АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 4

О СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЬЕЗОПЛАСТИНОК ПРИ ИХ КОЛЕБАНИЯХ НА СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Б. А. Финагин

Описывается явление статической деформации пьезопластинок при их колебаниях на некоторых собственных частотах. Приводятся экспериментальные данные и фотографии формы поверхности пьезопластинок при таких колебаниях, полученные методом интерференции света.

Мы исследовали методом интерференции света форму колебаний поверхности пьезопластинок при их возбуждении на собственных частотах. При опытах отполированная и металлизированная поверхность исследуемой пьезопластинки являлась одним из зеркал интерферометра Майкельсона; с помощью этого интерферометра мы получали интерференционную картину полос равной толщины. На резонансных частотах наблюдалось изменение интерференционной картины в местах пучности колебаний (зонах колебаний), где амплитуда A нормальных к поверхности механических колебаний превышала величину $\approx 0{,}1$ *мк*. При локальном изменении амплитуды полосы размывались и смещались [1]. По такому локальному изменению интерференционной картины можно судить о форме колебаний поверхности и величине амплитуд нормальных колебаний различных мест поверхности пьезопластинки [2, 3].

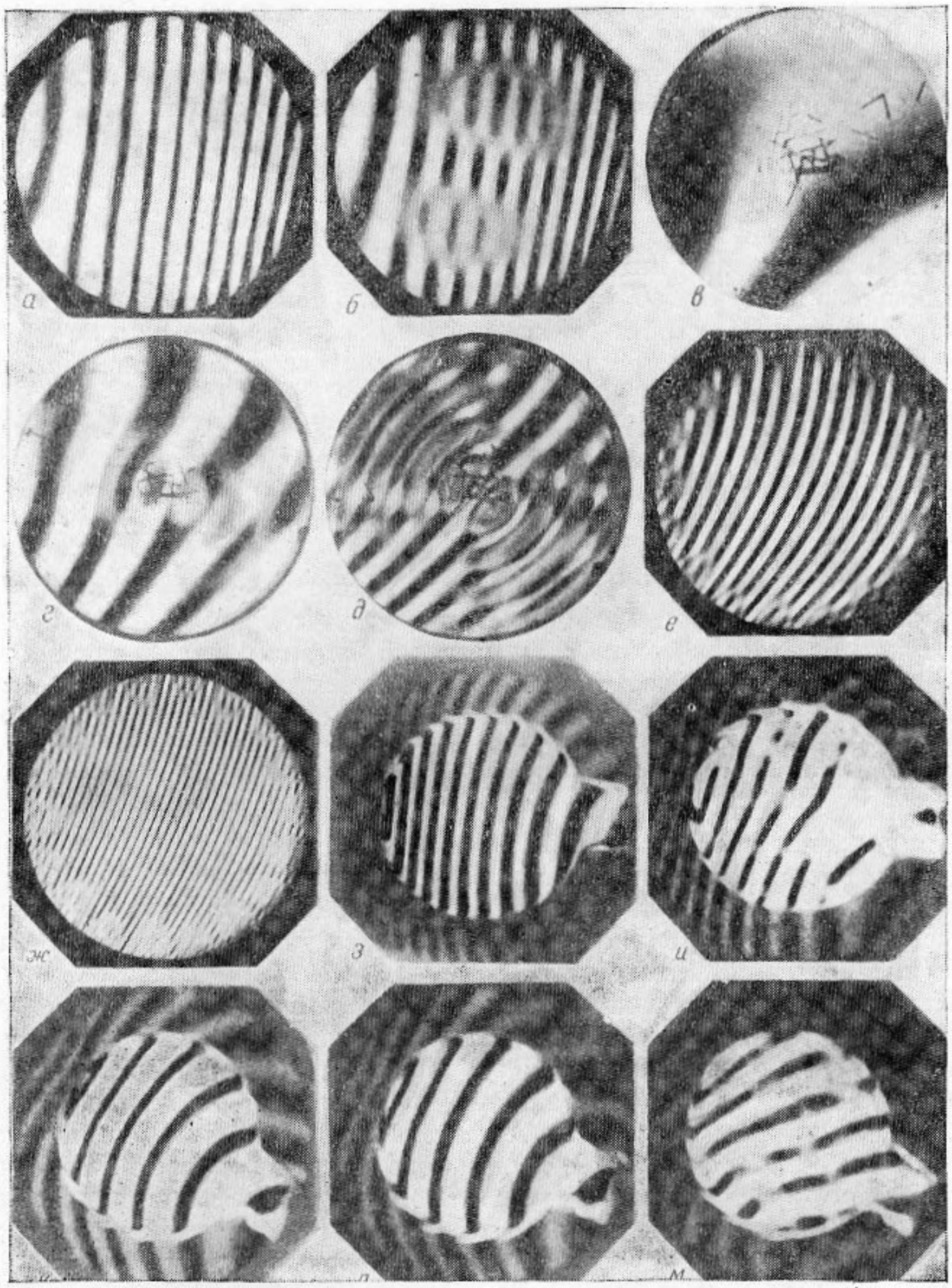
На фиг. 1, *а* показана фотография интерференционной картины полос равной толщины на неколеблющейся пластинке. На фиг. 1, *б* — интерференционная картина на той же поверхности в момент колебаний на одной из собственных частот. На фиг. 1,*б* видны две области (зоны с амплитудой нормальных к поверхности колебаний больше 0,1 *мк*), в которых интерференционные полосы размыты и смещены, в остальных же местах интерференционная картина остается без изменений. Более подробно методика исследований описана в работах [1, 4].

