б* — изгибные бруски на частоты 2—60 кгц (пальчиковые); *в* — изгибные пластины на частоты 20—200 кгц («дубовь»); *г* — крутильные бруски на частоты 40—200 кгц, справа — на основной частоте, слева — на второй гармонике (пальчиковые); *д* — пластины с продольными колебаниями («дубовь»); *е* — контурные пластины на частоты 150—800 кгц («пальчиковые»); *ж* — контурные пластины на частоты 300—600 кгц («дубовь», бескаркасные); *з* — высокочастотные пластины и линзы, сдвиг по толщине («пальчиковые»); *и* — то же, в баллонах радиолампы серии «дубовь»; *к*, *л* — прецизионные резонаторы.



500° С одновременно в соответствующие точки держателя и в кварцевую пластину, чем и скрепляют их друг с другом.

Металлические детали кристаллодержателя, кроме выводов, выполняются из жаростойких материалов, не теряющих упругости при нагревании до 450—500° С, например из сталей марок К40НХМ или Н36ХТЮ (ЭИ702) или же из никеля марки НП2 (ГОСТ 2179-59). Конструкция арматуры обладает особенностями, обусловленными технологией сборки резонатора. Так, например, для повышения механической прочности устройства крепления монтажные стойки чаще всего выполняются с так называемыми «флажками» в верхней части (крайний слева образец на рис. 3-9), в которые плотно входит кварцевая пластина; эти флажки прочно удерживают ее даже тогда, когда она еще не скреплена с арматурой пастой или цементом.

Резонаторы рассмотренного типа выпускаются как в малогабаритном, так и в миниатюрном исполнении (т. е. с внешними размерами, соответствующими как типу Б, так и типу М ГОСТ 6503-67). Разработаны и выпускаются в ряде стран сверхминиатюрные плоские

кварцы размерами $6 \times 6 \times 3,5$ мм; такие кварцы изготовляются на частоты от 10 Мгц и выше. Что же касается резонаторов других типов, то они могут быть выполнены на частоты от 1 Мгц и выше при наружных размерах $19,7 \times 19,2 \times 8,9$ мм и на частоты свыше 5 Мгц при наружных размерах $13,5 \times 11,0 \times 4,6$ мм. Низкочастотные резонаторы в плоских баллонах не считаются перспективными, поскольку кварцы в баллонах радиоламп типа «дробь» имеют меньшие объемы, а конструк-

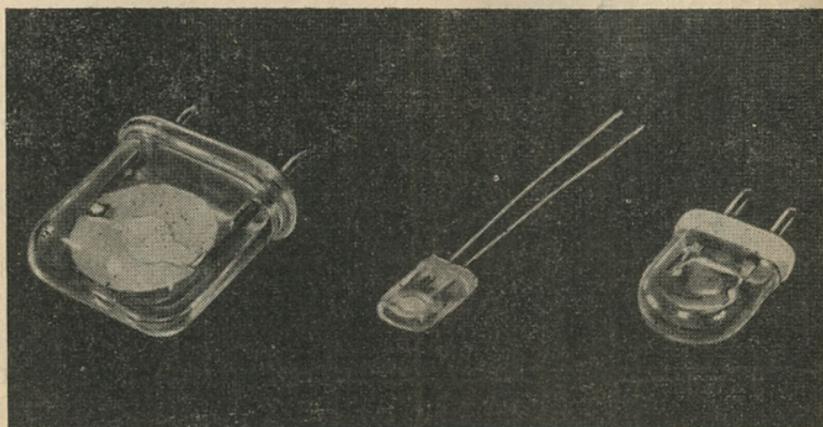


Рис. 3-9. Типичные конструкции кристаллодержателей плоских стеклянных вакуумных резонаторов.

ция стеклянных оснований таких ламп обеспечивает более удобное размещение внутренних деталей резонаторов.

Своеобразная конструкция бескаркасных низкочастотных резонаторов в баллонах радиоламп серии «дробь» описана в [Л. 3-3]. Крепление пьезоэлемента (пластины или бруска с двумя или четырьмя проволочными отводами) в таком резонаторе осуществляется с помощью вваренных во внутреннюю поверхность баллона металлических проволочных захватов (рис. 3-10, 3-8,ж). Пара таких захватов выводится своими концами наружу через стенку баллона, и к ним подводится напряжение внешней цепи.

Кварцевый вибратор с отводами, обрезанными точно под внутренний диаметр баллона и залуженными на концах, вставляются так, чтобы эти отводы входили в пазы захватов. Затем, поднося паяльник к внешней стороне баллона в непосредственной близости от захвата, расплавляют припой и, таким образом, закрепляют кристаллический элемент внутри стеклянного корпуса. Настраивают резонатор путем напайки небольших количеств припоя на торцевую грань пластины, после чего баллон запаивают.

В последнее время, как уже отмечалось, широкое распространение получили миниатюрные вакуумные резонаторы в металлических корпусах. Такие резонаторы, как правило, выполняются в стандартных корпусах промышленных транзисторов (рис. 3-11). Охватываемый ими частотный диапазон простирается от 4—5 Мгц

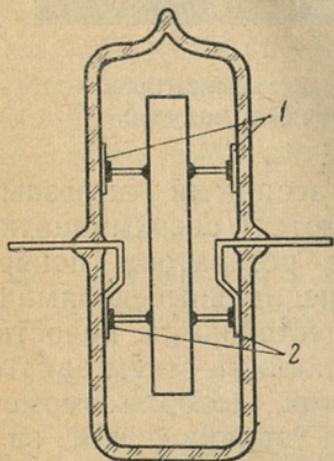


Рис. 3-10. Конструкция двухполюсного бескаркасного резонатора, пьезоэлемент которого монтируется на четырех проволочных отводах.

1 — холостые захваты; 2 — захваты с наружными выводами.

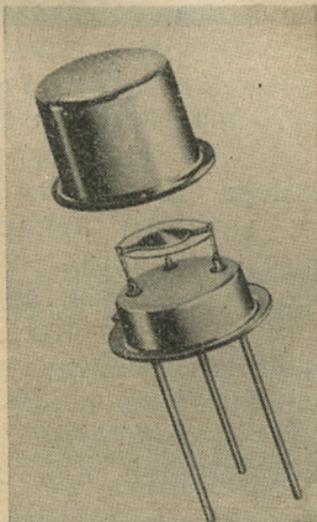


Рис. 3-11. Кварцевый резонатор в корпусе транзисторного типа.

и выше, вплоть до верхней границы освоенного в настоящее время диапазона. Пьезоэлементы рассматриваемых резонаторов выполняются в форме круглых пластин (плоских дисков или линз) и крепятся в держателе с помощью пары жестких ленточек, припаиваемых к ребру кристалла.

Некоторыми фирмами в США выпущены образцы резонаторов, выполненных подобным же методом, на более низкие частоты (вплоть до звуковых); однако широкого применения они еще не нашли.

Специфический вариант конструктивного исполнения резонаторов возник в связи с подготовкой к массовому внедрению электронной аппаратуры, состоящей из блоков этажерочных модулей. С этой целью разработаны резонаторы, представляющие собой элементы таких модулей — так называемые микроплаты. Эти кварцы представляют собой либо керамические пластинки стандарт-

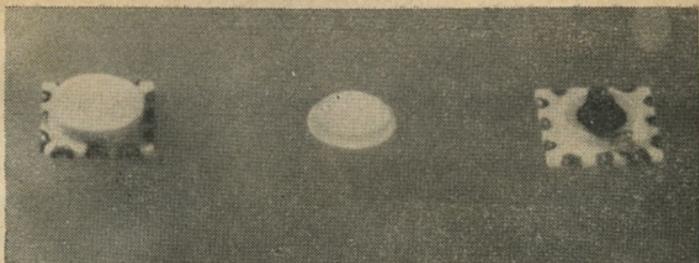


Рис. 3-12. Образцы кварцевых резонаторов — микроплат для этажерочных модулей.

ного размера 10×10 мм с фасонными вырезами по краям, к которым прикрепляются сверхминиатюрные стеклянные или металлические резонаторы поперечником не более 6—7 мм, либо специальные керамические корпуса, в теле которых осуществляются полости для монтажа пьезоэлемента; такая полость затем закрывается крышкой, тоже керамической, которая герметично соединяется с корпусом путем запайки или заливки эпоксидной смолой или другим клеящим веществом

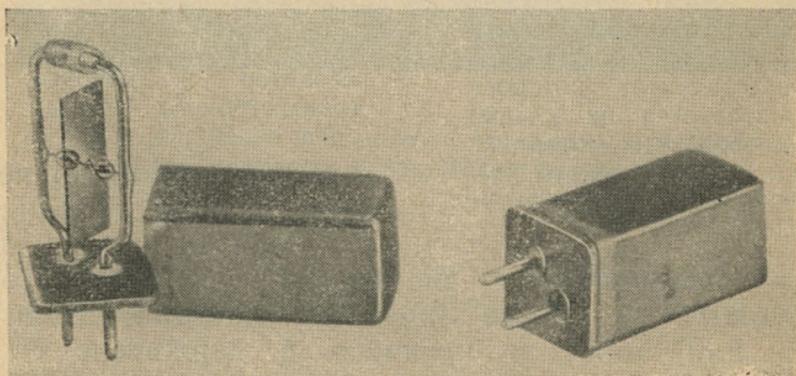


Рис. 3-13. Низкочастотный резонатор модульного типа.

(рис. 3-12). Подобные резонаторы монтируются вместе с другими элементами схемы в составе модуля и заливаются также вместе с ними.

Очевидно, что благодаря малым размерам пьезоэлемента частотный диапазон резонаторов-микроплат может располагаться в области достаточно высоких частот — не ниже примерно 5 Мгц. Резонаторы на более низкие частоты могут быть выполнены в виде целого модуля поперечником 11×11 мм и высотой от 15 до

28 мм. Подобные кварцы получили широкое распространение в СССР и применяются не только в аппаратуре модульной конструкции: благодаря их небольшим размерам, весьма удобной форме, сравнительной простоте в производстве, а потому относительной дешевизне они находят широкое применение в малогабаритных генераторах, фильтрах и т. п. На рис. 3-13 показана конструкция резонатора модульного типа. Такие кварцы отличаются высокой механической прочностью, хорошими электрическими параметрами и могут выполняться на частоты по крайней мере от 100 до 800 кГц. Имеются образцы подобных резонаторов на более высокие частоты, вплоть до 5 МГц.

3-2. Требования к материалам, используемым в конструкциях кварцевых резонаторов

По ряду причин пьезотехника до сих пор обычно не предъявляла своих специфических требований к металлургии, химической промышленности и другим отраслям производства конструкционных материалов (исключая, разумеется, производство основного сырья — кристаллов пьезокварца). Поэтому при использовании металлов, стекла, пластмасс и т. п. в кварцрезонаторной технике приходится приспосабливаться к материалам и изделиям общего назначения или к тем, которые выпускаются по специальным техническим условиям других ветвей радиоэлектроники, чаще всего — электровакуумного или полупроводникового производства.

Основными условиями, которым должны удовлетворять материалы, используемые в кварцевых резонаторах, являются достаточно малая химическая активность, незначительное газоотделение даже в вакууме при повышенной температуре и достаточная долговременная стабильность механических свойств. Эти условия исключают возможность использования большинства пористых материалов, многих пластмасс и резин, некоторых металлов и т. п. Кроме того, в вакуумных резонаторах следует весьма осмотрительно относиться к выбору конструкционных металлов, сплавов, припоев и т. п., поскольку известно [Л. 3-4], что при достаточном разрежении и высокой температуре может наблюдаться довольно заметное их испарение и последующее осаждение на такие детали системы, для которых это недопустимо. Этот процесс, например, может явиться одной из причин необратимого изменения параметров резонатора во времени.

Требования вакуумной гигиены обуславливают необходимость применения в конструкции резонаторов коррозионностойких материалов, несмотря, зачастую, на их дефицитность и относительно высокую стоимость. Дело в том, что окислы ведут себя в вакууме, как в восстановительной среде, постепенно переходя в иные соединения и выделяя при этом в течение длительного времени кислород или другие газы, реагируя с которыми кварцевая пластина или нанесенный на нее электрод могут со временем заметно изменить свои свойства.

С необходимыми для практических целей характеристиками материалов (сталей, цветных металлов и сплавов, стекла, керамики, слюды, пластмасс и т. п.), используемых для изготовления различных деталей конструкции кварцевых резонаторов, можно ознакомиться в работах, специально посвященных этому вопросу [Л. 3-5—3-9].

3-3. Конструкция кварцевого вибратора пьезоэлектрического резонатора

Основным элементом пьезоэлектрического резонатора является кварцевый вибратор. Согласно общепринятой в настоящее время терминологии кварцевым вибратором называется кристаллический элемент резонатора, снабженный электродами и, в случае необходимости, припаянными к нему проволочными токоотводами, предназначенными также и для его монтажа в держателе.

Особенности конструкции вибратора определяются прежде всего видом колебаний кварцевого элемента. Наиболее характерными особенностями являются конфигурация наносимого на элемент электрода и выбор точек закрепления отводов и их соединения с токоведущими деталями держателя. Наилучшее сочетание электрических и механических характеристик резонаторов может быть обеспечено лишь в том случае, если кристалл закрепляется в узловых точках, т. е. в тех точках его поверхности, которые не претерпевают смещений в процессе колебаний. Поскольку элементы крепления кристалла, как правило, являются и проводниками, соединяющими его с внешней электрической цепью, форма электродного слоя металла обуславливается необходимостью подведения соответствующей фазы внешнего напряжения непременно через узловые точки. Поэтому в большинстве случаев каждый электрод, помимо основной части, предназначенной для возбуждения заданного вида колебаний, дополняется специальными отводами, шейками или карманами, соединяющими основную часть с точками припайки токоотводов.

Характерным примером является электрод в форме замочной скважины, наносимый на пьезоэлементы с толщинными колебаниями. Действующей частью электрода в этом случае является диск в центре кристалла, а шейка служит для подведения электрического напряжения от точек крепления, располагающихся обычно на ребре пластины в местах выхода оси Z' [Л. 3-10].

Работы, проведенные в последнее время, свидетельствуют о возможности при определенных условиях полной локализации избранного вида колебаний непосредственно под «пяточком» наносимого электрода. Это обеспечивается точным подбором как диаметра, так и толщины этого «пяточка» (причем окончательную регулировку частоты колебаний данного резонатора прихо-

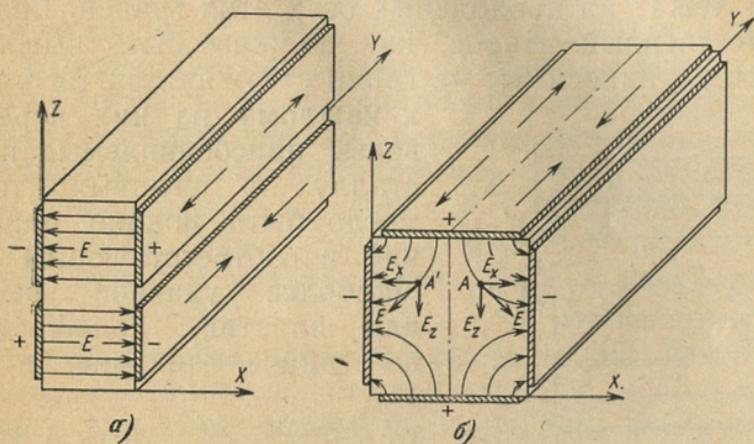


Рис. 3-14. Изгиб кварцевых стержней.

дится производить уже путем нанесения слоя диэлектрика, например монооксида кремния). Таким образом, появляется возможность объединения в одной кварцевой пластине группы изолированных друг от друга резонаторов, служащих, например, элементами многокристального фильтра. С другой стороны, известны успешные попытки выполнения на неактивной части такого кристалла совокупности элементов электронной схемы, которые могут быть нанесены, например, методом пленочной технологии. Таким образом оказывается возможным изготавливать монолитные фильтровые и даже генераторные блоки, что открывает новые и чрезвычайно заманчивые перспективы¹.

Останавливаясь на резонаторах, пьезоэлементы которых совершают колебания других видов, наиболее важно рассмотреть конфигурацию электродных покрытий, наносимых на те пьезоэлементы, в которых при колебаниях должны возникать неоднородные деформации. На рис. 3-14 показано, каким образом к кварцевому

¹ Подобные идеи выдвигались и даже патентовались уже неоднократно, но практическое осуществление их стало возможным лишь благодаря недавним работам [Л. 3-11].

стержню должно быть приложено внешнее электрическое поле, чтобы в нем возникла деформация (*a* — в плоскости YZ ; *b* — в плоскости XY) изгиба основного вида. При таких деформациях в точках, расположенных на расстояниях от торцов, примерно равных $0,224$ длины стержня, располагаются узловые точки. Эти точки обнаруживаются на гранях, параллельных плоскости колебаний, и лежат на продольных осях этих граней. Возникает естественный вопрос, как должны быть выполнены электроды, наносимые на грани стержня для того, чтобы

к каждому из них через отводы, присоединяемые к кристаллу в узловых точках, могло быть подано напряжение в соответствующей фазе. Наиболее удачное решение для пластин, колеблющихся по длине — ширине в пло-

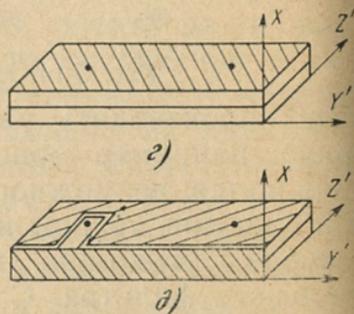
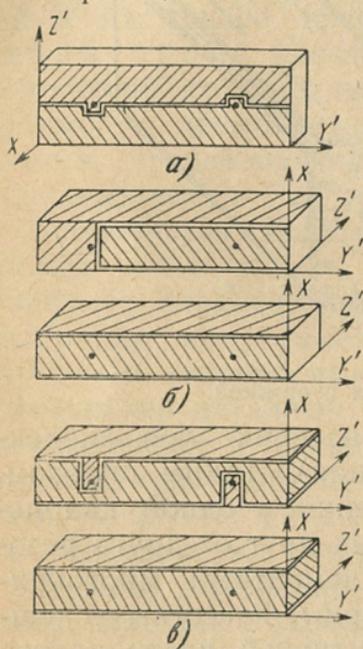


Рис. 3-15. Конфигурация электродов, наносимых на изгибные пьезоэлементы.

a — у пластин, совершающих колебания по длине — ширине (в плоскости $Y'Z'$ для кварца); *b* — у брусков, совершающих колебания в плоскости XY (XY') кварца (трехполюсный вариант); *в* — то же, двухполюсный вариант; *г* — у биморфных вибраторов без вывода от среднего электрода; *д* — у биморфных вибраторов со средней точкой.

скости, определяемой главными гранями, было предложено в [Л. 3-12] (рис. 3-15, *a*). Соединив попарно отдельные электроды элементами конструкции каркаса, можно, помимо четырехполюсного, получить трех- или двухполюсный резонатор; следует только иметь в виду, что для возбуждения изгибных колебаний как на противоположащие, так и на смежные части металлопокрытия необходимо подавать напряжение в противоположной фазе.

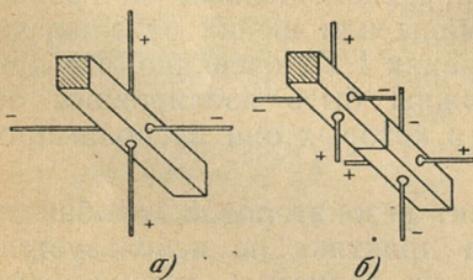
В том случае, когда изгибные колебания в брусках почти квадратного сечения возбуждаются в плоскости XU (или XU'), электроды должны быть нанесены на все четыре главные грани кристалла и соединены друг с другом так, чтобы на любых двух соседних гранях электрические потенциалы были в противофазе; в то же время токоотводы можно закреплять лишь на двух противоположных друг другу гранях, перпендикулярных оси Z' , которые как раз должны оказаться в фазе друг с другом. Выход из этого положения состоит в том, что к каким-то узловым точкам, расположенным на гранях XU' , подводятся узкие карманы или шейки от электродов, располагающихся на гранях $Y'Z'$; очевидно, что при этом указанные точки должны быть изолированы от основной части тех граней, в которых они располагаются (рис. 3-15,б и в).

Четырехполюсный вариант резонаторов с изгибными брусками, как правило, на практике не используется, поскольку для того, чтобы не допустить возбуждения колебаний сжатия — растяжения по длине, те грани брусков, которые перпендикулярны электрической оси кристалла, предпочитают соединять накоротко.

У биморфных вибраторов различают два способа их включения во внешнюю цепь: с выводом от среднего электрода или без него. Каждому из этих способов включения соответствует свой способ сборки вибратора. Именно, если вибратор выполняется с выводом от средней точки, то на нее подается электрическое напряжение одного знака, а на оба внешних электрода — противоположного знака. Для получения при этом изгиба необходимо, чтобы направления электрических осей (кристаллофизических осей X) в каждом элементе вибратора совпадали. Если же вывод от среднего электрода не делается, то на каждый кристаллический элемент действует поле одного направления; значит, для того, чтобы один из элементов сжимался как раз тогда, когда другой растягивается, необходимо, чтобы их электрические оси были антипараллельны. В последнем случае конструкция электродов вибратора очевидна: их всего два, они наносятся на противоположные грани вибратора и изолируются друг от друга (рис. 3-15,г). Когда же необходимо осуществить вывод от среднего электрода, то две главные грани, находящиеся на внешних сторонах вибратора, должны быть под одинаковым потенциалом.

При этом наиболее рационально, так же как это делается у изгибных брусков, один из токоотводов, припаянный в узловой точке, отсоединить (путем разрыва металлопокрытия) от электрода, нанесенного на ту грань, где он расположен, и подвести к нему через боковое ребро шейки или «карман» от средней точки. Один из возможных вариантов исполнения подобного соединения показан на рис. 3-15,д.

У пьезоэлементов, совершающих крутильные колебания, одна пара узловых точек образуется в местах



выхода оси кручения. Нетрудно видеть, что у этих пьезоэлементов должна наблюдаться и вторая пара узлов — в центральных точках второй пары главных плоскостей бруска. Поэтому подведение к таким брускам электрических напряжений, необходимых для возбуждения крутильных колебаний, не представляет собой затруднений: одна

Рис. 3-16. Конструкция кварцевого вибратора при крутильных колебаниях на основной частоте (а) и на второй гармонике (б).

фаза подается через пару противоположных токоотводов, вторая — на другую из этих двух пар (рис. 3-16,а). Если необходимо получить колебания на второй гармонике, то к пьезоэлементу подпаиваются не две, а четыре пары отводов, располагающихся на расстоянии четверти длины бруска от каждого из его торцов; каждый из электродов, наносимых на кристалл, при этом делится поперек на две половины (рис. 3-16,б). Естественно, что при этом во внешней цепи или в конструкции каркаса электроды нужно соединить друг с другом, так, чтобы вместе оказались те, которые на рис. 3-16 отмечены одинаковыми знаками. Конструктивное выполнение подобного рода соединений видно из рис. 3-8,г.

