АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VI 1960 Вып. 2

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ТИТАНАТА БАРИЯ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ДИФРАКЦИОННЫХ МОДУЛЯТОРАХ СВЕТА

И. И. Адрианова, Ю. В. Попов, Б. А. Ротенберг

Исследованы излучатели ультразвука из пьезокерамики титаната бария на частотах 3—15 *мггц* с целью их использования в высокочастотных дифракционных модуляторах.

Одной из существеннейших характеристик излучателей ультразвука для дифракционного модулятора света является частотная характеристика. Поэтому для исследования излучателей была разработана методика снятия частотных характеристик в условиях, аналогичных тем, в которых эксплуатируется дифракционный модулятор света. Поскольку при работе дифракционного модулятора необходимо поддерживать вполне определенную интенсивность ультразвука для получения максимальной глубины модуляции [1,2], а интенсивность ультразвука зависит от пьезоэлектрических свойств излучателя при данной частоте и приложенного к нему напряжения, то представлялось рациональным измерять высокочастотное напряжение, которое необходимо приложить к излучателю ультразвука для получения вполне определенной интенсивности ультразвука в заданном диапазоне частот.

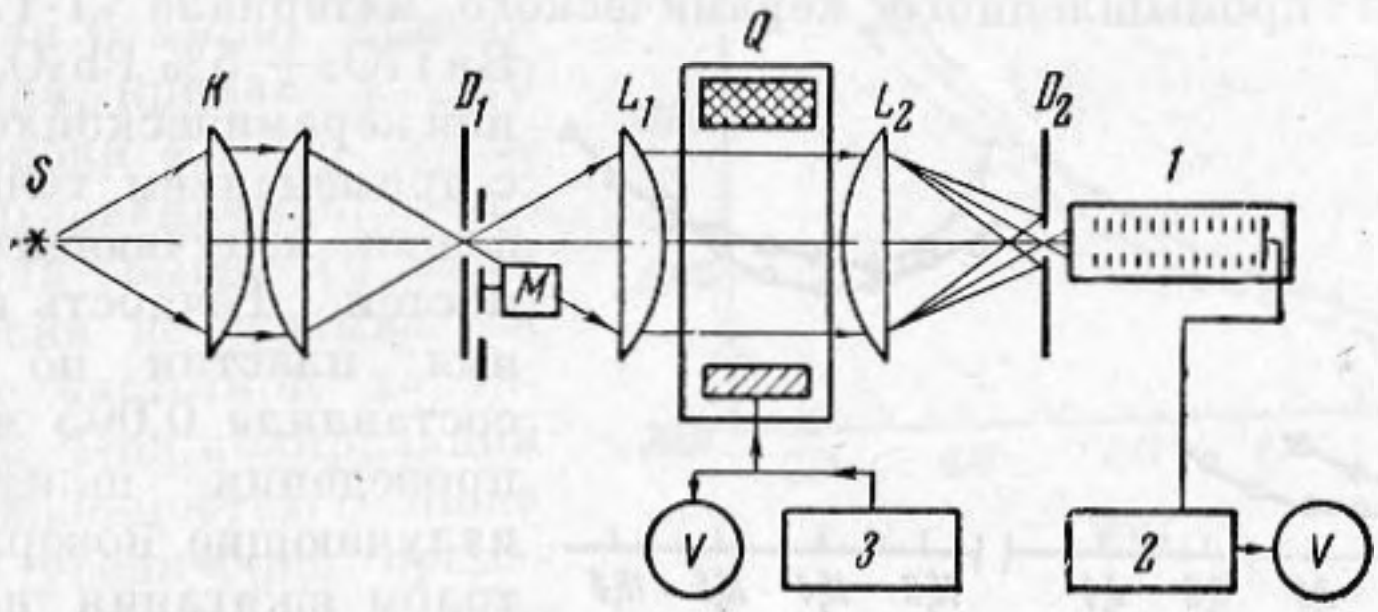
В связи с тем, что при малых интенсивностях ультразвука (вплоть до появления вторых максимумов дифракционной картины) интенсивность света в нулевом максимуме дифракционной картины линейно зависит от интенсивности ультразвука [3], при снятии частотных характеристик постоянство интенсивности ультразвука контролировалось посредством измерения интенсивности света в нулевом максимуме дифракционной картины.