При исследовании описанным методом форм колебаний поверхности круглых турмалиновых пьезопластинок Z-среза и кварцевых X, Y, Z, AT, BT, CT, FT, GT-срезов, с различными геометрическими параметрами обнаружено явление, заключающееся в том, что на некоторых собственных частотах наряду с локальными изменениями интерференционной картины полос равной толщины, в местах пучностей колебаний (зонах колебаний) наблюдалось также и общее изменение всей интерференционной картины в целом (изменение числа, формы и конфигурации интерференционных полос). Такое общее изменение всей интерференционной картины в целом может быть объяснено появлением у колеблющейся пьезопластинки также некоторой статической деформации, изменяющей форму ее поверхности.

Доказательством того, что такое наблюдаемое общее изменение всей интерференционной картины происходит в результате появления статической деформации пьезопластинки вследствие ее колебаний на собственной частоте, а не в результате каких-либо смещений пьезопластинки в целом, могут являться следующие опытные факты.

1. В ряде случаев при таком изменении всей интерференционной картины изменяется не только число интерференционных полос, но и их взаимное расположение, форма и конфигурация.

На фиг. 1, *з* показана фотография интерференционной картины на поверхности неколеблющейся пластинки. На фиг. 1, *и* — интерференционная картина на поверхности той же пластинки при ее колебаниях на одной из резонансных частот. Здесь, помимо зон колебаний (места размытия



Фиг. 1

интерференционных полос), наблюдается также изменение всей интерференционной картины в целом — изменение числа интерференционных полос, их взаимного расположения, формы, конфигурации по сравнению с интерференционной картиной на поверхности неколеблющейся пластинки, показанной на фиг. 1, *з*.

Аналогичное изменение всей интерференционной картины в результате колебаний на одной из собственных частот показано также на фиг. 1, *к* и 1, *м*. Фиг. 1, *к* показывает интерференционную картину на не колеблющейся пластинке, а 1, *м* — на поверхности той же пластинки, но колеблющейся на одной из собственных частот. Кроме зон размытия интерференционных

полос, на фиг. 1, *м* также наблюдается изменение расположения и формы интерференционных полос.

2. Такое общее изменение интерференционной картины наблюдается сравнительно редко и лишь на некоторых собственных частотах.

3. При отходе от резонанса общий вид интерференционной картины восстанавливается, т. е. становится тем же, что и до настройки на резонанс.