Продольные колебания также могут выполняться пьезоэлементами группы X-срезов как на основной частоте, так и на гармониках. Следует заметить, что гармоники выше третьей используются в настоящее время довольно редко. Обусловлено это тем, что гармонические кварцы при продольных колебаниях представляют собой

как бы механическое соединение некоторого числа n секций, где n равно номеру гармоники; каждая из секций ведет себя подобно изолированному резонатору; по своим электрическим характеристикам совокупность этих секций эквивалента как бы параллельному включению n резонаторов, колеблющихся на основной частоте. По этой причине применение гармонических резонаторов на относительно низких частотах невыгодно из-за довольно большой длины пьезоэлемента, а на высоких частотах ограничения на размеры кварцевой пла-

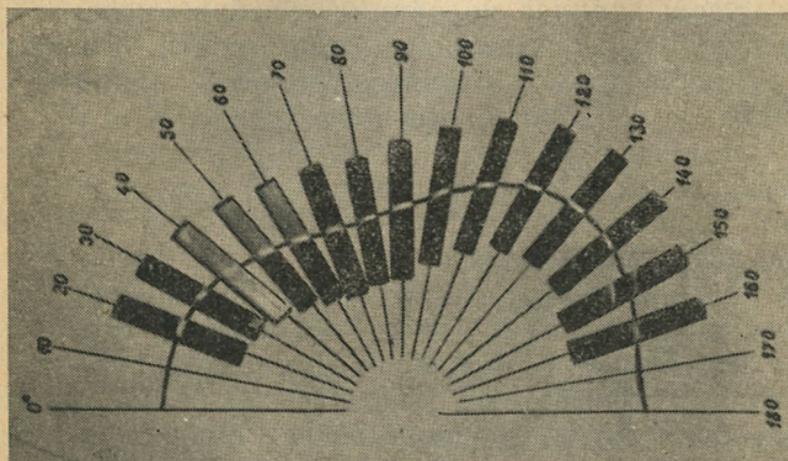


Рис. 3-17. Расположение узловых линий на продольно колеблющихся кварцевых пластинах среза xzs/α° , где α° изменяется от 0 до 180° ; $\alpha^\circ=90^\circ$ соответствует срезу xy , ориентация $xzs/70^\circ$ — срезу $xy/-20^\circ$.

стины накладываются необходимостью обеспечения не слишком больших отношений ширины каждой отдельной секции к ее длине. Таким образом, сочетание большого числа секций оказывается практически нецелесообразным.

При продольных колебаниях на главных плоскостях пьезоэлемента образуется не узловая точка, а узловая линия, при основной частоте проходящая через геометрический центр указанных плоскостей. В общем случае эта линия располагается под некоторым углом к направлению длины пластины, и только для среза $xys/-18,5^\circ$ этот угол равен 90° . Положение узловых линий для других срезов этой группы иллюстрируется схемой [Л. 3-13], приведенной на рис. 3-17. Строго говоря, припайку отводов следует осуществлять только по этой

линии, что не всегда выполняется: в ряде случаев для повышения механической прочности резонатора пьезоэлемент крепят не одной парой отводов, а двумя, причем последние располагают на линии, параллельной торцам пластины. Очевидно, что для срезов xys/α° , если $\alpha^\circ \neq -18,5^\circ$, это может иногда привести к заметному ухудшению параметров кварца.

Расположение узловых точек у пластин, совершающих колебания сдвига по контуру, определяется модой совершаемых ими колебаний. Очевидно, что при колебаниях видов $m=1, n=1$ будет наблюдаться только один узел; такие колебания возбуждаются в пьезоэлементах с квадратной (или почти квадратной) или круглой формой главных граней. У пластин, совершающих колебания видов $m=2, n=1$; $m=3, n=1$; $m=2, n=2$ и т. д., в принципе образуется по несколько узловых точек. Нетрудно убедиться, что их количество равно произведению $(2m-1) \cdot (2n-1)$ в том случае, когда деформации соседних секций, на которые может быть условно разбит пьезоэлемент, происходят как бы в фазе друг с другом (рис. 7-24 в [Л. 3-16]). Именно такие колебания и совершают прямоугольные пластины DT -среза и квадратные пластины ET -среза, почему их крепление и может осуществляться сразу в нескольких точках: либо в узлах каждой из секций, либо на границах этих секций. Замечательно, что крепление пластин на границах секций, как показала практика, обеспечивает заметно большую устойчивость параметров резонаторов ко всякого рода внешним механическим и климатическим воздействиям. По этой причине квадратные пластины ET -среза ($m=2, n=2$) и прямоугольные пластины DT -среза при $b/l \approx 0,4$ ($m=2, n=1$) целесообразно закреплять в геометрическом центре главных граней; напротив, пластины DT -среза при $b/l \approx 0,23$ ($m=3, n=1$) разумнее закреплять двумя парами отводов, припаиваемых на расстояниях $0,318l$ от каждого из торцов пьезоэлемента¹. Вполне допустимо, тем не менее, крепить, например, прямоугольные пластины DT -среза, у которых $b/l \approx 0,4$, в узлах обеих секций, расположенных на расстоянии $0,22l$ от каждой из торцевых граней пластины. Расположение узлов у пьезоэлементов DT -среза с некоторыми наиболее важными для практики соотношения-

¹ Напоминаем, что l — длина пластины, а b — ее ширина.

ми между их шириной и длиной показано на рис. 3-18.

Очень удобны для монтажа и допускают широкие возможности в этом отношении пластины *DT*-среза. Поскольку колебания рабочего вида происходят у них путем попеременного сжатия—растяжения по ширине пьезоэлемента, то при этом образуется узловая линия, располагающаяся вдоль всей его длины посередине каждой из главных граней. Припаивать проволочные отводы к такой пластине можно в любых точках этой линии, чем широко и пользуются, применяя иногда для крепления пластины до четырех пар отводов, размещаемых почти произвольно.

Отводы для крепления всех перечисленных выше разновидностей пьезоэлементов выполняют чаще всего из бронзовой проволоки марки БрОФ (фосфористая бронза) диаметром в сечении от 0,1 до 0,32 мм. Наиболее удобна проволока диаметром 0,2 мм, но при относительно высоких частотах собственных колебаний пластин иногда приходится применять более тонкую, а на низких—более толстую. Отводы диаметром 0,25 или даже 0,32 мм часто используют и тогда, когда необходимо повысить механическую прочность резонатора, хотя при этом в ряде случаев и приходится мириться с заведомым ухудшением электрических параметров резонатора¹.

Большое значение имеет дозировка припоя, используемого для припайки токоотводов. Общее правило может быть сформулировано следующим образом: количество припоя должно быть минимально возможным и строго постоянным. Для монтажа отводов диаметром

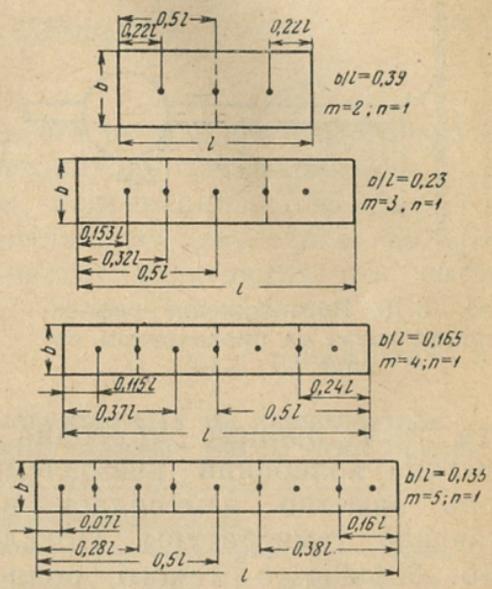


Рис. 3-18. Расположение узловых точек у пьезоэлементов *DT*-среза при различных модах колебаний.

¹ В первую очередь снижается добротность резонатора, а также ухудшается стабильность его частоты и динамического сопротивления при изменениях температуры окружающей среды.

0,2 мм следует рекомендовать не более 0,2 мг припоя на каждую пайку, только в этом случае, да и то при объеме пьезоэлемента, большем $0,03 \text{ см}^3$, можно быть уверенным в том, что положение экстремума ТЧХ будет определяться углом среза пластины, а не ее монтажом.

Монтаж пьезоэлементов на проволочных отводах стали применять еще в самом конце 30-х годов, однако уже

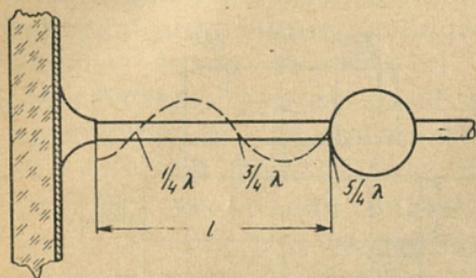


Рис. 3-19. Расположение рефлекторного груза на проволочном отводе [Л. 3-15].

что этот процесс приводил к значительной потере энергии колебаний пьезоэлемента, величина этих потерь заметно изменялась в зависимости от окружающей температуры. Предложенный [Л. 3-14] способ борьбы с такого рода потерями заключается в том, что на проволочных отводах в определенных точках закрепляются грузы — шарики припоя, металлические диски и т. п., играющие роль отражателей волн механических колебаний. Естественно, что эту роль они могут выполнять лишь тогда, когда располагаются на расстояниях $1/4, 3/4, 5/4$ и т. д. длины волны, возникающей в отводах, считая от вершины конуса припоя (рис. 3-19). Вес груза должен быть достаточным для того, чтобы его действие было эффективным. Тогда отвод можно закреплять на стойках или других конструктивных элементах держателя в любой точке, расположенной позади груза.

Положение грузов может быть достаточно просто рассчитано, если известны упругие константы материала отводов. Для расчета используется известное выражение, определяющее частоту изгибных колебаний круглого стержня, закрепленного на одном конце:

$$f = \frac{m^2 d v}{8 \pi l^2}, \quad (3-1)$$

где v — скорость распространения продольных волн; d — диаметр стержня; l — его длина; $m \approx 1,875$ для первой и $m = \left(n - \frac{1}{2}\right) \pi$ для n -й гармоники изгибных колебаний.

Поскольку для фосфористой бронзы $v = 3,6 \cdot 10^5$ см/сек, то из (3-1) можно найти выражение для расстояния до груза l :

$$l [\text{мм}] = 378m \sqrt{d/f}, \quad (3-2)$$

где d [мм], f [гц].

Как показала практика, нет необходимости при каждой частоте колебаний резонатора устанавливать груз в точности на расстоянии, подсчитанном по формуле (3-2). Вполне удовлетворительные результаты получаются, если для группы частот расстояния эти выби-

Таблица 3-3

Расстояния до грузов, напайваемых на проволочные токоотводы резонаторов, минимальные массы этих грузов

Проволока БрОФ	Диаметр проволоки, мм											
	0,03		0,13		0,16		0,20		0,25		0,32	
	Расстояние l , мм	Вес груза, г										
22—38	1,55	0,023	1,90	0,045	2,10	0,030	2,35	0,081	2,60	0,106	2,95	0,144
38—59	1,25	0,023	1,55	0,045	1,70	0,030	1,90	0,081	2,15	0,103	2,40	0,144
59—89	1,05	0,015	1,25	0,030	1,35	0,040	1,55	0,054	1,70	0,072	1,90	0,096
89—150	0,80	0,015	0,95	0,030	1,05	0,040	1,30	0,054	1,35	0,072	1,50	0,096
150—250	0,60	0,005	0,75	0,012	0,85	0,015	0,95	0,022	1,00	0,027	1,10	0,035
250—350	1,10	0,005	1,35	0,012	1,50	0,015	1,70	0,022	1,90	0,027	2,10	0,036
350—450	0,90	0,005	1,10	0,005	1,25	0,005	1,40	0,012	1,55	0,012	1,75	0,015
450—600	0,80	0,004	1,00	0,005	1,10	0,005	1,25	0,005	1,40	0,009	1,55	0,012
600—800	0,65	0,004	0,80	0,004	0,90	0,005	1,00	0,005	1,15	0,005	1,25	0,006

раются одинаковыми; с технологической точки зрения это, очевидно, более удобно. Значения l для различных поддиапазонов частот, рекомендованные в [Л. 3-15], а также соответствующие минимальные массы грузов приведены в табл. 3-3.

3-4. Устойчивость кварцевых резонаторов к внешним механическим воздействиям

Возможность использования кварцевого резонатора в условиях высоких механических нагрузок определяется в первую очередь конструкцией кристаллодержателя. Известно, что воздействие внешних сил может привести к значительным изменениям, иногда даже необратимым, частоты и других параметров кварцевого резонатора, а в ряде случаев и к его разрушению.

Характерные примеры изменения частоты резонаторов в процессе воздействия на них линейных (центробежных) ускорений приведены на рис. 3-20. За-

мечательно, что наблюдаемые при этом изменения частоты обратимы и довольно точно воспроизводятся от измерения к измерению; это обстоятельство в принципе позволяет использовать кварцевый резонатор в ка-

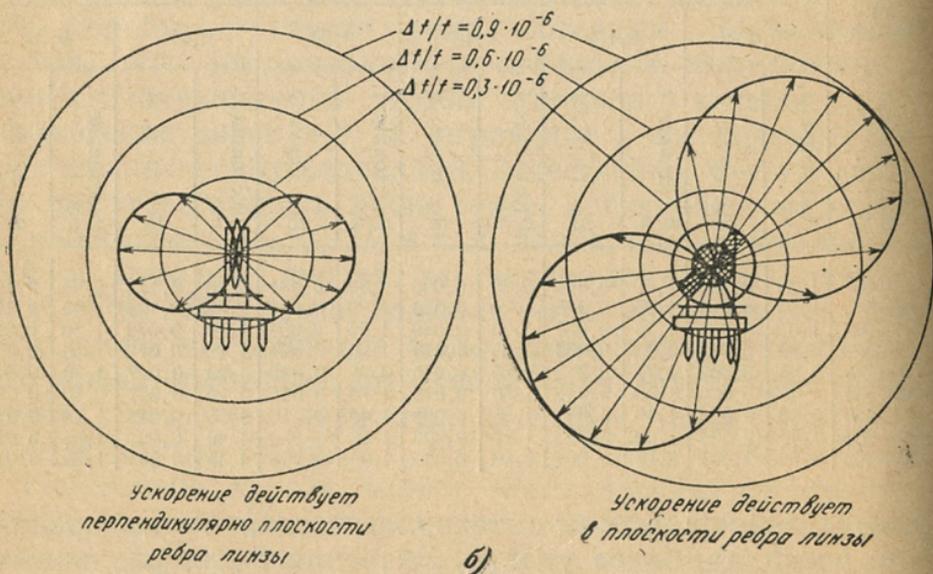
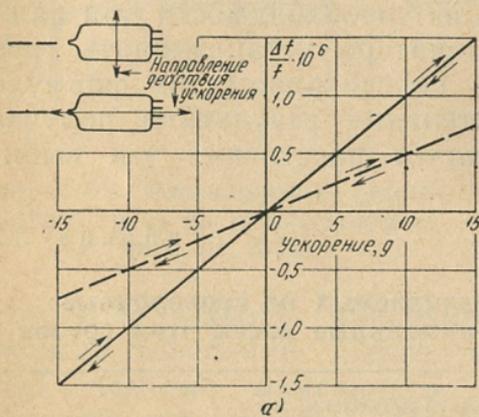


Рис. 3-20. Изменения частоты кварцевых резонаторов под воздействием линейных ускорений.

а — для изгибных резонаторов на частоту ~ 10 кГц в зависимости от величины и направления ускорения; б — для резонаторов на частоту ~ 1 МГц в зависимости от направления ускорения, равного 15 g; пьезоэлемент выполнен в форме двояковыпуклой линзы, совершающей колебания по толщине.

честве датчика для измерения подобных ускорений. Значительно менее регулярный характер носят изменения параметров резонаторов под воздействием вибрационных нагрузок.

Современные конструкции кварцевых резонаторов, как правило, позволяют обеспечить изменения их частоты при ускорении до $15 g$ в пределах до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне от 5 Мгц и выше, до $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ от 2 до 5 Мгц , до $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне от $0,75$ до 2 Мгц и до $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ на еще более низких частотах собственных колебаний. Однако если частота вибрации совпадает с частотой механического резонанса резонатора, то отклонения его параметров от значений, измеренных в статических условиях, резко возрастают. Более того, резонаторы обычно не способны длительное время находиться в таком состоянии и вскоре разрушаются. Поэтому повышение механической устойчивости резонаторов прежде всего связано с возможностью создания конструкций, не обладающих механическими резонансами в заданном диапазоне частот вибраций.

Следует отметить, что к внутренней конструкции резонатора неприменимы такие обычно используемые способы повышения механической устойчивости, как заливка смолами, клеями, запрессовывание в какие-либо вязкие изолирующие массы и т. п., весьма эффективные для большинства других компонент электронной аппаратуры. Дело в том, что кварцевый элемент резонатора должен иметь возможность свободно совершать механические колебания. Поэтому любые приемы, приводящие к ограничению этой свободы, принципиально недопустимы.

При использовании перечисленных выше способов повышения вибропрочности механических систем в них создается значительное затухание на резонансных частотах вследствие большой вязкости среды. Поскольку в резонаторной технике идти по этому пути нецелесообразно, обычно решение ищут в другом направлении — стараются вывести резонансные частоты конструкции за пределы диапазона частот вибраций, воздействующих на изделие. Рассчитывать на снижение этих частот до уровня менее 1 гц , что примерно соответствует нижней границе диапазона частот вибраций, которым подвергается современная электронная аппаратура, довольно трудно. Поэтому обычно стремятся к тому, чтобы

частоты механических резонансов были подняты до 2—5 тыс. *гц*, т. е. примерно до верхней границы упомянутого только что диапазона. Достичь этого можно путем увеличения жесткости кристаллодержателя, предельного уменьшения размеров деталей конструкции, использования в ней материалов с возможно меньшей гибкостью, а также путем выбора такого среза кварца, который обеспечил бы наименьшие возможные размеры пьезоэлемента. Целесообразно также, если это возможно, укреплять пьезоэлемент более чем в двух точках.

Глава четвертая

Кварцевые генераторы¹

4-1. Влияние различных процессов на стабильность частоты генераторов

Прецизионный кварцевый генератор содержит комплекс элементов и компонент радиоэлектронной аппаратуры, включающий высокочастотный и высокостабильный кварцевый резонатор с ничтожно малым старением, стабилизирующий частоту колебаний собственно генератора, высокостабильный источник питания схемы генератора, внутренний и внешний термостаты с системами автоматического регулирования, поддерживающими температуру с высокой степенью постоянства ($0,001^{\circ}\text{C}$ и менее). В состав этого комплекса входит система автоматического регулирования амплитуды (АРА) и система коррекции частоты (рис. 4-1).

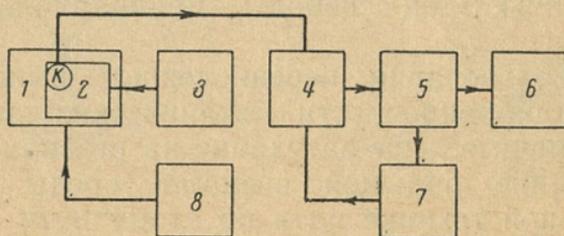


Рис. 4-1. Прецизионный кварцевый генератор.

1 — внешний термостат; 2 — внутренний термостат; 3 — схема авторегулирования температуры во внутреннем термостате; 4 — генератор; 5 — усилитель; 6 — выход; 7 — система АРА; 8 — схема регулирования температуры во внешнем термостате.

¹ Глава написана авторами совместно с В. В. Шуваловым.

Обычно для обеспечения постоянства температуры резонатора и отсутствия градиентов в пьезоэлектрическом кристалле применяют термостат, состоящий из двух камер — внутренней и внешней, с пропорциональным регулированием температуры. Для обеспечения стабильности параметров и характеристик элементов схемы генератора его помещают во внешний термостат. На стабильность частоты кварцевого резонатора, как указывалось, существенное влияние оказывает амплитуда колебаний, поэтому для постоянства уровня сигнала генератора применяют сильную отрицательную обратную связь в усилителе и систему автоматического регулирования амплитуды.

Чувствительность генерируемой частоты к изменениям в реактивном сопротивлении схемы, связанном с кварцевым резонатором, зависит от крутизны характеристики реактивного сопротивления резонатора вблизи номинальной частоты. Эта величина получается дифференцированием реактивного сопротивления кварцевого резонатора по относительному изменению частоты

$$d \left(\frac{\Delta f}{f} \right) = \frac{2\omega L_1}{\left(1 - 2 \frac{C_0}{C_1} \frac{\Delta f}{f} \right)^2} \cdot \frac{dX_e}{d \left(\frac{\Delta f}{f} \right)} \quad (4-1)$$

Данные, приведенные на рис. 4-2, позволяют сформулировать общие требования к схеме генератора следующим образом [Л. 4-1]:

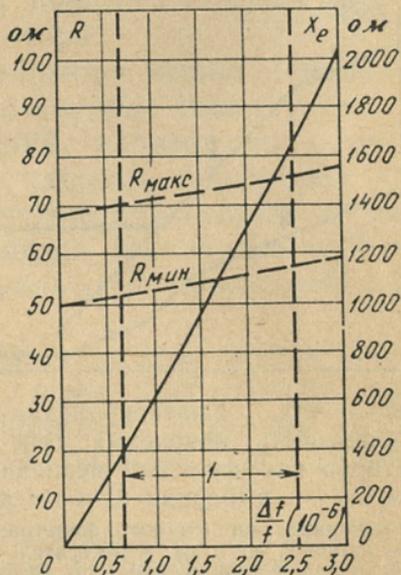
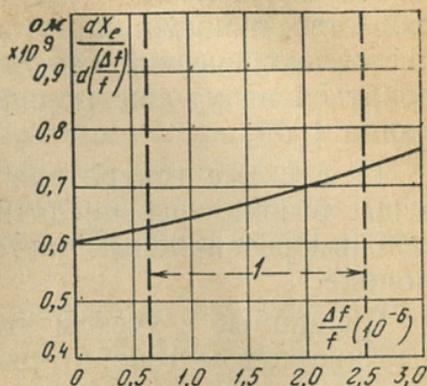


Рис. 4-2. Зависимость реактивного и активного сопротивления кварцевого резонатора от относительного изменения частоты.

l — диапазон управления частотой.

а) необходимый диапазон отрицательного сопротивления должен составлять 51—15 ом;

б) отрицательное реактивное сопротивление должно регулироваться в пределах 400—1700 ом;

в) полное отрицательное сопротивление схемы должно поддерживаться постоянным до 0,1 ом при обеспечении стабильности частоты генератора порядка $1 \cdot 10^{-10}$ пьезоэлектрический ток через кварц должен стабилизироваться на уровне порядка 70 мка с постоянством порядка 1 дб;

г) в схеме генератора необходимо применять кварцевые резонаторы, предотвращающие колебания нежелательных резонансных частот, в частности на третьей гармонике.

Созданные с учетом этих требований высокостабильные кварцевые генераторы частотой 2,5 и 5,0 Мгц обладают параметрами и характеристиками, определяющимися параметрами и характеристиками резонаторов, колеблющихся на пятой гармонике. Такие прецизионные кварцевые генераторы обладают не только высокой долговременной стабильностью (малым старением), достигающей 10^{-9} и менее в месяц, но и высокой кратковременной стабильностью — от $2 \cdot 10^{-9}$ за 1 мсек до 3×10^{-12} за 1 сек.