При снятии частотных характеристик интенсивность ультразвука выбиралась такой, при которой интенсивность света в нулевом максимуме дифракционной картины уменьшается на 45% по сравнению с той же интенсивностью при отсутствии ультразвука. При такой интенсивности ультразвука, во-первых, еще не нарушалась линейность зависимости интенсивности света в нулевом максимуме дифракционной картины от интенсивности ультразвука и, во-вторых, измерения производились при величине интенсивности ультразвука, близкой к необходимой для получения максимальной глубины модуляции света. Поскольку, таким образом, при снятии характеристик измерялось отношение интенсивностей света в нулевом максимуме дифракционной картины при наличии и при отсутствии ультразвука, то не требовалось применять высоко стабильные источник и приемник света. Измерение интенсивности света производилось фотоэлектрическим методом с дополнительной низкочастотной модуляцией света и усилением полученного с фотоприемника низкочастотного напряжения.

Применительно к описанному методу снятия частотных характеристик мы назовем шириной частотной характеристики излучателя тот диапазон частот, в котором для получения заданной интенсивности ультразвука к

излучателю необходимо прикладывать напряжения, не превышающие в 1, 4 раза напряжение, необходимое для получения той же интенсивности на резонансной частоте.

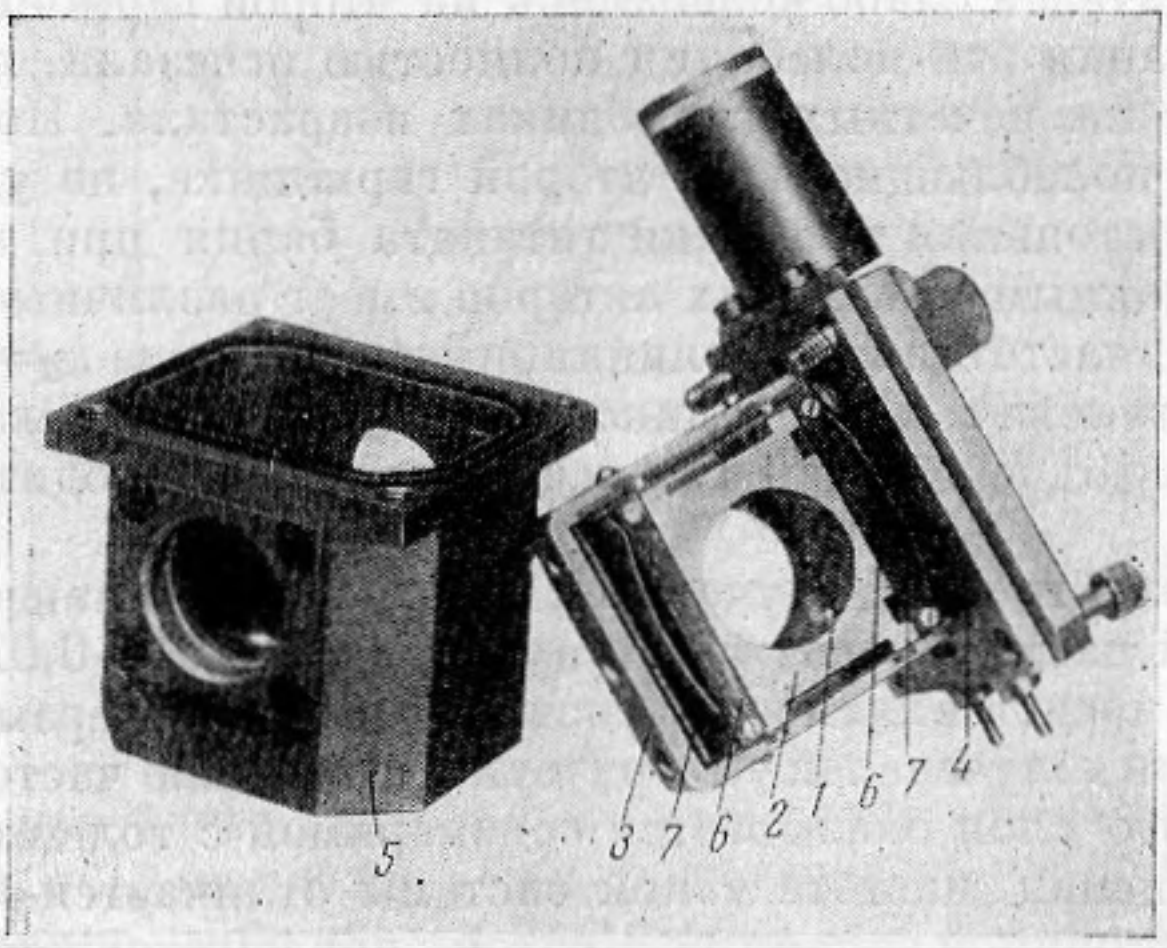
Схема установки для снятия частотных характеристик представлена на фиг. 1. Свет вольфрамовой лампы S через конденсор K попадает на диафрагму D_1, затем через вращающийся диск M с отверстиями, прерывающий свет с частотой 1000 *гц*, падает на объектив L_1. Вышедший из