4. При снятии возбуждающего напряжения общий вид интерференционной картины восстанавливается, т. е. становится тем же, что и до приложения напряжения.

На фиг. 1, *в*, *г*, *д*, *е*, *ж* показано общее изменение всей интерференционной картины в зависимости от величины U возбуждающего высокочастотного напряжения.

Фиг. 1,*в* показывает интерференционную картину на поверхности неколеблющейся пластины ($U = 0$). На фиг. 1, *г*, *д* показана интерференционная картина на поверхности той же пластинки, колеблющейся на одной и той же резонансной частоте при возбуждающем высокочастотном напряжении соответственно $U = 120$ *в* и $U = 270$ *в*.

Сравнение интерференционных картин на фиг. 1, *в*, *г*, *д* показывает, что в данном случае резонансные колебания пьезопластинки сопровождаются изменением числа интерференционных полос, причем с ростом возбуждающего напряжения число интерференционных полос увеличивается.

Области размытия интерференционных полос в виде двух симметричных зон в центре и системы симметричных дуг (фиг. 1 *г*, *д*) соответствуют колеблющимся зонам с амплитудой нормальных к поверхности колебаний больше 0,1 *мк*. С увеличением напряжения амплитуда этих колебаний, естественно, увеличивается. На фиг. 1, *е*, *ж* показана интерференционная картина на поверхности пьезопластинки другого диаметра при ее колебаниях на собственной частоте, обладающей другой формой колебаний, чем форма на фиг. 1, *г*, *д*, при возбуждающем высокочастотном напряжении соответственно $U = 30$ *в* и $U = 80$ *в*.

Помимо роста амплитуды нормальных к поверхности колебаний в колеблющихся зонах, расположенных по краю пластинки, с увеличением возбуждающего напряжения наблюдается также увеличение общего числа интерференционных полос.

Если же изменение всей интерференционной картины произошло в результате смещения всей пьезопластинки, которое может происходить также под влиянием колебаний, то это изменение остается и после прекращения колебаний (снятия напряжения) или ухода от резонанса.

5. Общее изменение всей интерференционной картины присуще не только каким-либо отдельным типам резонанса, но и самой пластинке. У другой такой же пластинки, в тех же условиях работы, такое общее изменение интерференционной картины может наблюдаться на совершенно других резонансах или не наблюдаться совсем, несмотря на наличие у резонансов с теми же собственными частотами, формами и амплитудами колебаний, что и у первой пластинки, у которой эти резонансы показали общее изменение интерференционной картины.

6. Наличие описанного общего изменения интерференционной картины обычно сопровождается разрушением пьезопластинки. При этом разрушение происходит, как правило, при значительно меньших величинах возбуждающего высокочастотного электрического напряжения, чем в случаях, когда такого общего изменения интерференционной картины не наблюдается.

То, что данная статическая деформация возникает вследствие резонансных колебаний пьезопластинки в результате ее возбуждения высокочастотным электрическим полем, а не является результатом действия каких-либо статических (постоянных) электрических полей, подтверждается

тем, что общее изменение всей интерференционной картины наблюдается лишь на некоторых резонансах и только в области резонанса.

Фиг. 1, *к* показывает интерференционную картину на неколеблющейся пластинке $U = 0$. На фиг. 1, *м* показана интерференционная картина на поверхности той же пластинки при ее колебании на одной из резонансных частот. Помимо зон колебаний наблюдается также изменение всей интерференционной картины — искривление и смещение полос. Фиг. 1, *л* показывает интерференционную картину при колебании той же пластинки вне резонанса (на частоте далекой от резонансной частоты). Несмотря на то, что на пластинку подано высокочастотное напряжение с эффективной величиной 250 *в* (как и на резонансной частоте), общий вид интерференционной картины такой же, как и у неколеблющейся пластинки на фиг. 1, *к*.