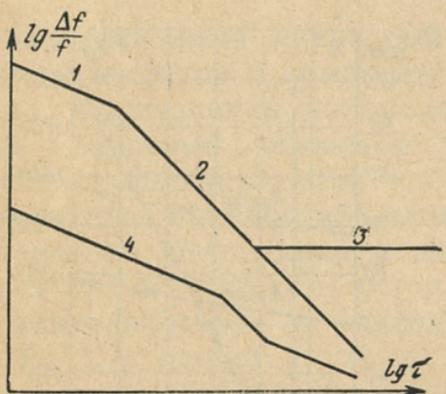


Рис. 4-3. Кратковременная стабильность кварцевых генераторов как функция периода выборки.

1 — влияние одиночного фильтра; 2 — тепловой шум от вспомогательных цепей (аддитивный); 3 — $1/f$ — шум; 4 — шум от источника внутри петли генератора (возмущающий).

В кварцевом генераторе имеются следующие основные источники шумов, влияющие на кратковременную стабильность частоты вследствие ее флуктуации: тепло-

вой и дробовой шум собственно генератора, вызывающий возмущение частоты колебаний; аддитивный шум, связанный с вспомогательными цепями, который не оказывает влияния на колебания, а складывается с сигналом; флуктуации частоты генератора, обусловленные кварцевым резонатором или изменениями параметров схемы.

На рис. 4-3 приведены теоретические результаты, учитывающие вклад различных флуктуаций частоты генератора в зависимости от периода выборки τ . При малых и больших временах интегрирования шумы генератора подчиняются закону $1/\sqrt{\tau}$. С переходом шумов, описываемых законом $1/\sqrt{\tau}$, от высокого к низкому уровню наклон прямой соответствует закону $1/\tau$.

Вклад источника шума, характеризующегося законом $1/\tau$, зависит от свойств выходного фильтра. Если эффективная величина добротности фильтра не очень велика, то кратковременная стабильность частоты генератора в основном определяется наличием этого источника шума.

Флуктуации частоты, обусловленные третьим источником шума, характеризуются спектральной плотностью $1/f$. В разных схемах генератора этот источник действует различным образом и зависит от типа кварцевого резонатора и схемы генератора.

Добротность кварцевого резонатора играет основную роль в повышении стабильности частоты генератора относительно случайных изменений параметров схемы. Кратковременная стабильность частоты генератора непосредственно определяется добротностью лишь в том случае, если второй источник шума достаточно эффективно подавлен узкополосным фильтром в выходной ступени.

Исследования внутреннего трения в кристаллах кварца, проведенные в последнее время, показывают, что можно получить кварцевые резонаторы с весьма большой добротностью, достигающей $(30 \div 86) \cdot 10^6$ [Л. 4-2], что позволяет приблизиться к решению вопроса об определении естественной ширины спектральной линии кварцевого генератора при комнатных и сверхнизких (2°K) температурах.

4-2. Дестабилизирующие факторы

В процессе работы кварцевого генератора на него оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы. Для прецизионных кварцевых генераторов к таким факторам можно отнести, например, изменение напряжения питания электронных ламп (транзисторов) и схем авторегулирования температурой внутреннего и внешнего термостатов; изменения параметров и характе-

ристик электронных ламп (транзисторов), происходящие как при работе, так и в результате их смены; изменение активной и реактивной нагрузки и т. п. Для кварцевых генераторов общего назначения к таким факторам, кроме некоторых из перечисленных, относятся влияния температуры, влажности и атмосферного давления.

На кварцевые генераторы, применяемые в соответствующих радиационных условиях, оказывают влияние потоки быстрых и медленных нейтронов, γ -излучение, космическое излучение и т. д. К дестабилизирующим факторам следует отнести также влияние электрического и магнитного полей.

Влияние дестабилизирующих факторов на частоту кварцевого генератора тем меньше, чем выше добротность кварцевого резонатора.

В генераторе как автоколебательной системе при стационарных колебаниях всегда выполняется условие равновесия фазовых соотношений [Л. 4-3]:

$$\psi_{\alpha} + \psi_{\beta} = 0, \quad (4-2)$$

где $\psi_{\alpha} = f(\omega, p_1, p_2, \dots, p_n)$; $\psi_{\beta} = f(\omega, p_1, p_2, \dots, p_n)$; ω — круговая частота; p_1, p_2, \dots, p_n — факторы, определяющие сдвиги фаз. При изменении фаз под действием каких-либо дестабилизирующих факторов, например анодного напряжения, температуры, влажности и т. п., устойчивому стационарному состоянию автоколебательной системы будет соответствовать уравнение

$$\psi_{\alpha} + \Delta\psi_{\alpha} + \psi_{\beta} + \Delta\psi_{\beta} = 0. \quad (4-3)$$

Так как система находится в стационарном состоянии, то

$$\Delta\psi_{\alpha} + \Delta\psi_{\beta} = 0. \quad (4-4)$$

Это уравнение изменения баланса фаз можно записать, в следующем виде:

$$\frac{\partial\psi_{\alpha}}{\partial\omega} \Delta\omega + \sum_{i=1}^n \frac{\partial\psi_{\alpha}}{\partial p_n} \Delta p_n + \frac{\partial\psi_{\beta}}{\partial\omega} \Delta\omega + \sum_{i=1}^n \frac{\partial\psi_{\beta}}{\partial p_n} \Delta p_n = 0; \quad (4-5)$$

$$\Delta\omega \left(\frac{\partial\psi_{\alpha}}{\partial\omega} + \frac{\partial\psi_{\beta}}{\partial\omega} \right) = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial\psi_{\alpha}}{\partial p_n} \Delta p_n - \sum_{i=1}^n \frac{\partial\psi_{\beta}}{\partial p_n} \Delta p_n. \quad (4-5')$$

Отсюда нестабильность частоты кварцевого генератора, обусловленная влиянием всех дестабилизирующих факторов, равна:

$$\left| \frac{\Delta \omega}{\omega} \right| = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial p_n} \Delta p_n + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial p_n} \Delta p_n}{\left(\frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial \omega} + \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial \omega} \right) \omega}. \quad (4-6)$$

Если $\omega \neq \omega_0$ и изменение частоты кварцевого резонатора по сравнению с его собственной частотой мало, то сдвиг фазы

$$\psi_{\alpha} \approx \frac{\omega L_1}{R_1} - \frac{\omega C_1}{R_1} (R_1^2 + \omega^2 L_1^2). \quad (4-7)$$

Зная, что

$$\omega \approx 1/\sqrt{L_1 C_1}; \quad Q = \omega L_1 / R_1$$

и

$$\rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \gg R_1,$$

получаем:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{1}{\left| \omega \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial \omega} \right|} \sim \frac{1}{2Q}. \quad (4-8)$$

Таким образом, с увеличением добротности возрастают стабилизирующие свойства кварцевого резонатора как колебательного контура и уменьшается нестабильность частоты генератора.

Известно, что чем выше крутизна фазо-частотной характеристики (ФЧХ) резонатора по сравнению с ФЧХ схемы, тем меньше влияние схемы на частоту. Эта формула показывает также, что к генераторной схеме должны предъявляться чрезвычайно высокие требования. Кварцевый резонатор должен быть так согласован с генераторной схемой, чтобы можно было полностью реализовать на практике ту стабильность, которую может обеспечить собственно кварцевый резонатор как колебательный элемент. Поэтому в настоящее время остается актуальной задача совершенствования схемы генератора, а также поиски принципиально нового ее решения.

С уменьшением связи резонатора со схемой возбуждения ослабевает и влияние дробового эффекта на флук-

туации амплитуды кварца. Отметим, что с увеличением добротности связь между кварцевым резонатором и генератором может быть значительно уменьшена.

4-3. Основные схемы кварцевых генераторов

В настоящее время применяется около 20 схем кварцевых генераторов. Рассмотрим лишь наиболее распространенные. Кварцевые генераторы удобно разделить на две группы: генераторы параллельного резонанса (осцилляторные схемы) и генераторы последовательного резонанса (фильтровые схемы).

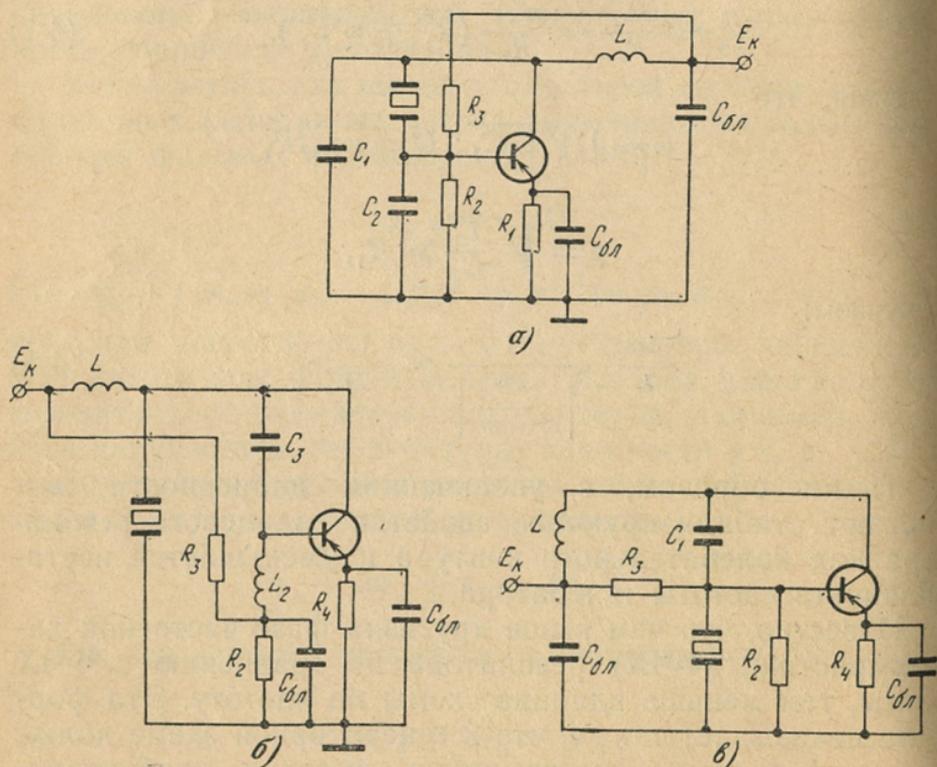


Рис. 4-4. Схемы генераторов «параллельного» резонанса.

В осцилляторных схемах кварцевый резонатор возбуждается на частотах, при которых его реактивное сопротивление имеет индуктивный характер, т. е. внутри резонансного промежутка. Очевидно, с этим и связано название данной группы генераторов — «генераторы параллельного резонанса». К этим генераторам относятся

три вида трехточечных схем (рис. 4-4): а) емкостная; кварцевый резонатор включен между коллектором и базой транзистора (или анодом и сеткой лампы); б) индуктивная: кварцевый резонатор включен между коллектором и эмиттером транзистора (или анодом и катодом лампы); в) индуктивная: кварцевый резонатор включен между базой и эмиттером транзистора (или между сеткой и катодом лампы).

Генераторы по схеме емкостной трехточки получили наибольшее распространение вследствие простоты конструкции и настройки, отсутствия паразитных колебаний и, что особенно важно, вследствие обеспечения наибольшей стабильности частоты.

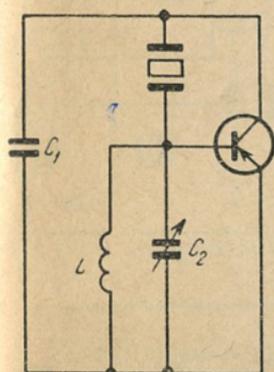


Рис. 4-5. Эквивалентная схема емкостной трехточки для возбуждения кварцевых резонаторов на гармониках.

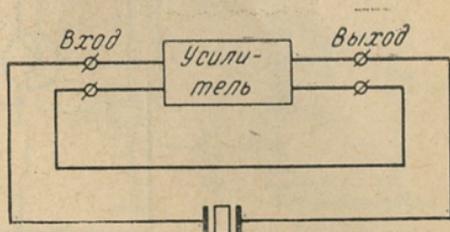
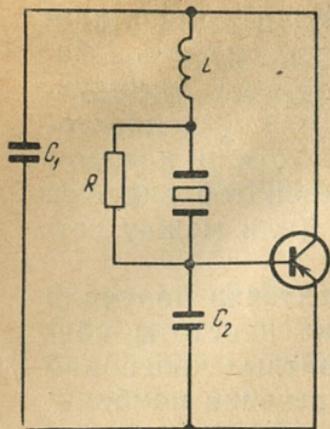


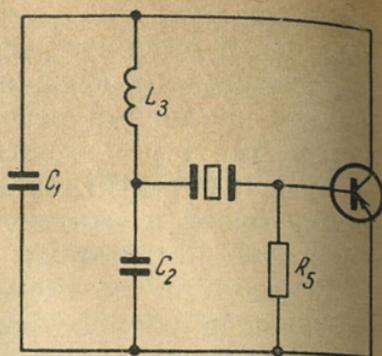
Рис. 4-6. Обобщенная эквивалентная схема генераторов последовательного резонанса.

Для возбуждения кварцевого резонатора на гармониках применяют разновидность емкостной трехточки (рис. 4-5), в которой одна из емкостей заменена параллельным контуром, имеющим на частоте рабочей гармоники емкостное сопротивление, а на низших гармониках и основной частоте — индуктивное сопротивление. При этом возбуждение генератора на низших гармониках и основной частоте невозможно.

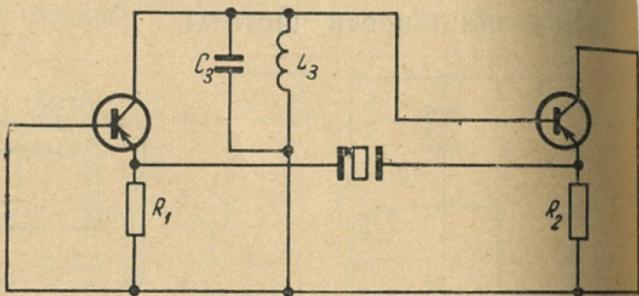
Обобщенная эквивалентная схема генераторов последовательного резонанса изображена на рис. 4-6. Нетрудно видеть, что любой кварцевый генератор последовательного резонанса можно представить в виде резонансного или апериодического усилителя, в цепь обратной связи которого включен кварцевый резонатор. Возбуждение такого генератора будет происходить на частотах, где обратная связь максимальна, т. е. вблизи последовательного резонанса.



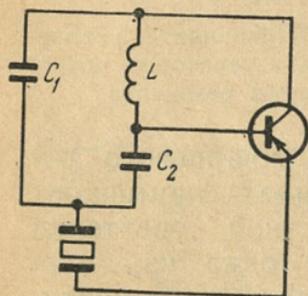
а)



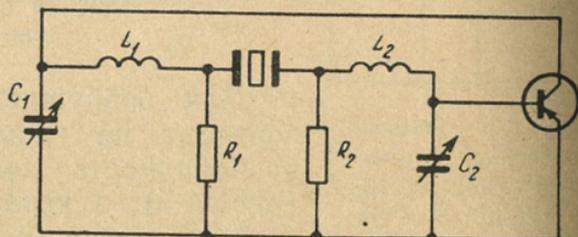
б)



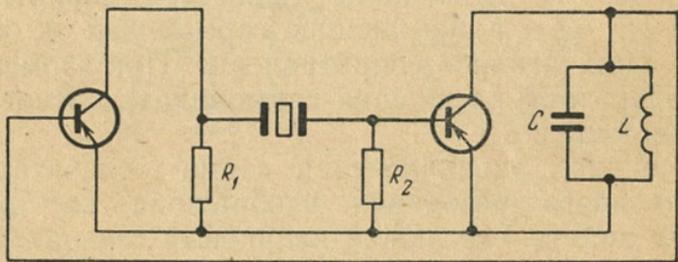
в)



г)



д)



е)

Рис. 4-7. Схемы генераторов последовательного резонанса.

а — генератор с кварцем в контуре; б — генератор с кварцем в цепи обратной связи; в — генератор Батлера на двух транзисторах (лампах); г — генератор Батлера на одном транзисторе (лампе); д — генератор Хегнера на одном транзисторе (лампе); е — генератор Хегнера на двух транзисторах (лампах).

К генераторам последовательного резонанса относятся генератор с кварцевым резонатором в контуре, в цепи обратной связи, генераторы Батлера на одной лампе (транзисторе) или на двух лампах (транзисторах), генераторы Хегнера на одной лампе (транзисторе) или двух лампах (транзисторах) и мостовые генераторы с нейтрализацией статической емкости кварцевого резонатора. Эквивалентные схемы перечисленных генераторов изображены на рис. 4-7 и 4-8.

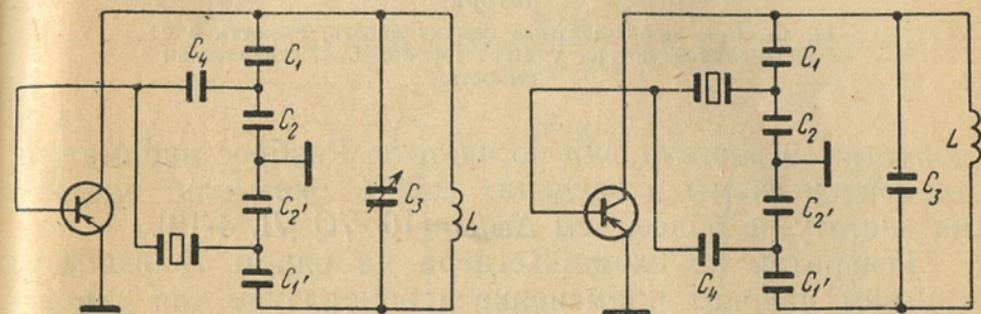


Рис. 4-8. Варианты схем кварцевых генераторов с нейтрализацией статической емкости.

Наибольшее применение находят генераторы с кварцевым резонатором в контуре, в цепи обратной связи, оба варианта генератора по схеме Батлера и генератор по схеме Хегнера на двух транзисторах (лампах).

К схемам с кварцевым резонатором в контуре относится емкостная трехточка с резонатором в индуктивной ветви контура. Эта схема работает как на основной ча-

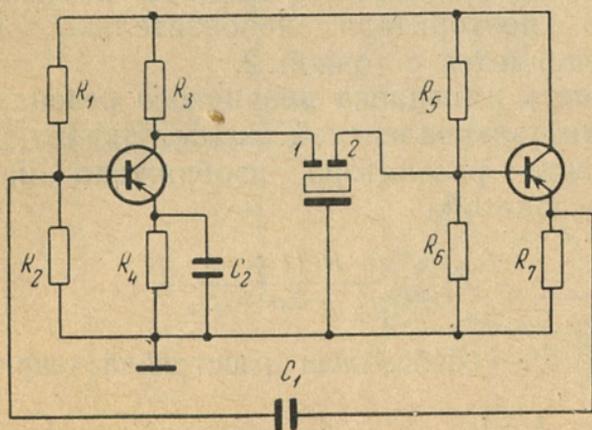


Рис. 4-9. Схема генератора Кэди для возбуждения трехполюсных кварцевых резонаторов.

стоте, так и на гармониках. При этом для обеспечения возможности возбуждения только на необходимой гармонике резонатор шунтируется резистором, который вносит затухание лишь при больших расстройках контура. Этим же резистором можно ограничивать пределы

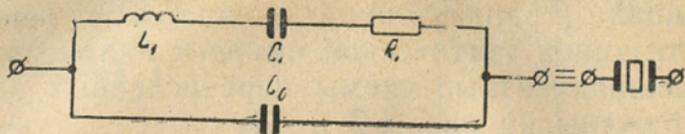


Рис. 4-10. Эквивалентная схема кварцевого резонатора.

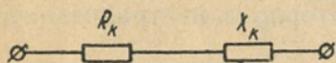
L_1 , C_1 , R_1 — эквивалентные индуктивность, емкость и сопротивление потерь соответственно; C_0 — статическая емкость.

допустимой перестройки по частоте. Разброс параметров элементов схемы в пределах $\pm 30\%$ оказывает влияние на частоту не более, чем $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-3}/Q$ [Л. 4-12].

Генератор по схеме Хегнера на одном транзисторе (лампе) находит применение в аппаратуре для измерения параметров и характеристик

кварцевых резонаторов. Генераторы с нейтрализацией статической емкости кварцевого резонатора сложны в изготовлении и настройке; они не нашли широкого применения. В диапазоне низких частот (4—30 кГц) часто

Рис. 4-11. Эквивалентная последовательная схема кварцевого резонатора.



применяют генератор с трехполюсными резонаторами, схема которого изображена на рис. 4-9. Если вместо транзисторов используют лампы, то наличие каскада эмиттерного повторителя необязательно. При этом точка 1 соединяется с точкой 2.