Фиг. 1

объектива L_1 параллельный пучок света проходит кювету Q и объективом L_2 фокусируется в плоскости диафрагмы D_2, а затем попадает на катод фотоумножителя (ФЭУ-19) —*1*.

Сигнал, полученный с фотоумножителя, подавался на усилитель низкой частоты (УНЧ) — *2* и после усиления измерялся при помощи лампового вольтметра. На излучатель, помещенный в кювету Q, наполненную ксилолом, подавалось высокочастотное напряжение от генератора (ГВЧ) — *3*, измеряемое с помощью лампового вольтметра на контактном разъеме кюветы.



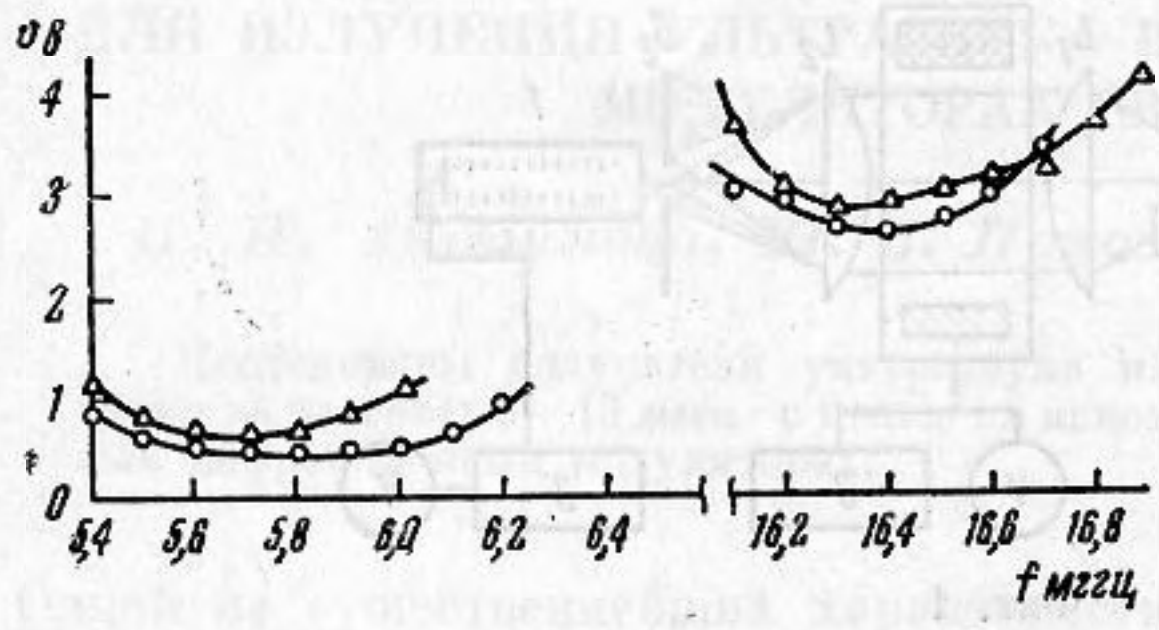
Фиг. 2

В дифракционном модуляторе для обеспечения большей однородности ультразвукового поля применяются два одинаковых излучателя, расположенных один против другого на противоположных концах кюветы. При исследовании частотных характеристик в держателе оставлялся только один исследуемый излучатель, а на месте второго укреплялся кусок греческой губки, исключающий возникновение стоячих волн.