Такие общие изменения интерференционной картины наблюдались нами при разных креплениях пьезопластинок, а именно: крепление 1 — пьезопластинка лежала на нижнем электроде, представлявшим собой сплошной бронзовый диск с плоской поверхностью; крепление 2 — нижним электродом служило кольцо из латуни с внешним диаметром, равным диаметру пьезопластинки, а внутренним на 2 *мм* меньше. Верхним электродом в обоих случаях служило также латунное кольцо свободно своим весом $\leqslant 2$ *г* лежащее на пьезопластинке. Плоскости электродов были тонко шлифованы или полированы. Верхняя плоскость пьезопластинки была полирована и металлизирована испарением алюминия в вакууме. Нижняя поверхность в большинстве случаев была тонко шлифована и металлизирована. Крепление 3 — описанные выше электроды упруго (пружинкой) прижимались к пьезопластинке. Крепление 4 — круглая пьезопластинка крепилась при помощи трех латунных или стальных штифтов с косыми вырезами на концах упруго упиравшихся в край пьезопластинки, по окружности которой была снята небольшая косая фаска. Обе плоскости пьезопластинки при таком креплении свободны и работают на воздух. Плоскости пьезопластинки были металлизированы не целиком, а так, что диаметр центральной металлизированной зоны был на 3—4 *мм* меньше диаметра пьезопластинки (фиг. 1, *з—м*). От металлизированных зон в центре пластинки к ее краям отходили небольшие металлизированные отводы, к которым припаивались тонкие, диаметром 0,05 *мм* проводники, подводящие к пьезопластинке высокочастотное возбуждающее напряжение.

У пьезопластинок с креплением на трех штифтах наблюдалось несколько иное изменение интерференционной картины. Кроме общего изменения, появлявшегося и исчезавшего соответственно сразу после подачи и снятия напряжения, наблюдалось изменение, которое нарастало и исчезало медленно в течение нескольких десятков секунд или даже нескольких минут после включения или соответственно выключения возбуждающего напряжения. Такое медленное общее изменение интерференционной картины объясняется также деформацией пьезопластинки. Однако в отличие от описанной нами, мгновенно возникающей статической деформации, медленная деформация обусловливается нагревом пьезопластинки, вызванным ее колебаниями и прохождением тока. То, что такая деформация не наблюдалась в столь явном виде при других типах кварцедержателей, можно объяснить тем, что в них пьезопластинка имеет большую площадь соприкосновения с латунными или алюминиевыми электродами и имеет полностью металлизированную верхнюю, а в большинстве случаев и нижнюю поверхность. Это в целом обеспечивало лучший отвод тепла, чем в держателях с тремя штифтами.

Возбуждение пьезопластинок производилось с помощью генератора ГСС-6 и резонансного усилителя с авто-трансформаторным резонансным выходным контуром, параллельно которому через разделительную емкость для защиты от постоянной составляющей анодного тока подключалась исследуемая пьезопластинка. Форма подаваемого на пластинку напряже-

Таблица параметров экспериментов и пластинок, показанных на фигуре

Обозначение фигуры	Пластинка			Частота колебаний, *кгц*	Напряжение, *в*		Максимальная амплитуда, * *мк*	Тип крепления
	материал, срез	диаметр, *мм*	толщина, *мм*		подаваемое	в резонансе		
а	Кварц *X*	20,00	2,86	0	0	0	0	1
б	»	20,00	2,86	135,45	60	50	0,2	1
в	турм. *Z*	15,63	0,84	0	0	0	0	1
г	»	15,63	0,84	838,13	120	120	0,15	1
д	»	15,63	0,84	838,13	270	270	0,3	1
е	»	20,00	0,84	317,28	30	20	0,2	1
ж	»	20,00	0,84	317,28	80	50	0,3	1
з	кварц *X*	10,00	0,58	0	0	0	0	4
и	»	10,00	0,58	4924,82	250	180	0,15	4
к	»	10,00	0,58	0	0	0	0	4
л	»	10,00	0,58	4732,00	250	—	0	4
м	»	10,00	0,58	4769,09	250	200	0,15	4

* Приведенная величина, определенная по методу, описанному в работах [2,3], соответствует амплитуде наиболее сильно колеблющихся зон. Так, например, для фиг. 1, *г*, *д* указана величина амплитуды двух центральных зон колебаний.