Зависимость импеданса кварцевого резонатора от частоты. Анализ эквивалентной схемы. Эквивалентная схема кварцевого резонатора изображена на рис. 4-10. Импеданс резонатора

$$Z_h = \frac{R_1 (1 + j\alpha)}{1 - \delta_0 \alpha + j\delta_0}, \quad (4-9)$$

где $\alpha = 2 \frac{\Delta f}{f_s} Q$ — обобщенная расстройка кварцевого резонатора; $\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{f - f_s}{f_s}$; f_s — частота последовательного резонанса; f — рабочая частота резонатора; $Q =$

$= \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \frac{1}{R_1}$ — добротность резонатора; $\delta_0 = 2\pi f K C_0 R_1$ —

отношение сопротивления потерь к реактивному сопротивлению статической емкости. Если эквивалентную схему, изображенную на рис. 4-10, преобразовать к схеме, изображенной на рис. 4-11, то эквивалентные последовательные реактивная и активная составляющие могут быть записаны в виде

$$R_k = \frac{R_1}{(1 - \delta_0 \alpha)^2 + \delta_0^2}; \quad (4-10)$$

$$X_k = R_1 \frac{\alpha(1 - \delta_0 \alpha) - \delta_0}{(1 - \delta_0 \alpha)^2 + \delta_0^2}. \quad (4-11)$$

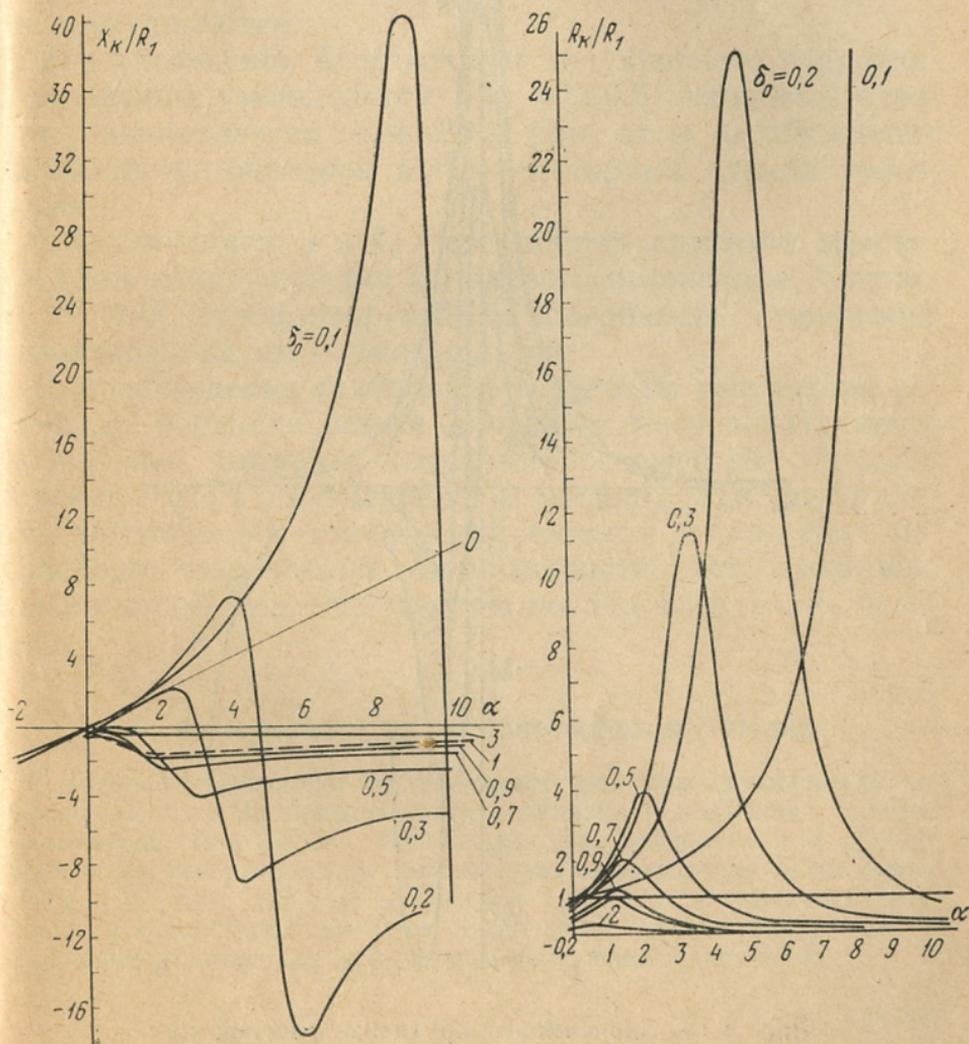


Рис. 4-12. Зависимость элементов последовательной схемы замещения кварцевого резонатора $x_k/R_1 = f(\alpha)$ и $R_k/R_1 = f(\alpha)$.

Фазовый угол φ_k и крутизна изменения фазового угла $d\varphi_k/d\alpha$ сопротивления кварцевого резонатора в зависимости от расстройки составляют:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \alpha(1 - \delta_0 \alpha) - \delta_0; \quad (4-12)$$

$$\frac{d\varphi_k}{d\alpha} = \frac{1 - 2\delta_0 \alpha}{1 + [\alpha(1 - \delta_0 \alpha) - \delta_0]^2}. \quad (4-13)$$

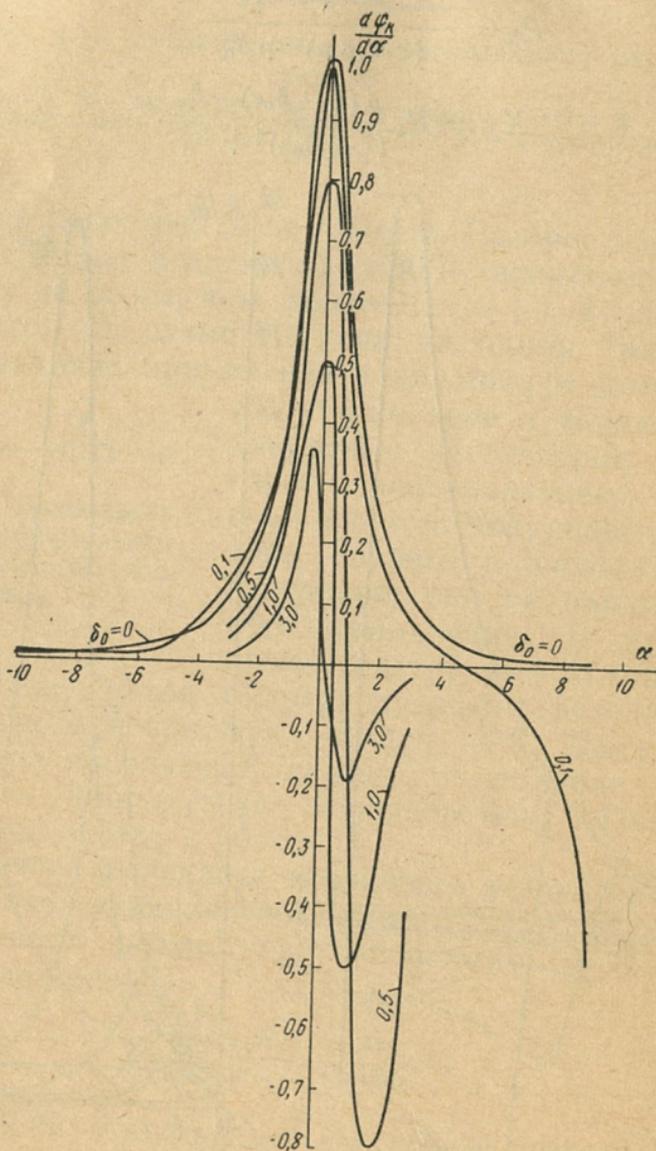


Рис. 4-13. Зависимость крутизны фазовой характеристики резонатора от обобщенной расстройки $d\varphi_k/d\alpha = f(\alpha)$.

Зависимости X_h , R_h и $d\varphi_h/da$ от расстройки резонатора изображены на рис. 4-12 и 4-13. Эти зависимости позволяют сделать следующие выводы. Зависимости X_h и R_h от частоты двузначны. Например, одно и то же значение X_h может наблюдаться на двух частотах, т. е. при одном значении частоты настройки контура могут возбуждаться две частоты. Для осцилляторных схем режим работы вблизи параллельного резонанса неустойчив и самовозбуждение невозможно [Л. 4-5]. Можно показать, что это относится и к генераторам последовательного резонанса.

С увеличением расстройки возрастает последовательное активное сопротивление R_h , поэтому условия самовозбуждения для генераторов последовательного резонанса ухудшаются.

При увеличении δ_0 максимум индуктивного сопротивления кварца уменьшается, при $\delta_0 \geq 0,5$ кварцевый резонатор эквивалентен емкости, при этом возбуждение кварцевых резонаторов в осцилляторных схемах невозможно.

С увеличением α и δ_0 уменьшается крутизна изменения фазы сопротивления кварцевого резонатора. Согласно [Л. 4-6] стабилизирующая способность кварцевого резонатора при этом уменьшается.

Для повышения стабильности частоты генератора необходимо работать ближе к частоте последовательного резонанса и выбирать кварцевые резонаторы с малым значением δ_0 . Если значение δ_0 велико, то надо применять компенсацию статической емкости с помощью параллельно включенной индуктивности, что возможно лишь в некоторых генераторах последовательного резонанса.

4-4. Генераторы на транзисторах и лампах

Существует несколько систем параметров транзисторов как четырехполюсника. Наибольшее распространение получила система Y -параметров. Она весьма удобна, так как позволяет при расчете усилителей и генераторов на транзисторах использовать те же самые методы и приемы, которые применяют при расчете ламповых генераторов и усилителей. Запишем выражения, связывающие токи и напряжения транзистора как четырехполюсника (рис. 4-14):

$$i_6 = Y_{11}e_6 + Y_{12}e_k; \quad (4-14)$$

$$i_k = Y_{21}e_6 + Y_{22}e_k. \quad (4-15)$$

Выражения, связывающие токи и напряжения в лампе (рис. 4-15), имеют вид:

$$i_e = 0; \quad (4-16)$$

$$i_a = S e_e + \frac{1}{R_i} e_a. \quad (4-17)$$

Отметим, что проводимость Y_{21} соответствует крутизне S лампы. Уже на относительно низких частотах проводимость Y_{21} есть комплексная величина. Аналогом Y_{22} является проводимость, величина которой обратно пропорциональна внутреннему сопротивлению лампы. Входная проводимость Y_{11} и обратная проводимость Y_{12} не имеют аналогов в лампе. Эквивалентные проводимости транзистора — комплексные величины и уже на относительно низких частотах сильно зависят от частоты [Л. 4-6].

В [Л. 4-7] проведено сравнение схемы емкостной трехточки и схемы с кварцевым резонатором в контуре и в цепи обратной связи на транзисторах и лампах для частот, меньших $0,05f_\alpha$. По темпера-

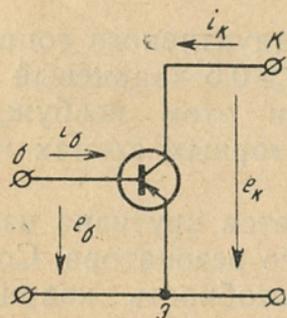


Рис. 4-14. Токи и напряжения в транзисторе.

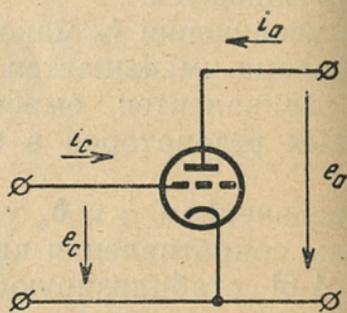


Рис. 4-15. Токи и напряжения в лампе.

турной и режимной нестабильности частоты генераторы на транзисторах и лампах оказываются примерно равноценными. Изменения входных и выходных емкостей в зависимости от температуры и от режима в транзисторах больше, чем в лампах, но у транзисторов много больше крутизна, так что емкости контуров в генераторах на транзисторах намного больше, чем в генераторах на лампах, и поэтому стабильность частоты ламповых и транзисторных генераторов примерно одинакова.

Однако транзисторные генераторы обладают такими преимуществами, как малые габариты и вес, малая потребляемая мощность, малая мощность, рассеиваемая на кварцевых резонаторах. В связи с этими преимуществами в новых разработках применяют не ламповые кварцевые генераторы, а транзисторные. В последнее время начали использовать кварцевые генераторы на туннельных диодах.

4-5. Генераторы на туннельных диодах

Из вольт-амперной характеристики туннельного диода (рис. 4-16) следует, что между точками V_2 и V_1 туннельный диод представляет собой эквивалентное отрицательное сопротивление. На том же рисунке приведена

зависимость дифференциального отрицательного сопротивления R от напряжения V на туннельном диоде.

Если к туннельному диоду подключить колебательный контур, резонансное сопротивление которого больше, чем дифференциальное сопротивление туннельного диода, то возникнут колебания с частотой, близкой к частоте контура. На этом принципе и основано применение кварцевого резонатора в генераторах на туннельных диодах.

Преимуществом туннельных диодов является высокая граничная частота, малые габариты, малая потреб-

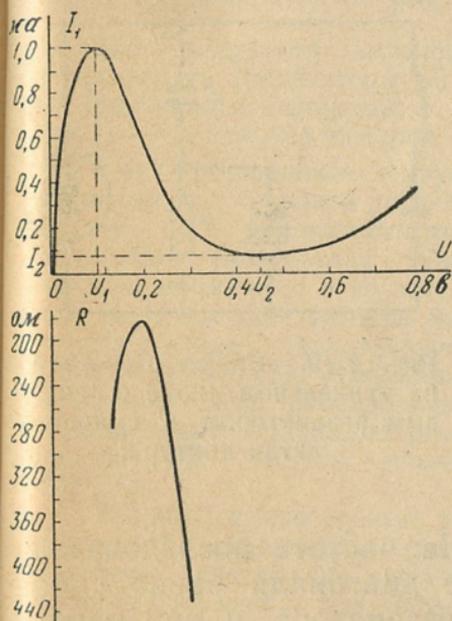


Рис. 4-16. Вольт-амперная характеристика туннельного диода и зависимость дифференциального отрицательного сопротивления R_0 от напряжения на диоде.

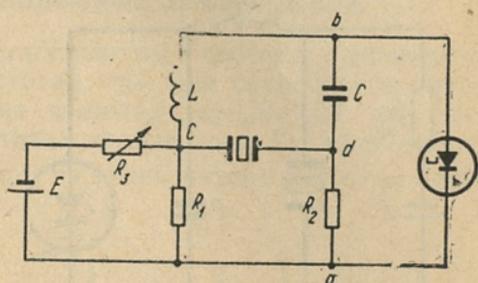


Рис. 4-17. Схема генератора на туннельном диоде с контуром полного волнового сопротивления.

ляемая мощность и малая мощность, рассеиваемая на кварцевом резонаторе, недостатком — малая выходная мощность.

В настоящее время широкое распространение получили три схемы кварцевых генераторов на туннельных диодах. Первая из них — генератор с контуром полного волнового сопротивления (рис. 4-17). Схема его представляет собой обычный четырехплечий мост, в одну диагональ которого (между точками a и b) включен туннельный диод, а в другую (между точками c и d) — кварцевый резонатор. Поскольку полное сопротивление кварцевого резонатора на всех частотах, отличающихся от частоты последовательного резонанса, велико, то диагональ $c-d$ на этих частотах, а также при отключенном резонаторе можно считать разомкнутой. В этом случае

параллельно туннельному диоду оказывается включенным колебательный контур, составленный из индуктивности L , емкости C и активных сопротивлений R_1 и R_2 . Эквивалентное сопротивление R_1 такого контура при условии, что в каждом из его плеч включено активное сопротивление, равное волновому, т. е. $R_1=R_2=\rho=V\sqrt{L/C}$, также равно его волновому сопротивлению и не зависит от частоты. Предполагая, что туннельный диод устойчив при коротком замыкании, и выбирая $\beta < \vec{R}$, приходим к выводу, что схема не будет работать

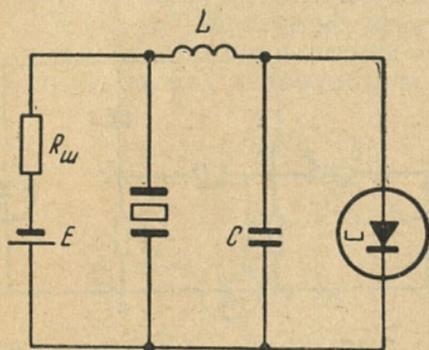


Рис. 4-18. Схема генератора на туннельном диоде с кварцевым резонатором в индуктивной ветви контура.

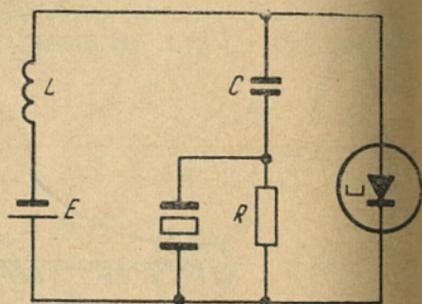


Рис. 4-19. Схема генератора на туннельном диоде с кварцевым резонатором в емкостной ветви контура.

без кварцевого резонатора. На частоте последовательного резонанса сопротивление диагонали равно сопротивлению потерь кварцевого резонатора, и при определенных соотношениях между параметрами возможно самовозбуждение схемы в области частот вблизи последовательного резонанса.

Самовозбуждение генератора на туннельном диоде с кварцевым резонатором в индуктивной ветви контура (рис. 4-18) происходит вблизи частоты последовательного резонанса. В данном случае резонансное сопротивление контура LC максимально, и генератор возбуждается. Сопротивление $R_{ш}$ увеличивает потери в контуре; его величину и паразитные частоты в контуре LC следует выбирать таким образом, чтобы схема генератора была устойчивой при отсутствии кварцевого резонатора.

Третья схема — генератор на туннельном диоде с кварцевым резонатором в емкостной ветви контура (рис. 4-19). Если отключить кварцевый резонатор от

генератора, то при определенных соотношениях между параметрами контура L , C и $R_{ш}$ генератор будет устойчив (предполагается, что туннельный диод устойчив при коротком замыкании). Поскольку эквивалентное активное сопротивление кварцевого резонатора на частоте последовательного резонанса R_1 мало, то при включении резонатора в схему генератора сопротивление $R_{ш}$ шунтируется сопротивлением R_1 , условие устойчивости генератора нарушается, и он возбуждается на частоте, близкой к частоте последовательного резонанса.

4-6. Расчет схем кварцевых генераторов

Для получения высокой стабильности частоты желательно использовать транзисторы на частотах, где еще слабо проявляются их инерционные свойства, т. е. на частотах $f \leq 0,5f_s$ [Л. 4-7, 4-8], где f_s — частота, на которой крутизна транзистора Y_{21} уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с крутизной на очень низких частотах. Однако в связи с большой потребностью в высокочастотных кварцевых генераторах транзисторы применяют и на частотах выше f_s . Для лучших высокочастотных транзисторов типа 1Т313 и 1Т311 $f_s \approx 25$ МГц, в то время как изготавливают и применяют кварцевые резонаторы на частоты свыше 100 МГц.

Теория транзисторных генераторов с кварцевыми резонаторами достаточно хорошо разработана лишь для частот $f \leq 0,5f_s$ [Л. 4-10], поэтому ограничимся изложением методов расчета генераторов до частот $0,5f_s$.

На рис. 4-20 и рис. 4-21 приведены зависимости коллекторного и базового токов от напряжения на базе для транзистора П403. Эти характеристики имеют много общего с характеристиками анодного и сеточного токов ламп.

Различие между ними заключается в том, что характеристики коллекторного тока являются правыми. Поэтому в генераторе на базу транзистора необходимо подавать начальное смещение $E_{б.н.}$, при котором крутизна характеристики коллекторного тока в точке покоя S_n достаточна для возбуждения. Напряжения сдвига характеристик $i_K(e_б)$ и $i_б(e_б)$ совпадают. В случае, если аппроксимировать характеристику $i_K(e_б)$ прямой линией, а характе-

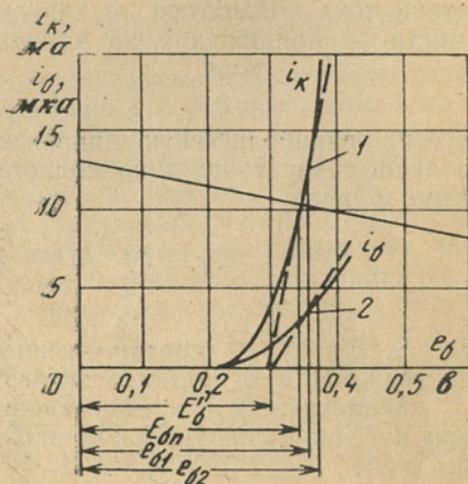


Рис. 4-20. Экспериментальные и аппроксимированные (пунктирная линия) характеристики токов транзистора (значения базы увеличены в 10 раз).

$$1 - i_K = S(e_б - E'_б), \quad S = i_{K0} / (e_б - E'_б); \quad 2 - i_б = \sigma_б(e_б - E'_б)^2, \quad \sigma_б = i_{б0} / (e_б - E'_б)^2.$$

ристику $i_6(e_6)$ — параболой, то напряжения сдвига их также совпадают. Поэтому углы отсечки θ токов коллектора и базы одинаковы.

Крутизна статических характеристик коллекторного тока транзисторов много больше крутизны анодного тока ламп. Базовый ток

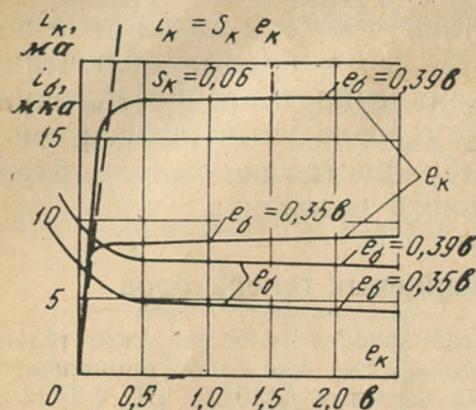


Рис. 4-21. Экспериментальные и аппроксимированные характеристики тока коллектора в зависимости от напряжения на коллекторе.

кусочно-параболическую аппроксимацию. Аналитически аппроксимированные характеристики коллекторного тока могут быть представлены в виде

$$i_k = \begin{cases} S(e_6 - E'_6) & \text{при } e_6 \geq E'_6; \\ 0 & \text{при } e_6 \leq E'_6, \end{cases} \quad (4-18)$$

где S , E'_6 и e_6 — соответственно крутизна, напряжение сдвига характеристик и мгновенное значение напряжения на базе.

Аналитически аппроксимированные характеристики базового тока при кусочно-параболической аппроксимации могут быть представлены в виде

$$i_6 = \begin{cases} \sigma_6(e_6 - E'_6)^2 & \text{при } e_6 \geq E'_6; \\ 0 & \text{при } e_6 \leq E'_6; \end{cases} \quad (4-19)$$

где σ_6 — коэффициент параболы, аппроксимирующей характеристику тока базы.

Анализ зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе при различных напряжениях на базе (рис. 4-21) приводит к следующим результатам. Ток коллектора при больших напряжениях на нем практически не зависит от напряжения; в области насыщения, где базовое напряжение слабо влияет на ток коллектора, характеристики $i_k(e_k)$ удобно аппроксимировать прямой с крутизной S_k , проходящей через начало координат (линией критического режима):

$$i_k = S_k e_k \quad (4-20)$$

В этой области ток базы резко возрастает.

Сравнение характеристик тока транзистора с аналогичными характеристиками для ламп позволяет утверждать, что на частотах менее $0,5f_s$ при расчете генераторов на транзисторах можно применять теорию, разработанную для ламповых генераторов [Л. 4-5].

Метод расчета кварцевых генераторов на частотах менее $0,5f_s$ [Л. 4-7] разработан при следующих допущениях: 1) генератор работает в недонапряженном режиме (такой режим является выгодным в смысле повышения стабильности частоты), поэтому величиной входной проводимости пренебрегают; 2) на частотах, меньших $0,5f_s$, фаза крутизны мала, и ее считают равной нулю.

Расчет генераторов по схеме емкостной трехточки с резонатором в контуре и в цепи обратной связи. Схемы генераторов вместе с блокировочными элементами приведены на рис. 4-22—4-24. Вначале рассмотрим расчет режима, который будет общим для всех трех схем генераторов. Расчет элементов резонансных контуров будем рассматривать для каждого генератора отдельно.

До начала расчета должны быть выбраны схема генератора, напряженность режима, фактор регенерации G , коэффициент обратной связи K , напряжение на коллекторе транзистора E_K , постоянная составляющая тока коллектора I_{K0} , схема питания генератора и сопротивление автоматического смещения в цепи эмиттера R_3 .