Держатель излучателей в модуляторе света (фиг. 2) состоит из пустотелого каркаса *2*, подвешенного к крышке *4* кюветы *5* при помощи ско-

бы *3* и двух рамок *6*, которыми при помощи пружин *7* излучатели *1* прижимаются к каркасу; подача напряжения осуществляется через каркас и рамку с пружиной.

Исследовались образцы излучателей ультразвука в виде прямоугольных пластинок размерами 35 × 22 *мм*² и 25 × 22 *мм*². Выбор толщины пластинок определялся требуемой частотой модуляции света и, в зависимости от нее, толщина составляла от 0,28 *мм* до 1,5 *мм*. Излучатели изготовлялись из промышленного керамического материала Т-1700 (95% $BaTiO_3$ + 5% Pb_3O_4) по обычной керамической технологии с применением точной шлифовки излучающих поверхностей. Точность изготовления пластин по толщине составляла 0,005 *мм*. После проведения шлифовки на излучающие поверхности методом вжигания наносились серебряные электроды. Поляризация излучателей производилась непосредственно в кювете модулятора, заполненной ксилолом. Частотные характеристики излучателей ультразвука из керамики Т-1700, снятые описанным выше методом, имеют вид, представленный на фиг. 3. Здесь, как и в последующих характеристиках, по оси абсцисс отложена частота в мегагерцах, по оси ординат — величина высокочастотного напряжения, измеренная на контактном разъеме кюветы в вольтах.