ния и тока через нее контролировалась катодным осциллографом [1]. В приводимой таблице сведены данные, характеризующие условия опыта, отвечающие фиг. 1*а*—*м*.

На основании изложенного нам представляется, что описанная мгновенно возникающая статическая деформация некоторых пьезопластинок на некоторых резонансных частотах связана с индивидуальными свойствами самой пластинки и не является следствием только условий эксперимента. Действительно, она возникала не при каком-нибудь одном виде крепления, а при различных типах крепления данной пластинки. За описанной статической деформацией следует разрушение пластинки. Разрушение при этом наступает при более низком напряжении, чем при отсутствии статической деформации. Это показывает, что пластинка, у которой наблюдается описанная статическая деформация, чем-то ослаблена по отношению к разрушению на данном резонансе. При других видах деформации, как, например, тепловой, даже большей по величине, разрушений пластинок не наблюдалось.

В определенных условиях и режимах пьезопластинки нами наблюдались тепловые деформации; однако, если они существовали, то наблюдались у всех пьезопластинок с данными параметрами. Деформации и разрушения пластинки при электрическом разряде (дуга, искра, пробой) также связанные нагревом пластинки (в данном случае местным) протекали быстрее по сравнению с тепловыми деформациями, вызванными нагревом пластинки при колебаниях. Однако они были все же медленнее и имели совсем другой характер, чем описываемая статическая деформация. Кроме того, при описываемой деформации не наблюдалось никаких электрических разрядов.

В работе Толанского и Бардслея [5] есть очень краткое упоминание о деформации всей пластинки перед ее разрушением в результате колебаний. Авторы [5] пишут, что наблюдая интерференционную картину можно получить предупреждение о неминуемом разрушении колеблющейся пьезопластинки. Когда колебания становятся чрезмерными, т. е. при достижении пластинкой критической величины амплитуды колебаний, зависящей от среза и типа движения пластинки, перед самым разрушением пластинки наблюдается заметный ее изгиб, о чем свидетельствует изменение интерференционных полос. Какого-либо объяснения этого явления авторы работы [5], к сожалению, не приводят.

Так как описываемая статическая деформация пластинки сопровождается ее разрушением, то одной из возможных, как нам кажется, причин

возникновения этой деформации может являться то, что перед разрушением пластинки некоторые из слагающих колебаний достигают величины, при которой превышается соответственный предел упругости и колебания становятся нелинейными. Сюда может присоединяться также влияние различных неоднородностей, проявляющееся различно у разных пластинок на разных резонансах.

Из всего сказанного следует, что появление на каком-либо резонансе общего изменения всей интерференционной картины, характеризующего описанную статическую деформацию, служит признаком, что данный резонанс является для пластинки опасным; во избежание разрушения пьезопластинки или вообще не следует работать на данном резонансе, или работать на нем лишь при пониженном возбуждающем напряжении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Финагин. Исследование спектра и формы колебаний поверхности пьезопластинок. Ж. техн. физ., 1960, **30**, 9, 1115—1123.
2. H. Osterberg. An interferometer method of studing the vibrations of an ostillating quartz plate. J. Opt. Soc. America, 1932, 22, 19—38.
3. М. Л. Котляревский, Е. А. Пумпер. Исследование колебаний пьезокварцевых пластин интерференционным методом. Ж. техн. физ., 1941, **11**, 9, 843—850.
4. Б. А. Финагин. О некоторых свойствах ультразвуковых пьезоизлучателей на нетолщинных видах колебаний. Тр. Ленингр. кораблестроит. института, 1959, **29**, 251—255.
5. S. Tolansky, W. Bardsley. Interferometric studies on the vibration of piczoelectrie plates. Proc. Phys. Soc., 1951, **13**, 64, 224—230.

Ленинградский кораблестроительный институт

Поступила в редакцию 10 апреля 1961 г.