Сравнение схем, работающих в одинаковых условиях при оптимальных параметрах контуров, по результатам нестабильности частоты в функции питающих напряжений показывает, что наилучшую стабильность обеспечивает схема с кварцевым резонатором между коллектором и базой, а наихудшую — схема с резонатором в цепи обратной связи. При этом амплитуда напряжения на коллекторе U_K в схеме на рис. 4-23 много меньше, чем в схеме на рис. 4-24. В тех случаях, когда требуется большая амплитуда и параметры контуров во всех схемах отличаются от оптимальных, максимальную

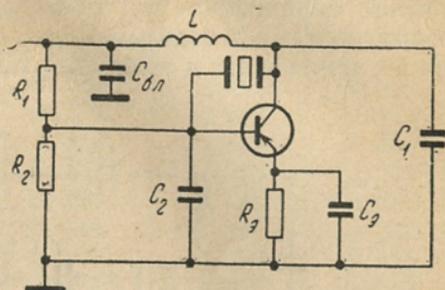


Рис. 4-22. Схема генератора с кварцевым резонатором между коллектором и базой.

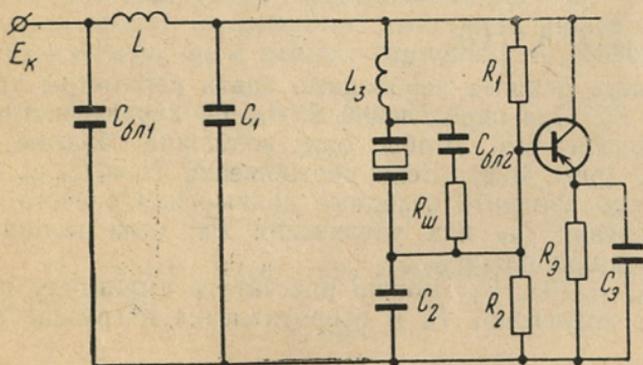


Рис. 4-23. Схема генератора с кварцевым резонатором в контуре.

стабильность частоты обеспечивает схема с кварцем в цепи обратной связи.

В генераторах следует осуществлять недонапряженный режим и выбирать фактор регенерации $G=2-4$. Коэффициент обратной связи и исходные данные для расчета режима (E_K, I_{K0}) надо подбирать так, чтобы обеспечить максимальную стабильность частоты. Значения напряжения E_K , тока I_{K0} , коэффициента обратной связи K и сопротивления в цепи эмиттера R_3 для ряда отечественных транзисторов¹ приведены в табл. 4-1 [Л. 4-7].

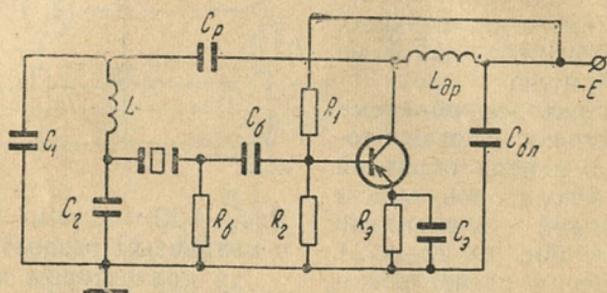


Рис. 4-24. Схема генератора с кварцевым резонатором в цепи обратной связи.

Таблица 4-1

Параметры транзисторов

Тип транзистора	$E_K, \text{ в}$	$I_{K0}, \text{ ма}$	K	$R_3, \text{ ом}$
П13 — П15	8—10	5—10	0,1—0,3	200
П401 — П403	3—5	2—6	0,8—1,2	≥ 300
П410 — П411	6—8	4—6	0,7—1	300

Расчет генератора проводится следующим образом. При выбранном значении фактора регенерации G определяют угол отсечки θ , а затем по табл. 4-2, в которой приведены коэффициенты разложения импульса токов в транзисторе, находят величины $\cos \theta$, $\gamma_0(\theta)$, $\gamma_0^2(\theta)$ и $\gamma_1^2(\theta)$.

Для расчета режима необходимо знать параметры транзистора S , σ_6 , E'_6 и S_K . При определении S , σ_6 , E'_6 характеристики следует аппроксимировать так, чтобы они возможно больше совпадали с реальными (рис. 4-20). Если соотношение $U_K \leq U_{K,кр}$ не выполняется, то надо изменить исходные данные для расчета генератора путем уменьшения I_{K0} или увеличения E_K ; если выполняется, то расчет следует продолжить.

Зная U_6 , $\gamma_1(\theta)$, U_K , можно рассчитать амплитуду первой гармоники тока коллектора I_K и сопротивление нагрузки R_H по формулам

$$I_{K1} = S U_6 \gamma_1(\theta); \quad (4-21)$$

¹ Параметры уточняются при настройке схемы генератора.

Углы отсечки и коэффициенты разложения импульса токов в транзисторе

θ°	$\cos \theta$	γ_0	γ_1	γ_0^2	$\gamma_1^{(2)}$
60	0,500	0,109	0,196	0,043	0,081
65	0,423	0,136	0,239	0,062	0,114
70	0,342	0,166	0,288	0,086	0,156
75	0,259	0,199	0,337	0,116	0,208
80	0,174	0,236	0,390	0,154	0,269
85	0,087	0,276	0,445	0,198	0,342
90	0,000	0,319	0,500	0,250	0,428
95	-0,087	0,363	0,554	0,309	0,516
100	-0,174	0,411	0,611	0,376	0,617
105	-0,259	0,458	0,662	0,448	0,725
110	-0,342	0,509	0,713	0,530	0,840
115	-0,423	0,558	0,760	0,620	0,959
120	-0,500	0,609	0,805	0,707	1,080
130	-0,643	0,708	0,878	0,894	1,321
140	-0,766	0,801	0,934	1,082	1,547
150	-0,866	0,881	0,970	1,248	1,735
160	-0,940	0,944	0,989	1,386	1,879
170	-0,985	0,985	0,997	1,470	1,970
180	-1,000	1,000	1,000	1,500	2,000

$$R_H = \frac{U_K}{I_{K1}}. \quad (4-22)$$

Величина R_H может быть определена также и по формуле

$$R_H = \frac{R_y}{|K|} = \frac{G}{S|K|}. \quad (4-23)$$

Если значения R_H , вычисленные по этим двум формулам, совпадают, то это служит подтверждением правильности расчета.

Далее рассчитывают напряжение смещения на базе E_6 , постоянную составляющую I_{60} и первую гармонику I_{61} базового тока:

$$E_6 = U_6 \cos \theta + E'_6; \quad (4-24)$$

$$I_{60} = aU_6^2 \gamma_0^{(2)}(\theta); \quad (4-25)$$

$$I_{61} = aU_6^2 \gamma_1^{(2)}(\theta). \quad (4-26)$$

Зная E_K и I_{K0} , можно рассчитать напряжение источника питания в коллекторной цепи

$$E \approx E_K + I_{K0} R_1. \quad (4-27)$$

Определим напряжение эквивалентного источника питания в цепи базы E_{6H} . Для этого необходимо исходя из условия $R_6 \gg X_2$ (X_2 — сопротивление плеча контура между базой и эмиттером) вы-

брать величину эквивалентного сопротивления автоматического смещения в цепи базы R_6 . Поскольку расчет контура генератора еще не проведен и не известно X_2 , выбираем $R_{6,э}$ с большим запасом ($R_{6,э} \approx 1-2 \text{ ком}$):

$$E_{6,н} \approx E_6 + I_{к0}R_6 + I_{60}R_{6,э}. \quad (4-28)$$

Проверим выполнение условия самовозбуждения генератора. Для этого найдем напряжение $E_{6,п}$ в точке покоя по статической характеристике $i_k(e_6)$ (рис. 4-20), построив линию нагрузки. Определим

делим $I_k = \frac{E_{6,п} - E}{R_6}$ и при известных величинах I_k и $E_{6,п}$ строим

линию нагрузки, а точку пересечения с I_k опускаем на линию E_6 , т. е. напряжение в точке покоя $E_{6,п}$. Далее по статической характеристике $i_k(e_6)$ определяем ее крутизну $S_n = \Delta I_k / \Delta U_6$ при $e_6 = E_{6,п}$, а затем проверяем выполнение условия $S_n R_y \geq 1$. Определяем, кроме того, сопротивления $R_1 = R_6/A$ и $R_2 = R_{6,э}/(1-A)$ ($A = E_{6,э}/E$), мощность P_0 , отбираемую от источника питания коллекторной цепи, колебательную мощность P_1 и мощность P_k , рассеиваемую на коллекторе:

$$P_0 = E_k I_{к0}; \quad (4-29)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} U_k I_k; \quad (4-30)$$

$$P_k = P_0 - P_1, \quad (4-31)$$

а также коэффициент полезного действия коллекторной цепи

$$\eta = P_1/P_0, \quad (4-32)$$

который у генераторов с повышенной стабильностью частоты является малой величиной.

Особенности расчета генератора с кварцевым резонатором между коллектором и базой. Для расчета емкостей контура C_1, C_2 и коэффициента обратной связи $|K|$ должно быть известно управляющее сопротивление R_y (из расчета режима), эквивалентное активное сопротивление динамической ветви кварца R_1 и частота колебаний f_k . Величины C_1, C_2 и $|K|$ определяют по формулам:

$$C_1 = \frac{1,53 \cdot 10^5}{f_k} \sqrt{\frac{K_0}{R_y R_1}}; \quad \frac{C_2}{C_1} = \frac{1}{K_0}; \quad |K| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \frac{X_2^2}{R_y^2}}}. \quad (4-33)$$

В этих формулах X_2 — сопротивление емкости C_2 :

$$C_2/X_2 = \frac{1,53 \cdot 10^5}{f_k R_1 C_2};$$

f_k измеряется в мегагерцах, C_1, C_2 — в пикофарадах. В генераторах на транзисторах типа П401, П402, П403 оптимальные значения $K_0 \approx 1-1,5$, а на транзисторах типа П411 $K_0 \approx 0,7-0,8$. В случае, когда задано напряжение на коллекторе U_k , выбор K_0 несколько осложняется. С учетом фактора регенерации G и тока $I_{к0}$ для ста-

дионарного режима определяют напряжение на базе транзистора U_6 . Если известно G , $|K|$ и R_1 , коэффициент K_0 определяют по формуле

$$K_0 = \frac{|K|^2}{F} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{F^2}{|K|^2}} \right], \quad (4-34)$$

где $F = 2R_y/R_1$.

При заданной амплитуде U_k расчет параметров контура генератора сводится к определению $|K|$ (при известной из расчета режима величине U_6) и K_0 , а затем — к расчету емкостей контура C_2 и C_3 . Для уменьшения колебаний напряжения смещения конденсатор C_3 должен иметь большую емкость, которая определяется из выражения

$$C_1 \approx \frac{0,159}{f_k R_{вх.о.б}}. \quad (4-35)$$

Величина $R_{вх.о.б} = \Delta U_{б.э}/\Delta I_э$ определяется по входной статической характеристике транзистора.

При питании коллекторной цепи в схему включают дроссель L . Дроссель выбирают из условий

$$X_{др} \cdot 100 = X_{C_2}; \quad \omega L = \frac{10^{-2}}{\omega C_2} \cdot 10^{-2}; \quad L = \frac{10^{-2}}{\omega^2 C_2},$$

а емкость $C_{бл}$ — из условий

$$X_{бл} \cdot 100 = X_{C_2}; \quad \frac{1}{\omega C_{бл}} \cdot 100 = \frac{1}{\omega C_2};$$

$$C_{бл} = 100C_2. \quad (4-36)$$

Особенности расчета генератора с кварцевым резонатором в цепи обратной связи. Для расчета параметров контуров должно быть известно управляющее сопротивление R_y , частота колебаний f и активное сопротивление динамической ветви кварца R_1 . Прежде чем приступить к расчету, необходимо выбрать сопротивление делителя R_6 в цепи обратной связи из соотношений: при $R_y/R_1 < 0,25$ $R_6 \approx 0,5R_1$, при $R_y/R_1 > 0,25$ $R_6 \approx (0,8-1)R_1$. Выбрав R_6 , можно рассчитать параметры контура. При известных R_y и R_6 наилучшая стабильность частоты обеспечивается в том случае, если $K_0 = C_1/C_2$ и сопротивление нагрузки $R_{н.опт} = \rho Q$ (ρ — характеристическое сопротивление, Q — добротность контура) вычисляются по формулам

$$K_{0.опт} = \frac{1}{1 + \frac{2R_y}{R_6}}; \quad R_{н.опт} = 4R_y \left(1 + \frac{R_y}{R_6} \right) \left(1 + \frac{R_1}{R_6} \right). \quad (4-37)$$

Далее следует выбрать добротность коллекторного контура Q . Если известны R_y , R_6 , $K_{0.опт}$ и $R_{н.опт}$, то нестабильность частоты практически не зависит от Q . Поэтому, выбирая Q , можно руководствоваться только конструктивными соображениями. Не следует вы-

бирать $Q < 10$, так как при этом сильно ухудшаются фильтрующие свойства контура, параметры которого равны:

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1,59 \cdot 10^{-8} R_{н.опт}}{f_k Q}; \\ C_2 &= \frac{1,59 \cdot 10^{-5} (1 + K_{00пт}) Q}{f_k R_{н.опт}}; \\ C_3 &= \frac{C_1}{K_{00пт}}. \end{aligned} \right\} \quad (4-38)$$

Здесь L мкгн, $R_{н}$ [ом], C_1, C_2 [пф], f в Мгц.

Коэффициент обратной связи для схемы с кварцевым резонатором в цепи обратной связи $|K| \approx K_0 n$, $n = \frac{R_6}{R_6 + R_3}$.

Если задана амплитуда U_k , то расчет проводится следующим образом. При заданном U_k и выбранных $G, I_{к0}$ и известной амплитуде U_6 коэффициент обратной связи находится из соотношения $|K| = U_6 / U_k$. Определяем величину R_6 , удовлетворяющую значению $|K|$:

$$R_6 = R_1 D \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2F}{D(1+F)}} \right), \quad (4-39)$$

где

$$D = \frac{|K|(1+F)}{2(1-|K|)}.$$

Расчет остальных параметров контура проводится обычным способом. Вычислим такие параметры схемы, как $C_{\Sigma}, C_{бл}, L_{др}, C_p$ и C_6 . Пусть $R_{0e} = \rho P Q$, где P — коэффициент включения контура:

$$\rho = \frac{530\lambda}{C_{\Sigma}}; \quad \Sigma = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$$

$$P = \frac{C_{\Sigma}}{C_1}.$$

Емкость $C_{бл}$ выбирают из условий

$$X_{бл} \cdot 100 = R_{0e}; \quad R_{0e} = 100 \frac{1}{\omega C_{бл}},$$

отсюда

$$C_{бл} = \frac{100}{\omega R_{0e}}. \quad (4-40)$$

Дроссель определяют из условий

$$X_{др} = R_{0e} \cdot 10; \quad R_{0e} \cdot 10 = \omega L,$$

отсюда

$$L = \frac{R_{0e} \cdot 10}{\omega}. \quad (4-41)$$

Емкость C_p определяют из условий

$$X_{cp} \cdot 100 = R_{oe}; R_{oe} = 100 \frac{1}{\omega C_p},$$

отсюда

$$C_p = \frac{100}{\omega R_{oe}}. \quad (4-42)$$

Емкость C_b определяют из условий

$$X_{cb} \cdot 10 = R_b; R_b = 10 \frac{1}{\omega C_b},$$

отсюда

$$C_b = \frac{10}{R_b \cdot 10}. \quad (4-43)$$

Емкость в цепи эмиттера определяют по формуле

$$C_1 = \frac{0,159}{f R_{вх.о.б}}. \quad (4-44)$$

Особенности расчета генератора с кварцевым резонатором в контуре. Расчет генератора с кварцевым резонатором в контуре почти не отличается от расчета генератора с емкостной трехточкой и проводится в той же последовательности. Дополнительно надо рассчитать индуктивность контура по формуле

$$L_3 = \frac{2,53 \cdot 10^4}{f_k^2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}, \quad (4-45)$$

и сопротивление, шунтирующее кварцевый резонатор,

$$R_{ш} = \frac{1,59 \cdot 10^5}{f_k C_0}.$$

В этих формулах L_3 [мкгн]; C_0, C_1, C_2 [пф], f_k [Мгц], $R_{ш}$ [ом]. Сопротивление $R_{ш}$ служит для подавления паразитных колебаний за счет статической емкости кварцевого резонатора C_0 .

4-7. Сравнение различных схем генераторов, стабилизируемых кварцевыми резонаторами

Сравнение генераторов по схемам емкостной трехточки с кварцевым резонатором в контуре и в цепи обратной связи, проведенное в [Л. 4-7] для частот менее $0,5f_s$, позволяет сделать вывод, что наибольшую стабильность частоты обеспечивает генератор с емкостной трехточкой. Температурная нестабильность кварцевых генераторов в основном определяется ТКЧ резонаторов.

Уход частоты при изменении параметров схемы генератора вследствие изменения температуры много меньше. Поэтому при больших значениях ТКЧ резонаторов эти три схемы кварцевых генераторов приблизительно равноценны. При малых значениях ТКЧ резонаторов (10⁻⁷ и менее) генератор с кварцевым резонатором в цепи обратной связи уступает по температурной стабильности генератору по схеме емкостной трехточки и генератору с кварцевым резонатором в контуре. Стабильность при изменении питания генератора с кварцевым резонатором в цепи обратной связи приблизительно в 3 раза меньше, чем в схеме емкостной трехточки и у генератора с резонатором в контуре. Однако генератор с резонатором в цепи обратной связи обладает существенным преимуществом: при одинаковой амплитуде напряжения на выходе в генераторе с резонатором в цепи обратной связи на кварцевом резонаторе рассеивается меньшая мощность.

Мощность, рассеиваемая на кварцевом резонаторе в генераторе с резонатором в цепи обратной связи, равна:

$$P_{\text{кв}} = \frac{I_{\text{к0}}^2 R_1}{2S^2 [\gamma_0(\theta)]^2 R_s^2}. \quad (4-46)$$

Мощность, рассеиваемая на кварцевом резонаторе в емкостной трехточке и в генераторе с резонатором в контуре, равна:

$$P_{\text{кв}} = \frac{1}{2} \frac{I_{\text{к0}}^2}{K_0 S} [\gamma_1(\theta)]^2. \quad (4-47)$$

Поэтому генератор с резонатором в цепи обратной связи следует применять в тех случаях, когда при заданной допустимой мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе, необходимо получить большую мощность генератора. Емкостная трехточка и генератор с резонатором в контуре по своим свойствам примерно одинаковы. Емкостную трехточку следует применять в тех случаях, когда не нужно подстраивать генератор для достижения требуемого значения номинальной частоты. Если генератор необходимо подстраивать, то более удобным оказывается генератор с резонатором в контуре. Подстройка осуществляется изменением индуктивности контура.

Способы расчета генератора на частотах более 0,5f_s рассматриваются, поскольку, как мы указывали, теория транзисторных генераторов на этих частотах разработана недостаточно подробно [Л. 4-7]. Однако опыт применения кварцевых генераторов на различных частотах позволяет высказать некоторые соображения относительно применения схем генератора и для частот более 0,5f_s. В диапазоне 4—30 кГц для трехполосных резонаторов надо применять генератор по схеме Кэди (рис. 4-9). В диапазоне 4 кГц—30 МГц можно применять емкостную трехточку, причем в диапазоне—800 кГц нежелательно применение блокировочных индуктивностей ввиду их больших габаритов. В этом случае удобно применять вариант схемы емкостной трехточки с заземленным коллектором. На частотах свыше 10 МГц применять емкостную трехточку нецелесообразно, так как величина δ₀ у кварцевого резонатора велика, стабильность частоты ухудшается и на более высоких частотах самовозбуждение невозможно. Следует отметить, что емкостная трехточка является единственной схемой, в которой отсутствуют паразитные колебания.

На частотах 800 кГц—30 МГц и выше, если генератор необходимо перестраивать, следует применять генератор с резонатором в контуре. Эта схема устойчиво работает на частотах до 90 МГц. В диапазоне 800 кГц—90 МГц следует применять генератор с резонатором в цепи обратной связи, если требуется получить большую мощность. При этом на частотах свыше 30—40 МГц следует применять компенсацию статической емкости C₀ с помощью индуктивности, включенной параллельно кварцу. На частотах свыше 90 МГц можно применять генераторы, схемы которых предложены Батлером [Л. 4-11].

4-8. Термостаты

При проектировании термостата необходимо провести расчет мощности и времени нагрева термостата и коэффициента сглаживания колебаний температуры.

Термостат состоит из демпфирующего, проводящего, подогревного и изолирующего цилиндрических слоев, вложенных один в другой. Во внутренний объем демпфирующего цилиндра помещается кварцевый резонатор. Проводящий слой выравнивает разность температур по длине поверхности цилиндра, при этом материал дол-

жен иметь высокую теплопроводность и незначительную удельную теплоемкость. Демпфирующий слой должен способствовать тому, чтобы температурные колебания подогревного слоя были достаточно малы по амплитуде во внутреннем пространстве термостата. Если θ_0 — температура внешней плоскости этого демпфирующего слоя, то на его глубине L температура определяется соотношением

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\rho c \omega}{2\lambda}}\right), \quad (4-48)$$

где ρ — плотность материала; c — удельная теплоемкость; ω — круговая частота колебаний температуры; λ — коэффициент теплопроводности. Величина $\sqrt{\rho c / 2\lambda}$ равна 1,8 для воздуха; 10,6 для стекла; 22,3 для войлока и 44,5 для асбеста.

Элементы регулирования температурой целесообразно располагать в контакте с проводящим слоем.

Коэффициент сглаживания колебаний внешней температуры (по отношению к температуре внутри термостата) равен:

$$\alpha = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = 1 + \frac{\beta_n}{\lambda}, \quad (4-49)$$

где $\beta_n = \sum_{i=1}^n dW_i/dt$ — коэффициенты чувствительности элементов регулирования температуры в термостатах; W — мощность нагрева термостата.

Габариты термостата считаются заданными, если известны размеры кварцевого резонатора и схемы генератора. Считаются заданными также температура термостатируемого объекта и окружающей среды.

Для расчета мощности, потребляемой от источника энергии и необходимой для установления теплового стационарного режима в термостате, воспользуемся методом, описанным в [Л. 4-13, 4-14, 4-15]. Внутренняя и внешняя оболочки термостата являются соосными круглыми цилиндрами, радиусы которых соответственно r_1 и r_2 , а расстояние между верхней и нижней крышками цилиндров $\Delta l = l_2 - l_1$; перепад температуры между внутренней и внешней оболочками $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$.

Количество теплоты, необходимое для сохранения установившегося режима, равно:

$$Q = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_T} = Y_T (\theta_1 - \theta_2), \quad (4-50)$$

где R_T — тепловое сопротивление; $Y_T = \frac{1}{R_T}$ — тепловая проводимость теплоизоляционного слоя, зависящая от коэффициента теплопроводности изоляционного слоя и геометрических размеров термостата. Расчет Y_T проводится в предположении однородности изолирующей оболочки. Теплоизоляционный слой разбивается на три части. С достаточной степенью точности можно считать, что

$$Y_T = Y_1 + 2Y_2, \quad (4-51)$$

где Y_1 — тепловая проводимость пространства между цилиндрическими стенками теплоизоляции с коническим срезом торцов, Y_2 — то же для торцевых усеченных конусов.