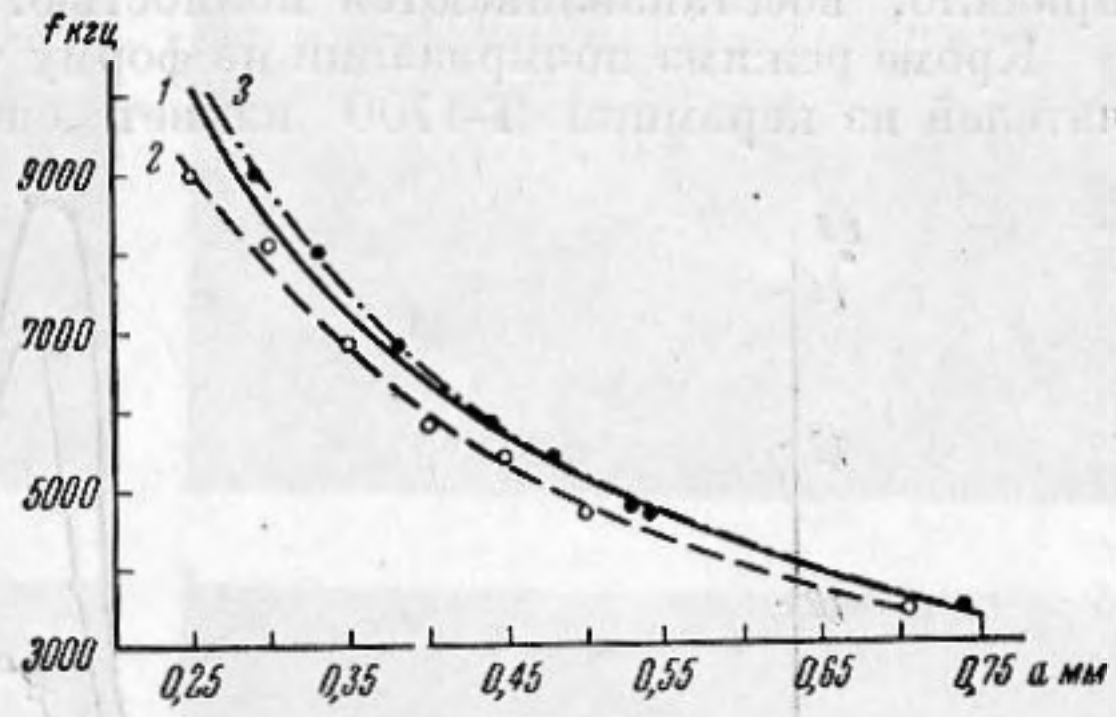
Фиг. 3

Исследования показали, что все исследованные излучатели колеблются как на основной частоте, так и на нечетных гармониках. Однако следует отметить, что из большого числа исследованных образцов, несколько излучателей слабо колебались на второй гармонике и при вторичной поляризации эти колебания полностью исчезали, в то время как пьезоактивность на нечетных гармониках возрастала. Получить специально образцы, колеблющиеся на второй гармонике, не удалось.

Частотная постоянная керамики титаната бария при колебаниях по толщине k_d по данным различных авторов имеет различные значения. По данным Яффе [4] частотная постоянная имеет значение $k_d = 2200$ *кгц·мм*, по данным Мотулевич и Фабелинского [5] $k_d = 2390$ *кгц·мм*, по данным Голяминой [6] $k_d = 2420$ *кгц·мм*, Мэзон [7] приводит значение $k_d = 2550$ *кгц·мм*.

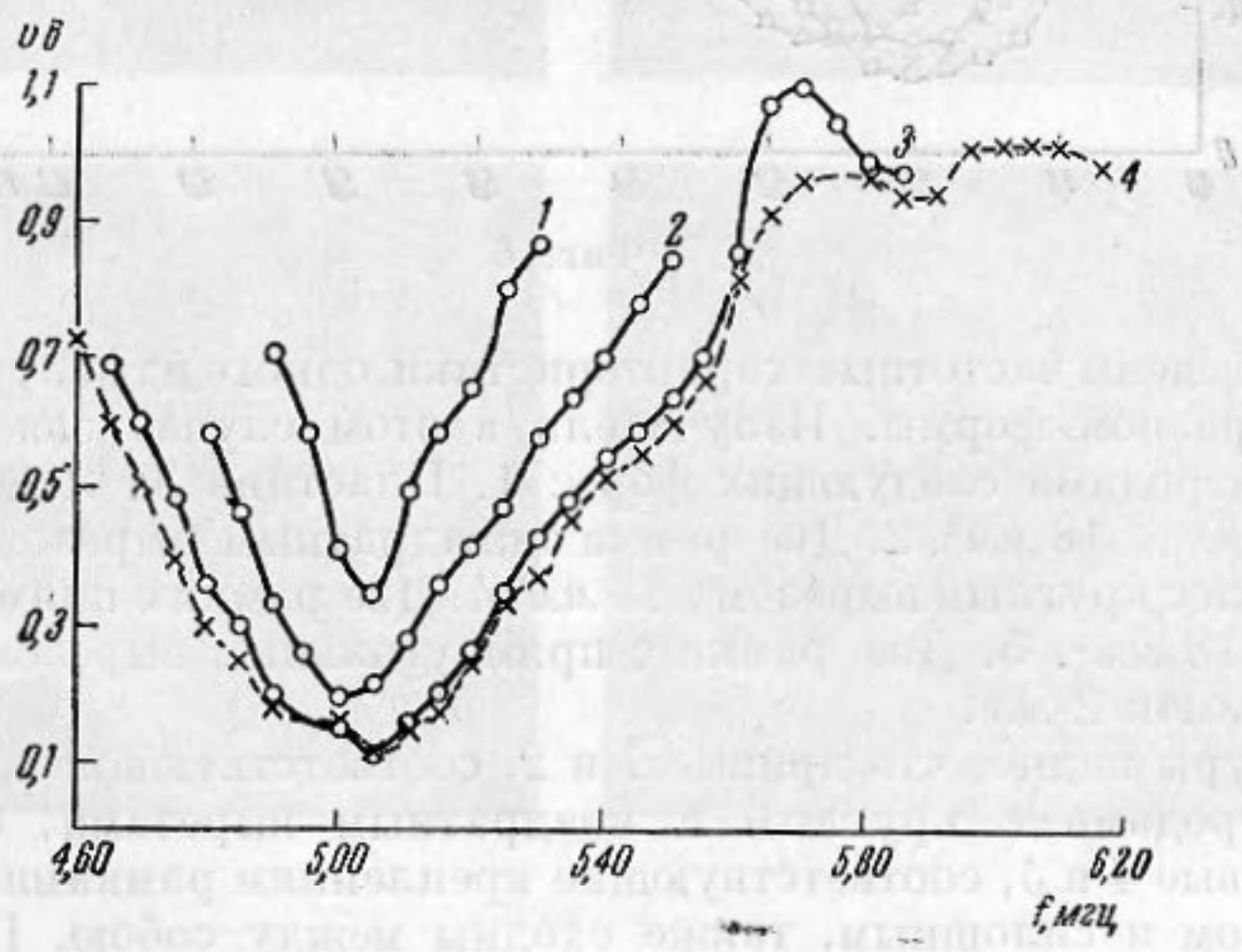
Поскольку электроды излучателей ультразвука, нанесенные вжиганием серебряной пасты, имеют толщину порядка 0,01—0,02 *мм*, то излучатель по толщине представляет собой систему серебро — керамика — серебро. При изготовлении излучателей ультразвука на высокие частоты, общая толщина серебряного слоя оказывается соизмеримой с толщиной керамики, поэтому резонансная частота такой системы отличается от рассчитанной по частотной постоянной керамики. Поэтому при изготовлении излучателей на определенную частоту приходится пользоваться не частотной постоянной керамики, а экспериментальными данными, приведенными на фиг 4, где дана зависимость резонансной частоты от толщины излучателя, выполненного из керамики Т-1700. Кривая *1* на фигуре дает расчетную зависимость резонансной частоты излучателя от его толщины при частотной постоянной $k_d = 2500$ *кгц·мм*; кривая *2* — экспериментальную зависимость резонансной частоты излучателя от толщины керамики, кривая *3* — экспериментальную зависимость резонансной частоты излучателя от общей толщины излучателя вместе с электродами. Видно, что при частотах свыше 6 *мггц* заметно сказывается влияние толщины серебряного слоя.