Проведем расчет каждой составляющей общей тепловой проводимости теплоизоляции термостата. Выделим внутри цилиндрического теплоизоляционного слоя тонкий коаксиальный цилиндрический слой радиусом r и толщиной dr (рис. 4-25). Тепловое сопротивление этого элементарного слоя

$$dR_1 = \frac{1}{\lambda S_1} dr, \quad (4-52)$$

где $S_1 = 4\pi r l$, l — половина длины слоя толщиной dr .
Так как

$$\frac{r - r_1}{l - l_1} = \frac{r_2 - r_1}{l_2 - l_1},$$

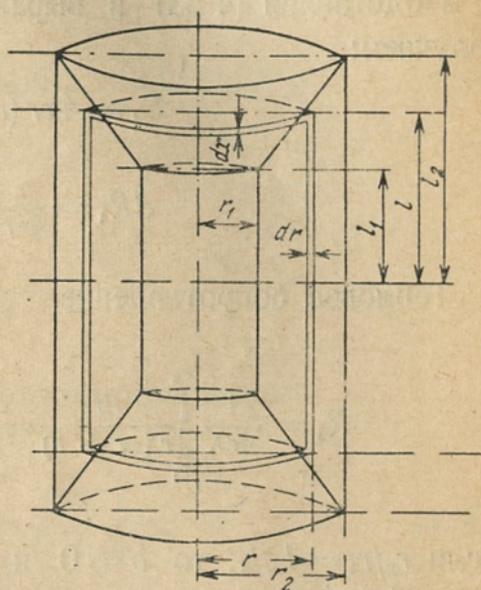


Рис. 4-25. Разрез термостата в направлении образующей цилиндра.

то

$$l = \frac{l_2 - l_1}{r_2 - r_1} r + \frac{r_2 l_1 - r_1 l_2}{r_2 - r_1} = ar + b, \quad (4-53)$$

где

$$a = \frac{l_2 - l_1}{r_2 - r_1}; \quad b = \frac{r_2 l_1 - r_1 l_2}{r_2 - r_1}.$$

Подставляя (4-53) в выражение $S_1 = 4\pi r l$ и в (4-52) получаем:

$$S_1 = 4\pi r (ar + b); \quad (4-54)$$

$$dR_1 = \frac{dr}{4\pi r (ar + b) \lambda}. \quad (4-55)$$

Тепловое сопротивление

$$R_1 = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r(ar + b)} = \frac{1}{4\pi\lambda b} \ln \frac{1 + \frac{b}{ar_1}}{1 + \frac{b}{ar_2}}. \quad (4-55')$$

Если $r_2/r_1 = l_2/l_1$, то $b = 0$ и формула (4-55') принимает следующий вид:

$$R_1 = \int_{r_1}^{r_2} dR_1 = \frac{1}{4\pi\lambda a} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4-55'')$$

В общем случае

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{4\pi\lambda b}{\ln \frac{1 + \frac{b}{ar_1}}{1 + \frac{b}{ar_2}}}. \quad (4-56)$$

Вводя величины $A = r_2/r_1$, $B = l_2/l_1$ и $C = r_1/2l_1$, получаем:

$$Y_1 = 4\pi\lambda l_1 \frac{A - B}{A - 1} \frac{1}{\ln \frac{A}{B}}. \quad (4-57)$$

Определим тепловое сопротивление элементарного слоя, выделив внутри усеченного конуса круговой плоский слой радиусом r и толщиной dx :

$$dR_2 = \frac{dx}{\pi \lambda r^2}.$$

Для отыскания связи между x и r совместим начало координаты x с центром меньшего по площади основания усеченного конуса. Нетрудно видеть, что

$$r = r_1 + \frac{r_2 - r_1}{l_2 - l_1} x = r + \frac{2C(A-1)}{B-1} x. \quad (4-58)$$

Дифференцируя, получаем:

$$dx = \frac{B-1}{2C(A-1)} dr.$$

Тепловое сопротивление и проводимость равны:

$$R_2 = \int_{r_1}^{r_2} dR_2 = \frac{B-1}{4\pi \lambda l_1 A C^2}; \quad (4-59)$$

$$Y_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{4\pi \lambda l_1 A C^2}{B-1}. \quad (4-60)$$

Общая тепловая проводимость

$$Y_T = 4\pi \lambda l_1 \left(\frac{A-B}{A-1} \frac{1}{\ln \frac{A}{B}} + \frac{2AC^2}{B-1} \right). \quad (4-61)$$

При изменении r_2 можно найти минимум тепловой проводимости; мощность, необходимая для поддержания температуры, также будет минимальна.

Обозначим $Y_T/4\pi \lambda l_1 = f_1(A)$, где $f_1(A)$ — нормированная тепловая проводимость цилиндрического термостата, данные для расчета которой приведены в табл. 4-3. Определим, например, мощность, необходимую для поддержания температуры $\theta_1 = 50^\circ \text{C}$ (при температуре окру-

Данные для расчета цилиндрического термостата [Л. 4-15]

B	C	Нормированная тепловая проводимость f_1 (A) при значениях параметра A							
		1,05	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,2	2,7
1,1	1	45,8	30	29,8	31,3	34,3	37,8	45,3	55,0
	1/2	27,1	15	11,8	10,1	10,3	10,8	12,3	14,6
	1/3	24,1	13,3	8,50	6,20	5,80	5,79	6,22	7,05
	1/4	23,1	11,7	7,30	4,85	4,45	4,05	4,08	4,42
	1/6	22,4	10,5	6,47	3,88	3,14	2,78	2,55	2,55
1,2	1	33,4	22,9	18,0	17,2	18,3	19,9	23,3	28,1
	1/2	25,2	14,7	9,0	6,70	6,30	6,35	6,88	7,83
	1/3	23,9	13,1	7,35	4,80	4,07	3,85	3,82	4,08
	1/4	23,4	12,6	6,75	4,07	3,30	2,97	2,77	2,76
	1/6	23,1	12,2	6,35	3,59	2,74	2,32	1,99	1,83
1,4	1	29,9	18,0	12,7	10,8	10,5	11,0	12,5	14,7
	1/2	26,0	13,9	8,20	5,30	4,50	4,25	4,23	4,64
	1/3	25,3	13,1	7,30	4,25	3,40	3,0	2,70	2,66
	1/4	25,0	12,8	7,03	3,90	3,00	2,56	2,17	2,00
	1/6	24,9	12,6	6,77	3,60	2,72	2,25	1,79	1,53
1,6	1	29,9	17,3	10,9	8,50	8,20	8,10	8,89	10,2
	1/2	27,3	14,4	7,90	5,00	4,12	3,60	3,39	3,48
	1/3	26,8	13,8	7,40	4,25	3,36	2,77	2,37	2,23
	1/4	26,7	13,6	7,20	4,02	3,08	2,48	1,99	1,74
	1/6	26,5	13,5	7,11	3,84	2,88	2,27	1,76	1,48
1,8	1	30,5	17,2	10,5	7,50	6,95	6,83	7,17	8,05
	1/2	28,6	15,0	8,25	4,90	3,89	3,38	3,05	2,99
	1/3	28,2	14,6	7,80	4,42	3,40	2,68	2,28	2,05
	1/4	28,1	14,5	7,60	4,23	3,20	2,49	2,00	1,72
	1/6	28,0	14,4	7,58	4,10	3,06	2,36	1,82	1,49
2,0	1	31,8	17,2	10,4	7,10	6,23	6,03	6,16	6,78
	1/2	30,2	15,6	8,60	5,00	3,90	3,33	2,86	2,73
	1/3	29,9	15,3	8,30	4,56	3,45	2,83	2,25	1,28
	1/4	29,8	15,1	8,15	4,47	3,28	2,66	2,02	1,73
	1/6	29,6	15,0	8,07	4,30	3,16	2,53	1,86	1,53
2,3	1	33,6	17,9	10,4	6,6	5,70	5,35	5,20	5,63
	1/2	32,4	16,6	8,91	5,2	3,95	3,29	2,65	2,52
	1/3	32,2	16,4	8,66	4,74	3,57	2,89	2,18	1,94
	1/4	32,1	16,3	8,58	4,64	3,39	2,75	2,04	1,74
	1/6	32,0	16,2	8,51	4,56	3,31	2,66	1,90	1,59

жающей среды $\theta_2=20^\circ\text{C}$) внутри цилиндрического термостата с размерами термостатируемого объема $r_1=5\text{ см}$, $l_2=6\text{ см}$ и наружными размерами $r_2=8\text{ см}$, $l_2=9\text{ см}$. В качестве теплоизоляционного слоя выбираем

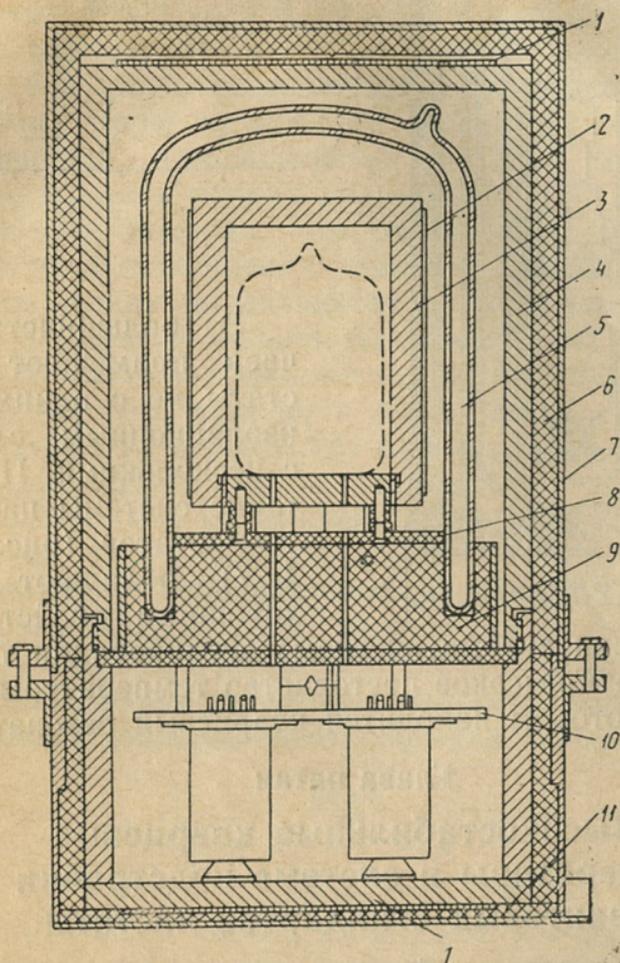


Рис. 4-26. Термостат.

1 — обмотка подогрева внешнего термостата; 2 — мост и обмотка подогрева внутреннего термостата; 3 — цилиндр из красной меди; 4 — дюралюминиевый цилиндр; 5 — сосуд Дьюара; 6 — слой войлока; 7 — цилиндр из нержавеющей стали; 8 — соединение медного цилиндра с пробковым слоем; 9 — пробковый слой; 10 — высокостабильный генератор; 11 — гетинаксовая пластина.

фетр, коэффициент теплопроводности которого равен $0,02\text{ ккал/град}\cdot\text{ч}$. Подставляя численные значения, получим $A=1,6$; $B=1,5$; $C=0,42$; $Y_T=0,053\text{ ккал/град}\cdot\text{ч}$. Мощность нагрева термостата составляет $W=1,16Y_T\times\Delta\theta=6,15\text{ вт}$.

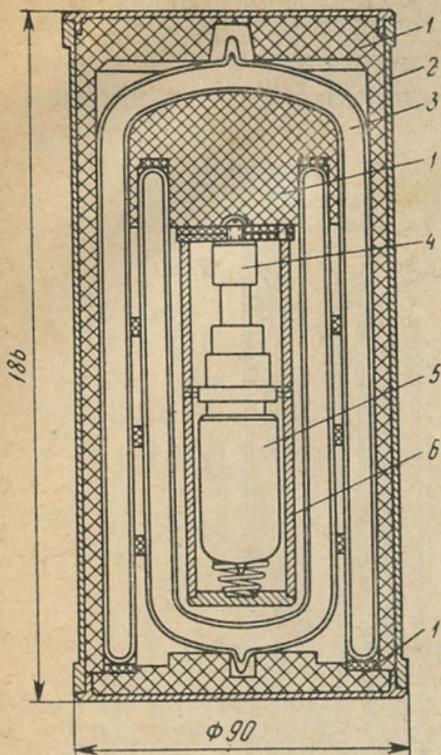


Рис. 4-27. Термостат с двумя сосудами Дьюара.

1 — пенопласт; 2 — алюминиевый стакан; 3 — первый сосуд Дьюара; 4 — второй сосуд Дьюара; 5 — кварцевый резонатор; 6 — красномедный стакан.

В большинстве случаев применяют термостаты не с одним теплоизоляционным слоем, а с несколькими. При этом такие системы пассивных термостатов (рис. 4-26 и 4-27) обладают весьма хорошими свойствами и позволяют при автоматическом регулировании температуры получать высокое постоянство температуры внутри объема, в котором находится кварцевый резонатор.

Глава пятая

Высокостабильные кварцевые генераторы в системе подстройки квантовых стандартов частоты

5-1. Принципы работы квантовых генераторов

Индукцированное излучение. В последние годы широкое применение получили системы с отрицательным коэффициентом поглощения, в которых поток излучения не ослабляется, а усиливается. Отрицательный коэффициент поглощения получают за счет актов индукцированного (вынужденного) испускания, на возможность существования которого указал еще в 1916 г. Эйнштейн.

Атомы, молекулы или ионы под действием проходящего через среду излучения переходят с более высокого энергетического уровня на более низкий. Эти переходы совершаются на фоне спонтанных (самопроизвольных) переходов. Фотон, пролетающий мимо возбужденной ча-

стицы, которая находится на верхнем уровне, сокращает время ее жизни в возбужденном состоянии и переводит на нижний уровень. При этом частица испускает фотон, тождественный фотону, стимулировавшему переход. Затем два фотона, движущиеся в одном направлении и встречающиеся на своем пути возбужденные частицы, вызывают испускание новых фотонов. Процесс продолжается, и в среде возникает нарастающая лавина фотонов. Этому процессу мешают акты поглощения, сопровождающиеся исчезновением фотонов и переходом частиц с нижнего уровня на верхний.

Эйнштейн показал, что вероятности вынужденного испускания и поглощения равны, и поэтому условие нарастания лавины определяется соотношением числа атомов на верхнем и нижнем энергетических уровнях. Так как число актов испускания пропорционально числу частиц на верхнем уровне, а число актов поглощения — числу частиц на нижнем, то для создания фотонной лавины необходимо, чтобы на верхнем уровне частиц было больше, чем на нижнем. Тогда акты вынужденного испускания будут преобладать над актами поглощения.

Понятие об отрицательной абсолютной температуре. При термодинамическом равновесии в замкнутой системе на нижнем уровне находится больше частиц, чем на верхнем. Отношение числа частиц на верхнем и нижнем уровнях удовлетворяет формуле Больцмана

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{-\frac{h\nu}{kT}}, \quad (5-1)$$

где n_1 , n_2 — число частиц на нижнем и верхнем уровнях; ν — частота излучения, соответствующая переходу из одного энергетического состояния E_2 в другое E_1 , $E_2 - E_1 = h\nu$; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Если $E_2 > E_1$, то $n_2/n_1 < 1$, т. е. $n_1 > n_2$ при любой температуре $T > 0$.

В 1940 г. В. А. Фабрикант показал, что можно создать неравновесные условия, при этом будет иметь место такое распределение частиц по энергетическим уровням, которое позволяет реализовать среду с отрицательным коэффициентом поглощения. Для этого надо возбуждать частицы среды, переводя их на верхний энергетический уровень, или убирать частицы с нижнего уровня. Для поддержания среды в возбужденном со-

стоянии к ней необходимо подводить энергию, часть которой превращается в энергию вынужденного испускания, что приводит к усилению излучения. Речь идет, таким образом, об открытой системе, с непрерывной «подкачкой» энергии, что приводит к возникновению инверсной заселенности уровней ($n_2 > n_1$). Это неравновесное состояние является стационарным, т. е. число частиц, населяющих уровни, не зависит от времени.

Для описания таких неравновесных систем вводится понятие отрицательной абсолютной температуры. При $E_2 > E_1$ и $n_2 > n_1$ из соотношения (12-1) получим $T < 0$.

Общие принципы генерирования частоты. В 1951 г. предложен метод усиления электромагнитных волн, основанный на индуцированном излучении. Этот метод особенно эффективен в области ультракоротких радиоволн, соответствующих переходам между весьма близкими энергетическими уровнями, и реализуется в квантовых генераторах и усилителях. Квантовые генераторы играют важную роль в системах, требующих точного поддержания частоты, и в эталонах частоты и времени.

В квантовых генераторах незатухающие колебания в объемных резонаторах поддерживаются вследствие индуцированного излучения квантов электромагнитной энергии возбужденными молекулами, атомами, ионами и ядрами. Частота излучения определяется разностью между двумя невырожденными энергетическими уровнями: $\nu = (E_2 - E_1)/h$. С помощью механизма «накачки» энергии система приводится в неравновесное состояние, при котором на верхнем уровне находится значительно больше частиц, чем на нижнем. В этом состоянии изолированная система может существовать длительное время. Однако в результате воздействия электромагнитного поля она излучает, передавая избыточную энергию вынуждающему полю.

Для возникновения генерации необходимо, чтобы мощность индуцированного излучения превышала мощность потерь в генераторе. Это условие ограничивает минимальную разность числа частиц в единице объема $n_2 - n_1$, находящихся на верхнем и нижнем энергетических уровнях. Для квантового генератора условие самовозбуждения записывается в виде

$$n_2 - n_1 > \frac{\hbar \Delta \omega}{8\pi^2 Q |d|^2} \cdot \quad (5-2)$$

где $\Delta\omega$ — ширина линии излучения квантового перехода; d — матричный элемент дипольного момента перехода; Q — добротность резонатора.

Спектральная ширина линии излучения квантового генератора является весьма узкой, поэтому он обладает высокой степенью монохроматичности.

Квантовый генератор представляет собой систему, находящуюся в состоянии с отрицательной температурой; система помещается в резонатор, при этом определенные устройства обеспечивают возбуждение частиц, их сортировку, вывод излучения из резонатора, детектирование излучения и т. п.

5-2. Принципиальное устройство квантовых генераторов

Цезиевый генератор. Коллимированный пучок атомов цезия движется внутри вакуумной системы, давление в которой составляет 10^{-7} — 10^{-8} мм рт. ст. *. Проходя через магнитное поле с большим градиентом, атомы цезия сортируются на компоненты, соответствующие различным состояниям энергии атомов (рис. 12-1). Затем

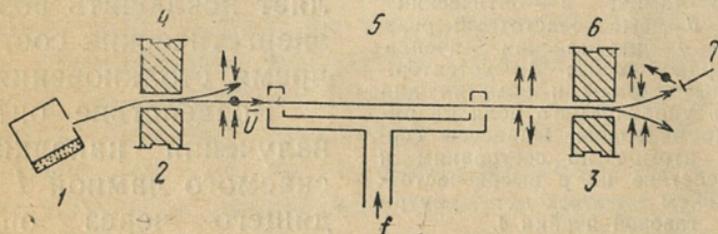


Рис. 5-1. Цезиевый генератор.

1 — источник атомного пучка; 2 — селектор состояний; 3 — анализатор состояний; 4 — первый магнит; 5 — пространство взаимодействия; 6 — второй магнит; 7 — детектор.

Магнитные экраны для устранения внешних полей и проводники с током для создания управляемого поля в пространстве взаимодействия на рисунке не показаны.

атомы цезия пропускаются через волновод, в котором они взаимодействуют с его полем.

При выполнении описанных выше условий в цезиевом пучке осуществляются резонансные переходы атомов. Длительность времени взаимодействия, от которой зависит ширина спектральной линии квантового генератора,

* Все узлы генераторов (рис. 5-1—5-3) помещаются в вакуумные камеры.

определяется длиной устройства и тепловой скоростью атомов.

Для обнаружения резонанса пучок атомов цезия пропускается через второй магнит с большим градиентом поля. Атомы, совершившие переходы, отклоняются к детектору, который представляет собой нагретую металлическую ленточку. При соприкосновении с поверхностью металла атомы цезия ионизируются. Образующийся ток усиливается в электронном умножителе, что дает возможность регистрировать сигнал, обусловленный резонансом.

Газонаполненная резонансная ячейка. Атомы рубидия, испытывающие резонансные переходы, медленно диффундируют в атмосфере буферного газа, взаимодействуя с полем высокочастотного объемного резонатора (рис. 5-2).

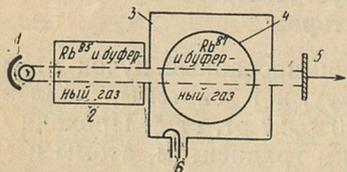


Рис. 5-2. Газонаполненная резонансная ячейка.

1 — Rb^{87} -лампа; 2 — оптический фильтр; 3 — высокочастотный резонатор; 4 — резонансная ячейка с буферным газом; 5 — детектор. Магнитные экраны и обмотки для создания управляемого поля на рисунке не показаны. Процессы сортировки атомов по состояниям и взаимодействие их с высокочастотным полем происходят внутри газовой ячейки 4.

что процесс сортировки атомов по состояниям происходит в той же резонансной ячейке 4, где атомы с отобранными состояниями взаимодействуют с высокочастотным полем объемного резонатора 3.

Атомы рубидия, которые находятся в резонансной ячейке, поглощают оптическое излучение возбужденных атомов Rb^{87} -лампы и переходят в возбужденное состояние. Применение оптического фильтра позволяет создать условия, при которых излучение от Rb^{87} -лампы будут поглощать лишь те атомы рубидиевой ячейки, которые находятся на нижнем энергетическом уровне.

После многократного повторения этого процесса в отсутствие сверхвысокочастотных переходов все атомы Rb^{87} перекачиваются из нижнего состояния в верхнее.

При возникновении в резонаторе сигнала, имеющего частоту резонансного перехода атомов, индуцируются переходы, которые обнаруживаются фотодетектором по изменению степени поглощения оптического излучения накачки.

Квантовый генератор на рубидиевой газовой ячейке. Блок-схема квантового генератора на рубидиевой газовой ячейке содержит те же узлы, что и блок-схема резонансной ячейки с буферным газом, но отсутствует устройство для оптической индикации. Основное различие заключается в том, что в квантовом генераторе на рубидиевой газовой ячейке атомы, находящиеся в верхнем состоянии, могут с большей эффективностью совершать СВЧ-переходы. При этом энергия, излученная атомами, превышает энергию потерь в резонаторе, и наступает самовозбуждение генератора.

Водородный генератор. Под действием электрического разряда в источнике происходит диссоциация молекулярного водорода. Формирование пучка атомов водорода и выделение верхнего состояния осуществляются, как и в цезиевом генераторе.

Отсортированные атомы водорода попадают в отверстие резонансной ячейки, на внутренние стенки которой нанесено специальное покрытие (например, тефлон); при этом в результате столкновения атома со стенкой ячейки не происходит изменения состояния атома, что весьма важно для работы водородного генератора.

Атомы водорода взаимодействуют с полем ВЧ-резонатора в течение времени, когда они находятся в резонансной ячейке. Если поток влетающих атомов оказывается достаточным для превышения энергии индуцированного излучения над потерями энергии в резонаторе, то возникает самовозбуждение генератора. Столкновения атомов водорода со стенкой приводят к смещению частоты генератора. Измерения показали, что для диаметра накопительной ячейки 15 см, находящейся при температуре 40°C , относительный сдвиг частоты генератора вследствие столкновений равен $-(2,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}$. Воспроизводимость водородного генератора составляет несколько единиц на 10^{-13} и не зависит от его конструкции.

Молекулярный генератор. Молекулярный генератор состоит из трех основных узлов: источника молекулярного пучка; сортирующего устройства, обеспечивающего

образование у молекул газового пучка состояния с отрицательной температурой, и высокодобротного объемного резонатора с собственной частотой, весьма близкой к резонансной частоте спектральной линии молекулярного перехода. Устройство помещается в металлическую вакуумную систему, в которой поддерживается давление порядка 10^{-6} мм рт. ст. В процессе работы молекулярного генератора на NH_3 газообразный аммиак подается в камеру, где поддерживается давление ~ 1 мм рт. ст.

Формирование молекулярного пучка осуществляется при помощи мелкой металлической сетки или набора тонких капилляров. Проходя через них, молекулы NH_3 вылетают в вакуумную систему. Для формирования более узкого пучка на пути молекул устанавливается диафрагма с малым отверстием, которая охлаждается жидким азотом (температура его кипения -196°C), при этом попавшие на диафрагму молекулы «прилипают» к ней.

В качестве системы, сортирующей молекулы, применяют квадрупольный, шести- или восьмипольный конденсаторы длиной ~ 10 см, на которые подается напряжение 20—30 кв.

Объемный резонатор изготавливается обычно из инвара, внутренние стенки которого покрываются серебром, нанесенным гальваническим путем. Добротность объемного резонатора составляет около 10^3 . С помощью специальных винтов осуществляется подстройка частоты резонатора в небольшом диапазоне вблизи 50 Мгц. Впуск молекулярного пучка в резонатор происходит через специальные волноводы, поэтому потери на излучение малы. Для каждого значения добротности объемного резонатора необходимо отрегулировать интенсивность молекулярного пучка и напряжение на сортирующей системе таким образом, чтобы число возбужденных молекул было достаточным для выполнения условия самовозбуждения.

5-3. Системы пассивных и активных квантовых генераторов

Система пассивного контроля частоты высокостабильных кварцевых генераторов основана на резонансных переходах, протекающих в квантовых генераторах, и осуществляется воздействием через обратную связь

радиоэлектронной схемы (рис. 5-3). Квантовые генераторы обладают весьма высокой долговременной стабильностью частоты и спектральной чистотой колебаний.

Кратковременная стабильность квантовых генераторов зависит исключительно от свойств кварцевого генератора, поэтому и применяется сверхтонкий резонанс на микроволнах для контроля и подстройки частоты кварцевого резонатора.

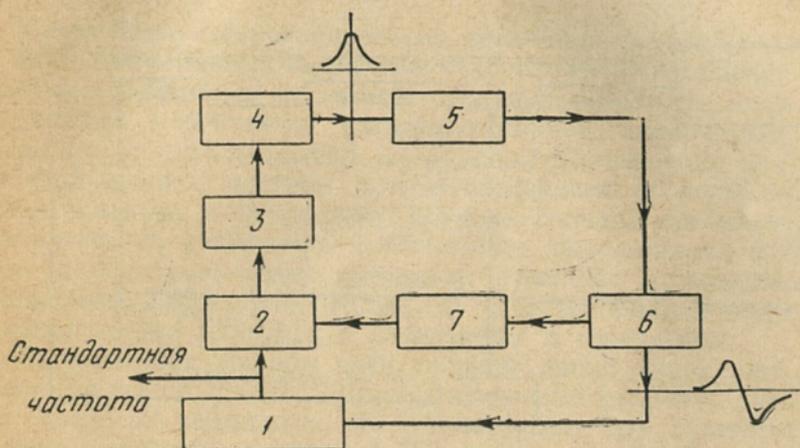


Рис. 5-3. Блок-схема генератора, стабилизированного атомным резонатором.

1 — кварцевый генератор (стабилизируемый); 2 — фазовый модулятор; 3 — умножитель частоты; 4 — атомный резонатор; 5 — усилитель сигнала резонанса; 6 — фазовый детектор; 7 — модулирующий генератор.

Сущность метода стабилизации частоты кварцевого генератора, при котором в цепь обратной связи помещается газовая ячейка, заключается в следующем. Частота высокостабильного кварцевого генератора 1 подается на фазовый модулятор 2 для получения небольшой частотной модуляции, затем на умножитель частоты 3, а с него — на резонатор 4. После прохождения атомного резонатора микроволновый сигнал 5 усиливается и модулированный сигнал подается на синхронный фазовый детектор 6, на выходе которого возникает положительное или отрицательное напряжение: это зависит от того, на каком склоне линии микроволнового резонанса находится частота кварцевого генератора. Для фиксации частоты последнего на частоте микроволнового резонанса напряжение выбранной полярности фазового детектора подается через усилитель и систему серворегулирования в соответствующей фазе на элемент, регулирующий частоту 7.

Система пассивного контроля частоты кварцевых генераторов применяется в рубидиевых и цезиевых квантовых генераторах. Этот метод контроля частоты пригоден для любых генераторов, стабилизируемых с помощью атомного резонанса. Динамика цепи обратной связи контроля частоты достаточно сильно влияет на характеристики квантового генератора. Так, например, время срабатывания цепи контроля определяет длитель-

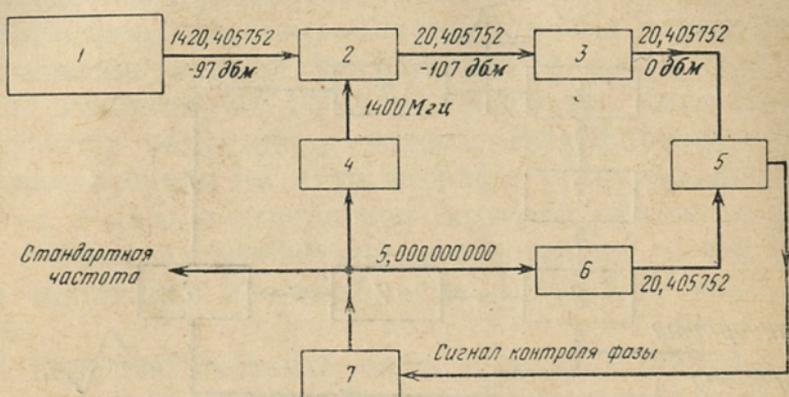


Рис. 5-4. Блок-схема стандарта частоты на основе квантового водородного генератора.

1 — опорный квантовый водородный генератор; 2 — смеситель — 10 дБ; 3 — усилитель промежуточной частоты +107 дБ; 4 — умножитель частоты. $\times 280$; 5 — фазовый детектор; 6 — синтезатор частоты; 7 — ведомый генератор (кварцевый). Частота указана в мегагерцах.

ность существования ошибки частоты кварцевого генератора перед корректировкой по атомному резонансу. При интервалах времени, длительность которых мала по сравнению со временем срабатывания системы контроля, стабильность частоты генератора та же, что и у нестабилизированного кварцевого генератора. При интервалах времени, превышающих время срабатывания системы, стабильность частоты в основном определяется стабильностью частоты резонансного перехода.

В системах активного контроля частоты [водородный, рубидиевый и молекулярный генератор (рис. 5-4)] непосредственным источником сигнала являются квантовые переходы в атомах или молекулах. Динамика систем пассивного и активного контроля частоты совершенно различна. В случае пассивного резонатора частота генератора согласуется с частотой резонансного перехода. В системе активного контроля фаза кварцевого генератора привязана к фазе квантового генератора. При этом

отсутствует необходимость в модуляции частоты сигнала, а скорость срабатывания системы контроля определяется коэффициентом усиления и шириной полосы, которые выбираются исходя из уровня добавочного шума, вносимого системой.

5-4. Естественная ширина спектральной линии кварцевого резонатора и генератора

Флуктуации макроскопических величин пьезоэлектрического кварца. Высокостабильные кварцевые генераторы применяются не только в системе подстройки квантовых стандартов частоты, но и как самостоятельные компоненты радиоэлектронной аппаратуры. В связи с этим имеет смысл оценить возможности повышения кратковременной стабильности частоты и монохроматичности колебаний кварцевого резонатора и генератора. Верхняя граница стабильности пьезоэлектрического резонатора и генератора определяется флуктуационными процессами, обусловленными атомной структурой вещества и тепловым движением частиц, т. е. естественной шириной спектральной линии кварцевого резонатора и генератора.

Естественная ширина спектральной линии кварцевого резонатора определяется флуктуациями физических величин, характеризующих свойства кристалла. В радиотехнике не существует строго монохроматических колебаний, что объясняется [Л. 5-2] статистической природой физических явлений. Флуктуации $\Delta\eta = \eta - \bar{\eta}$ в части v полного объема V какой-либо макроскопической физической величины η , зависящей от объема V и температуры T , определяются формулой [Л. 5-3]

$$\overline{\Delta\eta^2} = k \frac{V}{v} \left[-T \frac{\left(\frac{\partial\eta}{\partial v}\right)_T}{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T} + T^2 \frac{\left(\frac{\partial\eta}{\partial T}\right)_v}{\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_v} \right], \quad (5-3)$$

где k — постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж · град⁻¹), $(\partial E / \partial T)_v = c_v$ — удельная теплоемкость.

Используя в качестве статистически независимых термодинамических переменных величины l , ρ и c , получаем:

$$\overline{\Delta\omega^2} = \left(\frac{\partial\omega}{\partial l}\right)_{\rho, c}^2 \overline{\Delta l^2} + \left(\frac{\partial\omega}{\partial\rho}\right)_{l, c}^2 \overline{\Delta\rho^2} + \left(\frac{\partial\omega}{\partial c}\right)_{l, \rho}^2 \overline{\Delta c^2}, \quad (5-4)$$

где $\overline{\Delta\omega^2}$, $\overline{\Delta l^2}$, $\overline{\Delta\rho^2}$, $\overline{\Delta c^2}$ — средние квадраты флуктуации частоты, длины, плотности и упругой постоянной соответственно. Подставив выражения

$$\left(\frac{\partial\omega}{\partial l}\right)_{\rho, c}^2 \approx \frac{\omega^2}{l^2}; \quad \left(\frac{\partial\omega}{\partial\rho}\right)_{l, c}^2 \approx \frac{\omega^2}{\rho^2}$$

и

$$\left(\frac{\partial\omega}{\partial c}\right)_{l, \rho}^2 \approx \frac{\omega^2}{c^2}$$

в (5-4), получим:

$$\frac{\overline{\Delta\omega^2}}{\omega^2} \approx \frac{\overline{\Delta l^2}}{l^2} + \frac{\overline{\Delta\rho^2}}{\rho^2} + \frac{\overline{\Delta c^2}}{c^2}. \quad (5-5)$$

При абсолютной температуре 300°K , $\rho = 2,65 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $c_v = 7 \text{ Дж}\cdot\text{град}^{-1}\cdot\text{см}^{-3}$, $V \approx 1 \text{ см}^3$; $l \approx 5 \text{ см}$; $c = 8,6 \cdot 10^6 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$; $dc/dT = 2 \cdot 10^2 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{град}^{-1}$;

$$b_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_T = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{н}^{-1}; \quad V \approx v;$$

$$\frac{1}{l^2} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_v^2 = \alpha^2 \approx 10^{-12} \text{ град}^{-2}.$$

После подстановки этих величин в (12-5) найдем, что

$$\frac{\overline{\Delta c^2}}{c^2} \gg \frac{\overline{\Delta \rho^2}}{\rho^2} \gg \frac{\overline{\Delta l^2}}{l^2},$$

и поэтому

$$\frac{\overline{\Delta\omega^2}}{\omega^2} \approx \frac{\overline{\Delta c^2}}{c^2} = 10^{-28}.$$

Функция временной корреляции $g(\tau)$ собственной частоты кварцевого резонатора равна:

$$g(\tau) = \Delta\omega_0(t) \Delta\omega_0(t + \tau) = \overline{\Delta\omega^2} e^{-\delta\tau} \cos \omega_0\tau, \quad (5-6)$$

где δ — логарифмический декремент затухания;

ω_0 — собственная частота колебаний.

Случайная величина изменяется тем медленнее, чем сильнее временная корреляция.

Для вычисления естественной ширины спектральной линии кварцевого резонатора используем понятие спектральной плотности $F(\omega)$, которая связана с функцией временной корреляции следующим соотношением:

$$g(\tau) = \int_0^\infty F(\omega) \cos \omega\tau d\omega;$$

$$F(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty g(\tau) \cos \omega\tau d\tau. \quad (5-7)$$

Подставляя $g(\tau)$ в (5-7), получаем:

$$F(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \overline{\Delta\omega^2} e^{-\delta\tau} \cos \omega_0\tau \cos \omega\tau d\tau =$$

$$= \frac{\overline{\Delta\omega^2}}{\pi} \left[\frac{\delta}{\delta^2 + (\omega - \omega_0)^2} + \frac{\delta}{\delta^2 + (\omega + \omega_0)^2} \right].$$

Если $(\omega - \omega_0)^2 \approx (\omega + \omega_0)^2 \approx \omega_0^2$ и $\delta^2 \ll \omega_0^2$, то

$$F(\omega) \approx \frac{2\delta}{\pi} \frac{\overline{\Delta\omega^2}}{\omega_0^2}. \quad (5-8)$$

При флуктуации собственной частоты кварцевого резонатора газовая нестабильность описывается уравнением со слабовыраженной нелинейностью

$$\ddot{x} + (\omega_0 + \Delta\omega)^2 x = \mu f(x, \dot{x}); \quad (5-9)$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \mu f(x, \dot{x}) - 2\omega_0 \Delta\omega x, \quad (5-9')$$

где μ — малый параметр.

Второй член в правой части уравнения (5-9'), так же как и первый, достаточно мал (с порядком малости $\Delta\omega/\omega$), и, следовательно, уравнение можно решать методом малого параметра. Полагая, что $\mu f(x, \dot{x}) = \alpha x - \beta \dot{x}^3$, и подставляя в (5-9'), получаем:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \alpha x - \beta \dot{x}^3 - 2\omega_0 \Delta\omega x. \quad (5-10)$$

Решение уравнения (12-10) имеет следующий вид:

$$x = Q(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (5-11)$$

где $Q(t)$, $\varphi(t)$ — случайные функции времени, медленные по сравнению с $\omega_0(t)$.

При помощи метода Ван дер Поля [Л. 5-4, 5-11] переходим от точных уравнений к укороченным и после усреднения по быстропеременным членам имеем:

$$\dot{Q} = Q \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{3}{8} \beta \omega_0^2 Q^2 + \frac{1}{2} F'' \right); \quad (5-12)$$

$$\dot{\varphi} = \Delta\omega + \frac{1}{2} F^\perp, \quad (5-13)$$

где F'' , F^\perp — составляющие флуктуации собственной частоты.

Проведя обычные операции, определим естественную ширину спектральной линии $\sqrt{\overline{\omega^2}/\omega_0} \approx 10^{-18}$ (примерно при 300°K). С понижением температуры до 2°K ширина спектральной линии уменьшится до величины $\sqrt{\overline{\Delta\omega^2}/\omega_0} \approx 10^{-20}$.

Электрические тепловые флуктуации в кварцевых генераторах с фазовой автоподстройкой. Предположим, что на вход автоколебательной системы подается стационарная случайная функция

$$u(t) = U_0 \cos[\omega t + \varphi(t)], \quad (5-14)$$

где U_0 — амплитуда;

$\varphi(t)$ — функция времени, медленная по сравнению с ωt .

Уравнение для подстраиваемого генератора напишем в виде

$$\dot{\varphi}(t) = \Delta\omega + S\xi(t), \quad (5-15)$$

где $\Delta\omega$ — статическая расстройка относительно номинальной частоты;

S — крутизна «электронной» настройки;

$\xi(t)$ — управляющее напряжение на реактивной лампе.

Первый член правой части этого уравнения учитывает нестабильность неподстроенного мостового генератора. На выходе моста

получается напряжение $v(t)$, пропорциональное отклонению частоты порядка 10^{-14} . Для кварцевого генератора крутизна подстраиваемого генератора от номинальной частоты ω_0 . С учетом инерционности кварцевого резонатора, входящего в мост, и без учета постоянной интегрирования детектора, который предполагает на выходе моста, уравнение последнего запишется в следующей форме:

$$\tau_0 \dot{v}(t) + v(t) = \kappa V_0 \tau_0 \dot{\varphi}(t), \quad (5-1)$$

где τ_0 — постоянная времени кварцевого резонатора

$$\tau_0 = \frac{2\pi}{\delta\omega_0};$$

κ — коэффициент передачи моста;

V_0 — напряжение, подаваемое на мост.

Отметим, что шумы на входе моста не учитываются. Как можно показать, их учет не приводит к появлению диффузии фазы подстроенного генератора, а вызывает лишь дополнительную фазовую модуляцию около среднего значения.

Предполагая, что постоянные времени цепей усилителя достаточно малого напряжения $\tau \ll \tau_0$, можно написать:

$$\xi(t) = K [v(t - \tau) + w(t)], \quad (5-17)$$

где K — коэффициент усиления;

τ — запаздывание усилителя, равное сумме всех постоянных времени RC-цепочек усилителя;

$w(t)$ — шумовое напряжение, приведенное ко входу усилителя.

Подставляя функцию $\xi(t)$ из (5-15) в (5-17) и дифференцируя полученное выражение, а затем проделав преобразования в (5-16), получим уравнение

$$\tau_0 \ddot{\varphi} + \dot{\varphi} + \kappa V_0 \tau_0 K S \dot{\varphi}(t - \tau) = \tau_0 \Delta \dot{\omega} + \Delta \omega + \tau_0 K S w(t) + \tau_0 K S w(t - \tau). \quad (5-18)$$

Так как $\dot{\varphi}(t - \tau) = \dot{\varphi}(t) - \ddot{\varphi}(t)\tau$, то уравнение (12-18) примет следующий вид:

$$(\tau_0 - \tau A) \ddot{\varphi} + (1 + A) \dot{\varphi} = \Delta \omega + \tau_0 K S \dot{\omega} + K S w, \quad (5-18')$$

где $A = \kappa V_0 \tau_0 K S$ — коэффициент регулирования автоколебательной системы с фазовой подстройкой, который можно пояснить следующим образом: если неподстроенный генератор имел статическую расстройку относительно номинальной частоты, равную $\Delta\omega$, то при замкнутой обратной связи эта расстройка уменьшается в $(1+A)$ раз, т. е.

$$\dot{\varphi} = \frac{\Delta\omega}{1+A}.$$

Из уравнения (5-18') следует, что замкнутая система подстроенного генератора устойчива только в том случае, когда $\tau_0 > \tau A$.

Оценим величину коэффициента усиления K , считая, что подстраиваемый высокостабильный кварцевый генератор имеет относительную нестабильность $\Delta\omega/\omega_0 \approx 10^{-10}$ и коэффициент регулирования $A = 10^4$, что обуславливает результирующую относительную неста-

бильность порядка 10^{-14} . Для кварцевого генератора крутизна настройки $S \approx (10^{-5} - 10^{-6})\omega_0$. Если $\kappa \approx 0,1$, $V_0 \approx 1$ в, то $K \approx 10^7$, то $K = A/\kappa\tau_0 V_0 S = 10^8 A/2Q\kappa V_0 \approx 5 \cdot 10^4$. Определим влияние шума на стабильность частоты подстроенного генератора, считая задачу статической*; в этом приближении уравнения (5-18') получим:

$$\dot{\varphi} = \frac{\Delta\omega}{1+A} + \frac{KS}{1+A} w \approx \frac{\Delta\omega}{A} - \frac{w}{\tau\kappa V_0}; \quad (5-19)$$

$$\frac{\sqrt{\dot{\varphi}^2}}{\omega_0} = \frac{1}{\tau_0 \kappa V_0 \omega_0} \sqrt{\frac{S_y}{t}}, \quad (5-20)$$

$S_y = 4kTR_{ш}\Delta f$ — спектральная плотность шума на входе усилителя;

$R_{ш}$ — эквивалентное шумовое сопротивление.

Подставляя в (5-20) численные значения ($T = 300^\circ \text{K}$, $R_{ш} \approx 10^3 \text{ ом}$, $T = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1}$, $\Delta f = 0,06 \text{ гц}$), получаем при $\omega_0 = 2\pi f = 6,28 \cdot 10^6 \text{ гц}$; $S_y = 100,8 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} \cdot \text{ом} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Естественная ширина спектральной линии кварцевого генератора, обусловленная тепловыми флуктуациями, при $T = 300^\circ \text{K}$ составляет

$\dot{\varphi}^2/\omega_0 \approx 4 \cdot 10^{-16}$. С понижением температуры до $T = 2^\circ \text{K}$ спектральная плотность уменьшится до $S_y = 41,4 \cdot 10^{-23} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 67,2 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{ом} \cdot \text{сек}^{-1}$, а следовательно, $\sqrt{\dot{\varphi}^2/\omega_0} \approx 10^{-18}$ (при $T = 2^\circ \text{K}$ $Q = 120 \cdot 10^6$).

Отметим, что перспективным является использование двухмостовых схем кварцевых генераторов с фазовой автоподстройкой, предложенных А. Г. Смагиным и Г. А. Елкиным, в которых резонатор является элементом внутреннего моста и стабилизируется при комнатной температуре или при температуре $4,22^\circ \text{K}$.

5-5. Перспективы повышения кратковременной и долговременной стабильности частоты кварцевых генераторов при обычных и низких температурах

Теоретическое рассмотрение вопроса о повышении стабильности частоты кварцевых генераторов приводит к выводу, что имеются еще не реализованные возможности даже при температурах порядка $320 - 350^\circ \text{K}$ ($47 - 77^\circ \text{C}$), и можно ожидать получения нестабильности и старения порядка 10^{-12} за сутки [Л. 1-8]. В настоящее время получены результаты лучше, чем прогнозировалось в [Л. 1-8].

В работе [Л. 5-1] сообщается, что средний относительный уход частоты кварцевых генераторов частотой $2,5 \text{ Мгц}$, используемых для стабилизации передатчиков, применяемых ВМС США и Военно-

* При расчете долговременной стабильности это допущение не вносит существенной ошибки.

морской обсерваторией США, составляет несколько единиц 10^{-13} за сутки.

Полученные результаты могут быть существенно улучшены, если кварцевый резонатор поместить в криостат с жидким гелием (рис. 5-5). Как показали исследования [Л. 5-5]*, добротность кварцевых резонаторов частотой 1,0 Мгц возрастает с $4 \cdot 10^6$ при комнатной температуре до $86 \cdot 10^6$ при температуре $4,2^\circ \text{K}$. В работах других авторов получены величины добротности порядка $50 \cdot 10^6$ [Л. 5-6] и $55 \cdot 10^6$ [Л. 5-7].

Добротность кварцевых резонаторов частотой 1 Мгц с зазорами конструкции А. Г. Смагина увеличивается до $100-120 \cdot 10^6$ при температуре $2,2^\circ \text{K}$ (при комнатной температуре $Q \approx 7 \div 9 \cdot 10^6$) [Л. 5-8]. Более поздними исследованиями было показано, что при температуре $2,2^\circ \text{K}$ добротность этих резонаторов имеет величину $700 \cdot 10^6$ на 5-й гармонике и превосходит добротность атомно-молекулярных генераторов, определенную по ширине спектральной линии. При медленном изменении амплитуды пьезоэлектрического тока происходит изменение генерируемой частоты резонатора, обусловленное влиянием температуры кристалла. При $T=2^\circ \text{K}$ эквивалентное активное сопротивление $R_1=10-14 \text{ ом}$, общая поверхность $S=25,6 \text{ см}^2$, $k=0,9$, $I_0=10^{-6} \text{ а}$, $\delta=\Delta I_0/I_0=0,001$, тогда изменение температуры, вычисленное по формуле, связывающей изменение температуры кристалла с изменением тока,

$$\Delta T_0 = \frac{R_1 I_0^2 \delta}{4k\alpha S T_0^3}, \quad (5-21)$$

имеет величину порядка 2×10^{-6} град.

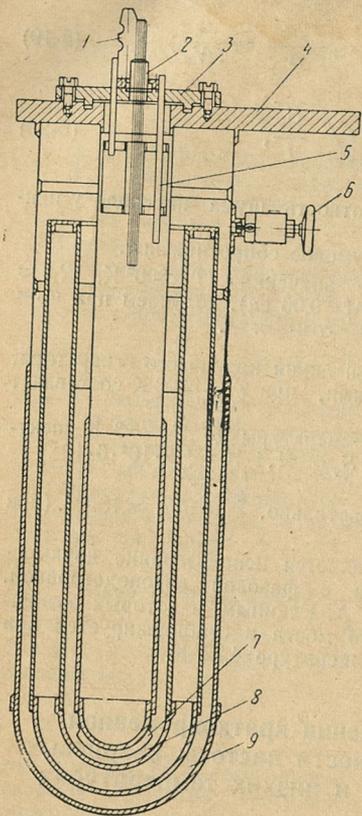


Рис. 5-5. Металлический сосуд Дьюара для гелия.

1 — один из штуцеров; 2 — вводы для резонаторов и термометров; 3, 4 — фланец и плита из нержавеющей стали; 5 — азотная ловушка; 6 — высоковакуумный вентиль; 7 — адсорбент; 8 — гелиевый сосуд; 9 — азотный сосуд.

* Сообщение о результатах исследований добротности при низких температурах и создании низкотемпературного генератора сделано А. Г. Смагиным в апреле 1958 г. на конференции по стабилизации частоты.

Кварцевые резонаторы с экстремумами температурно-частотных характеристик при температурах $2-4^\circ \text{K}$ и $75-79^\circ \text{K}$ ($\text{ТКЧ} \approx 10^{-9}-10^{-10}$) имеют относительное изменение частоты

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} \approx 10^{-15} - 10^{-16}.$$

При комнатных температурах медленное изменение амплитуды тока влияет на частоту много меньше, чем другие дестабилизирующие факторы. Однако при низких и сверхнизких температурах влияние нестабильности тока как дестабилизирующего фактора может быть основным. В то же время при температуре жидкого гелия использование кварцевых генераторов имеет преимущества, как показано выше, с точки зрения повышения добротности и в специальных случаях для снижения шумов в кристалле.

При разработке низкотемпературных кварцевых генераторов необходимо уделять особое внимание стабильности источника питания, его старению, а также стабильности генераторных ламп и других элементов схем и их старению. Следует отметить, что высокие результаты по стабильности и старению можно получить лишь в том случае, если схема генератора будет стабилизирована по температуре с погрешностью, не превышающей $0,01-0,001^\circ$.

Возможно термостатирование кварцевых резонаторов при температуре испаряющегося жидкого гелия ($4,2^\circ \text{K}$) с погрешностью $\pm 0,05^\circ$, а в случае автоматического регулирования давления паров гелия $\pm 0,001^\circ$. При необходимости повысить стабильность температуры в объеме, в котором находится кварц, можно использовать резонаторы конструкций А. Г. Смагина с двумя кварцевыми элементами в одном баллоне: один кварц — стабилизирующий, второй — температурный. С помощью второго кварца можно не только измерять температуру, используя его в качестве датчика, но и регулировать температуру, подключив кварц в цепь обратной связи радиоэлектронной схемы. Это дает возможность дополнительного термостатирования кварца с погрешностью, не превышающей $\pm 0,01^\circ$. Тогда температура кварцевого резонатора будет поддерживаться в термостатируемом объеме с погрешностью порядка $0,00001^\circ$.

Долговременная стабильность определяется, как указывалось ранее, процессами, протекающими на поверхности, в структуре и в местах крепления пьезоэлектрического кристалла с держателем. Разработанная технология изготовления высокочастотных кварцевых резонаторов [Л. 2-27] позволяет сводить к минимуму влияние поверхностно-структурных процессов на старение.

Согласно теореме Нернста при $T \rightarrow 0^\circ \text{K}$ энтропия как общая функция состояния вещества стремится также к нулю, т. е. $S \rightarrow 0$. При этом функциональные зависимости, связанные с температурой, асимптотически приближаются к определенному постоянному значению. Например, плотность приближается к асимптотическому значению вследствие стремления кристалла к сжатию, что приводит к более плотной упаковке атомно-ионной структуры, другими словами, к предельному сближению частиц, составляющих кристаллическую решетку. Это в одинаковой мере относится и к коэффициентам линейного расширения, определяющим геометрию кварца, и к упругим постоянным, определяющим изменение частоты резонатора в зависимости от температуры.

Есть основания полагать, что проблема старения кварцевых резонаторов может быть полностью решена путем использования низ-

ких и сверхнизких температур, при которых, по существу подходи к предельным свойствам кварцевого резонатора. Повышение добротности, уменьшение электрических тепловых колебаний, уменьшение влияния дефектов на различные процессы, происходящие в кристалле при низких температурах, — все это отодвигает принципиальную границу нестабильности генераторов, обусловленную флуктуационными явлениями в пьезоэлектрическом кварце.

В настоящее время уже созданы низкотемпературные генераторы с нестабильностью порядка 10^{-11} при температуре $4,22^\circ\text{K}$ [Л. 5-5, 5-6, 5-12].

Можно полагать, что в принципе возможно создание кварцевого генератора частоты или кварцевых часов, которые не будут уступать по долговременной стабильности атомно-молекулярным.

5-6. Сравнение характеристик кратковременной и долговременной стабильности частоты квантовых и кварцевых генераторов

В последнее время квантовый генератор на пучке молекул аммиака всесторонне исследован. Как показано в работах [Л. 5-9, 5-10], не существует путей дальнейшего улучшения его характеристик, а также нет перспективных вариантов, пригодных для серийного выпуска таких генераторов.

Квантовый генератор на пучке атомов водорода обладает наивысшей кратковременной и долговременной стабильностью порядка $2 \cdot 10^{-14}$ за сутки (рис. 5-7, 5-8), а также исключительно высокой воспроизводимостью

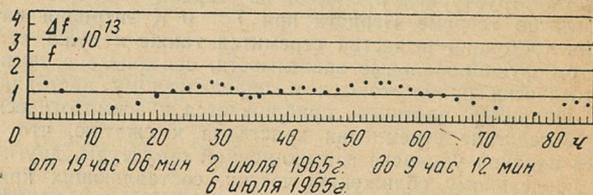
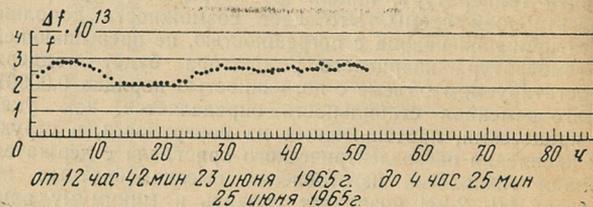


Рис. 5-6. Результаты измерений разностной частоты двух квантовых водородных генераторов. Данные получены методом наблюдений за низкочастотными биениями двух генераторов.

$5 \cdot 10^{-13}$. Данные, приведенные в табл. 5-1, позволяют определить водородный генератор как первичный эталон частоты. К недостаткам его относится большой вес и большие размеры, которые не представляется возможным существенно уменьшить.

Цезиевый генератор, так же как и водородный, имеет высокие результаты по воспроизводимости ($\pm 3 \cdot 10^{-12}$) и долговременной стабильности ($2 \cdot 10^{-13}$ за сутки)*. Не-

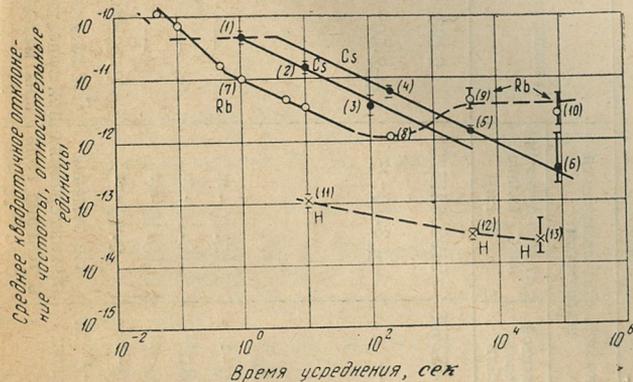


Рис. 5-7. Стабильность атомных эталонов частоты.

Каждая точка определяет среднее квадратичное отклонение частоты, усредненное по группе измерений.

Вертикальные линии, проведенные через точки, изображают 95%-ный доверительный интервал среднеквадратичного отклонения частоты.

Сплошные линии проведены по теоретическим данным.

Пунктирные линии соединяют точки, полученные для атомного эталона определенного типа.

Символами Cs, Rb и H обозначены точки, относящиеся к измерениям с цезиевыми, рубидиевыми и водородными квантовыми генераторами.

остатком этого типа генераторов является невысокая кратковременная стабильность.

Генератор, стабилизируемый резонатором рубидиевой газовой ячейки, имеет высокую кратковременную стабильность, например $2 \cdot 10^{-12}$ за 1 мин, является весьма компактным ($0,017 \text{ м}^3$) и легким (18 кг).

Квантовый генератор на рубидиевой газовой ячейке отличается высокой кратковременной стабильностью, сравнимой со стабильностью водородного генератора, и относительно нечувствителен к ударам и вибрациям.

* Принят в качестве первичного эталона для определения времени.

Параметры различных образцов квантовых и кварцевых генераторов

Параметр	Генератор						
	Квантовый генератор		Генератор, стабилизируемый резонатором		Атомикрон	Прецизионный кварцевый генератор	Низкотемпературный кварцевый генератор
	на пучке молекул аммиака	на пучке атомов водорода	рубидиевой газовой ячейки	атомно-лучевым на C_8 (длина 61 см)			
Номинальная резонансная частота, $Mгц$	23 870	1420, 405751	6834, 682608	9192, 631770	9 193	2,5	1,0
Воспроизводимость частоты	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$	$\pm 5 \cdot 10^{-13}$	—	$\pm 3 \cdot 10^{-12}$	$\pm 2 \cdot 10^{-10}$	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$
Стабильность как средние квадратичные отклонение частоты от среднего значения за время:	1 сек	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	—	$2 \cdot 10^{-10}$	—
	1 мин	—	$6 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	—	—
	1 ч	$1 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-13}$	—	$4 \cdot 10^{-12}$
	1 сутки	—	$2 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-12}$
Систематический уход частоты	—	Не замечен при измерениях в течение года	$3 \cdot 10^{-11}$ за 1 месяц	Не замечен при измерениях в течение года с точностью $3 \cdot 10^{-12}$	Не замечен при существующих методах измерения	—	—

Литература

- 1-1. Willard G. M., гл. 4 и 5 в книге Heising R. A., Quartz Crystals for El. Circuits, New York, 1946.
- 1-2. Шембель Б. К., Труды ВНИИМ, 1948, вып. 2 (62).
- 1-3. Ярославский М. И., Известия АН СССР, 1956, серия физ., т. 20, № 2, 268.
- 1-4. Lukesh J. S., Amer. Mineralogist, 1945, v. 30, № 5—6, 291.
- 1-5. Тюльпанов А. А., Технология производства кварцевых пластин, Госэнергоиздат, 1955.
- 1-6. Ильин Ф. М., Тюльпанов А. А., Авторское свидетельство № 79793, 1947.
- 1-7. Ярославский М. И., Васин И. Г., «Кристаллография», 1956, т. I, № 5, 603.
- 1-8. Шубников А. В., Цинзерлинг Е. В., Авторское свидетельство № 61964, 1943 г., с приоритетом от 22 ноября 1940 г.
- 1-9. Цинзерлинг Е. В., Труды Института кристаллографии АН СССР, 1955, вып. 11, 165.
- 1-10. Wooster W. A., Wooster N., Ruscroft S. L., Thomas L. A., J. of IEE, 1947, p. 3—A, v. 94, 927.
- 1-11. Ярославский М. И., Пьезоэлектрическое кристалло-сырье, Труды ВНИИП, 1956, № 1, 131.
- 1-12. Шубников А. В., Кварц и его применение, Изд-во АН СССР, М., 1940.
- 1-13. Ярославский М. И., Экспериментальные исследования методов повышения стабильности кварцевых резонаторов, Кандидатская диссертация, Институт кристаллографии АН СССР, 1959.
- 2-1. Качалов Н. Н., Григорьева А. Ф., Инж.-физ. журнал, 1960, т. III, № 1.
- 2-2. Качалов Н. Н., Григорьева А. Ф., ДАН СССР, 1959, т. 129, № 5.
- 2-3. Сб. «Алмазный инструмент и процессы алмазной обработки», Машиздат, 1964.
- 2-4. Becker G., Arch. el. Übertrag., 1958, Bd 12, H. 1.
- 2-5. Тотеш А. С., Оптико-механическая промышленность 1956, № 3, 46.
- 2-6. Гребенщиков И. В., «Стекло и керамика», 1931, № 11—12.
- 2-7. Гребенщиков И. В., Известия АН СССР, отд. хим. наук, 1937, № 1.
- 2-8. Minar S., Wiss Z. Hochschule El., Ilmenau, 1963, B. 9, № 5.

- 2-9. Cornish, Watt, *Electron Microscopy*, 1964, v. A, Prague, Czechosl. Acad. Sci., 1964.
- 2-10. Смагин А. Г., «Вопросы радиоэлектроники», 1964, серия III, вып. 11, 60.
- 2-11. Гребенщиков И. В., Поверхностные свойства стекла, сб. «Строение стекла», Гостехтеоретиздат, 1933, 101.
- 2-12. Гребенщиков И. В., Известия АН СССР, отд. техн. наук, 1937, т. I, № 3.
- 2-13. Гребенщиков И. В., Птицын Б. В., Труды ГОИ, 1931, т. VII, 65.
- 2-14. Kaller A., *Naturwissenschaft*, 1956, Bd 47, H. 7.
- 2-15. Kaller A., *Silikattechnik*, 1956, Bd 7, H. 10.
- 2-16. Молчанов В. С., Оптико-механическая промышленность, 1956, № 2, 55.
- 2-17. Kunc J., *Českosl. časopis pro fyziku*, 1962, № 12.
- 2-18. Кузнецов С. М., «Оптико-механическая промышленность», 1956, № 1, 45.
- 2-19. Brüche F., Popra H., *Glastechn., Ber.*, 1955, Bd 28, 6.
- 2-20. Brüche F., Popra H., *Glastechn., Ber.*, 1956, Bd 29, 5.
- 2-21. Boyer A. F., *Bull. Soc. Franca Miner. Crist.*, 1954, XXVII.
- 2-22. D'Eustachio D., Brody S. B., *J. Opt. Soc. Amer.*, 1945.
- 2-23. Ida I., Arai Y., Samiz Kikay, 1959, 25, № 8.
- 2-24. Krautkrämer J., *Ann. d. Phys.*, 1938, Bd 32.
- 2-25. Метфессель С., Тонкие пленки, их изготовление и измерение. Госэнергоиздат, 1963.
- 2-26. Холлэнд Л., Нанесение тонких пленок в вакууме, Госэнергоиздат, 1963.
- 2-27. Смагин А. Г., Прецизионные кварцевые резонаторы, физические основы. Изд-во стандартов, М., 1964.
- 3-1. Публикация МЭК № 122: «Кварцевые резонаторы для генераторов», Издание СовМЭК, М., 1964.
- 3-2. Quartz Crystal Manufacturing, *Electronics a. Communications*, 1955, v. 3, № 2, 335.
- 3-3. Поздняков П. Г., Авторское свидетельство № 136785 от 12 декабря 1959 г., Авторское свидетельство № 176608 от 11 мая 1960 г.
- 3-4. Векшинский С. А., Новый метод металлографического исследования сплавов, Гостехиздат, 1944.
- 3-5. Балицкий А. В., Технология изготовления вакуумной аппаратуры. изд-во «Энергия», 1966.
- 3-6. Руководство по пайке металлов мягкими припоями, Оборонгиз, 1963.
- 3-7. Батыгин В. Н., Сб. «Электроника», 1959, № 4.
- 3-8. Казанцева К. Е., Кириллова Г. К., Полякова Н. Л., Сб. «Электроника», 1959, № 4.
- 3-9. Справочник по электрической изоляции, под ред. Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, Госэнергоиздат, 1948.
- 3-10. Ярославский М. И., Поздняков П. Г., Васин И. Г., «Кристаллография», 1958, т. 3, № 6, 763.
- 3-11. Ballato A. D., McKnight R. V., *Phys. Today*, 1966, № 8, 57.
- 3-12. Harrison J. R. «*Proc. IRE*», 1927, v. 15, № 12, 1040.
- 3-13. Petržilka V., *Piezoelectřina I, Přírodověské vidav.*, Praha, 1951.
- 3-14. Fair I. E., Патент США № 2371613 от 31 декабря 1942 г.

- 3-15. Greenidge R. M. C., Bell System Techn., J., 1944, v. 23.
- 3-16. Смагин А. Г., Ярославский М. И., «Пьезоэлектрического кварца и кварцевые резонаторы», «Энергия», М., 1970 г.
- 4-1. Wagner A. W., Bell. Syst. Techn. J., 1960, 1193.
- 4-2. Смагин А. Г., «Кристаллография», 1961, т. 6, № 5.
- 4-3. Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1956.
- 4-4. Евтянов С. И., «Радиотехника», 1949, № 1; 1949, № 5.
- 4-5. Евтянов С. И., Радиопередающие устройства, Связьиздат, 1950.
- 4-6. Савельев С. А., Челноков О. А., Высокочастотные параметры и эквивалентная схема транзистора П411, сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 10, 1959.
- 4-7. Богачев В. М., Кунина С. Л., Петров Б. Е., Попов И. А., Расчет каскадов полупроводниковых передатчиков, изд. МЭИ, 1964.
- 4-8. Новицкий Н. А., Труды ХВАИВУ, 1958, вып. 67, Рига.
- 4-9. Кунина С. Л., «Электросвязь», 1961, № 4.
- 4-10. Кунина С. Л., Генераторы с кварцевой стабилизацией на полупроводниковых триодах, в кн. «Приборы и электронная аппаратура для измерения радиотехнических величин и параметров радиотехнических устройств», 1962, вып. 5.
- 4-11. Butler F., Series-resonant crystal oscillators, Wirelles Eng., 1966, № 6.
- 4-12. Специальные схемы генераторов, 1964, т. 7, № 6.
- 4-13. Михеев А. М., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1956.
- 4-14. Вайник А. И., Приближенный расчет процессов теплопроводности, Госэнергоиздат, 1959.
- 4-15. Шевчук Р. М., Фромберг Э. М., Научные труды Омского института ж.-д. транспорта, 1965, т. 52.
- 4-16. Башмаков В. В., «Вопросы радиоэлектроники», серия III, 1960, вып. 4.
- 5-1. Proc. IEEE, 1966, v. 54, № 2.
- 5-2. Мандельштам Л. И., Полное собрание трудов, т. IV, 1955, Изд-во АН СССР.
- 5-3. Лоренц Г. А., Статистические теории в термодинамике, Гостехиздат, 1935.
- 5-4. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э., Теория колебаний, Физматгиз, 1959.
- 5-5. Смагин А. Г., Научная сессия, посвященная столетию со дня рождения А. С. Попова, Сб. докладов, ВНТОРиЭ им. А. С. Попова, М., 1959, стр. 88.
- 5-6. Wagner A. W., IRE Trans. on Instr., 1958, v. 185.
- 5-7. White L., J. Appl. Phys., 1958, v. 29, 5.
- 5-8. Смагин А. Г., Никольская В. И., ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1967, т. 6, вып. 3.
- 5-9. De Prins J., IRE Trans. on Instr., December, 1962, v. 1—11.
- 5-10. Barnes J. A., Allen D. W., Wainwright A. E., IRE Trans. on Instr., June, 1962, v. 1—11.
- 5-11. Горелик Г. С., Елкин Г. А., «Радиотехника и электроника», 1957, т. II, вып. 1.
- 5-12. Смагин А. Г., Труды ВНИИП, т. IV, Госгеолиздат, 1962.

Оглавление

Предисловие	3
Глава первая. Монокристаллы кварца как сырье для изготовления пьезоэлементов	4
1-1. Морфология кристаллов кварца	4
1-2. Разновидности кристаллов кварца	9
1-3. Дефекты кристаллов кварца	10
1-4. Обогащение и оценка кристаллов кварца	14
1-5. Травление кристаллов кварца в плавиковой кислоте	16
1-6. Спайность кварца и фигуры удара	27
1-7. О возможности промышленного использования дефектных кристаллов кварца	28
Глава вторая. Основы процессов изготовления кварцевых резонаторов	30
2-1. Механическая обработка поверхности кристаллов	30
2-2. Очистка и травление поверхности кристаллических элементов	53
2-3. Процессы металлизации и их влияние на параметры и характеристики резонаторов	65
Глава третья. Конструирование кварцевых резонаторов	79
3-1. Типы конструкций кварцевых резонаторов	79
3-2. Требования к материалам, используемым в конструкциях кварцевых резонаторов	99
3-3. Конструкция кварцевого вибратора пьезоэлектрического резонатора	100
3-4. Устойчивость кварцевых резонаторов к внешним механическим воздействиям	110
Глава четвертая. Кварцевые генераторы	112
4-1. Влияние различных процессов на стабильность частоты генераторов	112
4-2. Дестабилизирующие факторы	115
4-3. Основные схемы кварцевых генераторов	118
4-4. Генераторы на транзисторах и лампах	125
4-5. Генераторы на туннельных диодах	126
4-6. Расчет схем кварцевых генераторов	129
4-7. Сравнение различных схем генераторов, стабилизируемых кварцевыми резонаторами	137
4-8. Термостаты	139
Глава пятая. Высокостабильные кварцевые генераторы в системе подстройки квантовых стандартов частоты	146
5-1. Принципы работы квантовых генераторов	146
5-2. Принципиальное устройство квантовых генераторов	149
5-3. Системы пассивных и активных квантовых генераторов	152
5-4. Естественная ширина спектральной линии кварцевого резонатора и генератора	155
5-5. Перспективы повышения кратковременной и долгосрочной стабильности частоты кварцевых генераторов при обычных и низких температурах	159
5-6. Сравнение характеристик кратковременной и долгосрочной стабильности частоты квантовых и кварцевых генераторов	162
Литература	165