Пьезоэлектрические свойства керамических излучателей ультразвука очень сильно зависят от режима поляризации образца. Типичная зависимость частотных характеристик от напряженности поляризующего поля для одного из образцов представлена серией кривых, изображенных на фиг. 5. Здесь дана зависимость частотных характеристик от режима поляризации: кривая *1* отвечает напряженности поля 6 *кв/см*, кривая *2* — 8 *кв/см*, кривая *3* — 10 *кв/см*, кривая *4* — 16 *кв/см*.



Фиг. 4

Использование напряженности поля выше 16 *кв/см* практически не сказывается на форме частотной характеристики. При поляризации с напряженностью ниже 16 *кв/см* увеличение времени поляризации не может полностью компенсировать влияние уменьшения напряженности поляризующего поля. При увеличении времени поляризации происходит небольшое расширение частотной характеристики и лишь незначительное увеличение пьезоконстанты. При поляризации полем, соответствующим напряжению насыщения, оказывается достаточным время поляризации



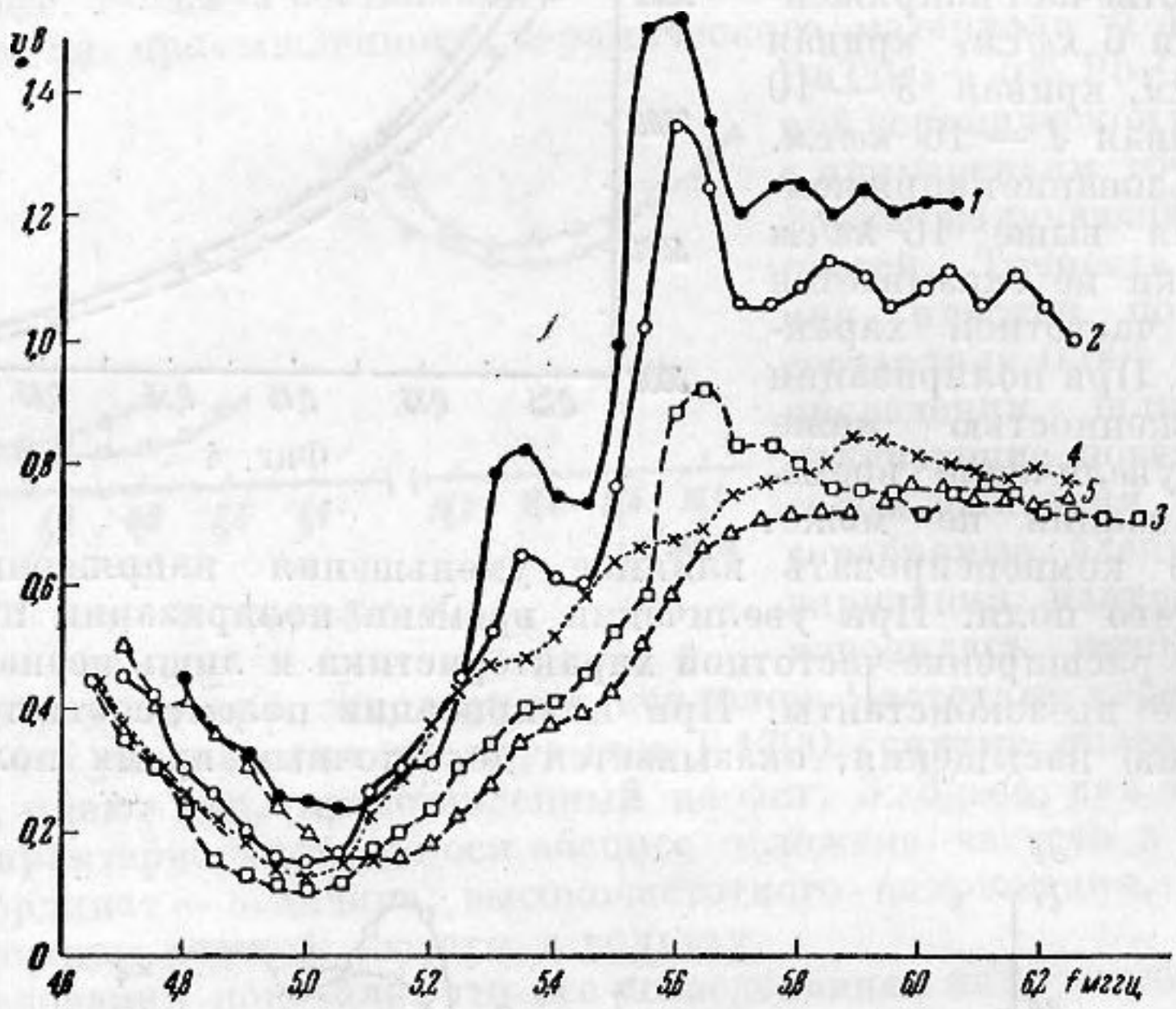
Фиг. 5

20—25 *мин*; при более длительной поляризации частотная характеристика практически не изменяется. При поляризации пьезоконстанта излучателя, как правило, получается большей в том случае, если поляризующее напряжение последовательно увеличивать в течение 1 часа, начиная с напряженности электрического поля 6 *кв/см* и кончая напряженностью 16 *кв/см*.

На основании проведенных исследований для подводимых напряжений при резонансе $v_{рез}$ (измеренных на контактном разъеме кюветы) и ширины полосы излучателей $\Delta f/f_{рез}$ можно принять следующие значения. Для 16 образцов, колеблющихся на 1-й гармонике, при средней резонансной частоте 5 *мггц* $v_{рез} = (0{,}2 \pm 0{,}04)$ *в*, $\Delta f/f_{рез} = 0{,}045$. Для 12 образцов, колеблющихся на 3-й гармонике, при средней резонансной частоте на 3-й гармонике 5 *мггц* $v_{рез} = (1{,}6 \pm 0{,}2)$ *в*, ширина полосы $\Delta f/f_{рез} = 0{,}02$.

После поляризации, заметные изменения частотных характеристик во времени происходят в течение первых 3—4 суток, а затем частотные характеристики, по крайней мере в течение года, изменяются практически очень мало. После повторной поляризации частотные характеристики, как правило, восстанавливаются полностью.

Кроме режима поляризации на форму частотной характеристики излучателей из керамики Т-1700 влияет способ крепления излучателя. На

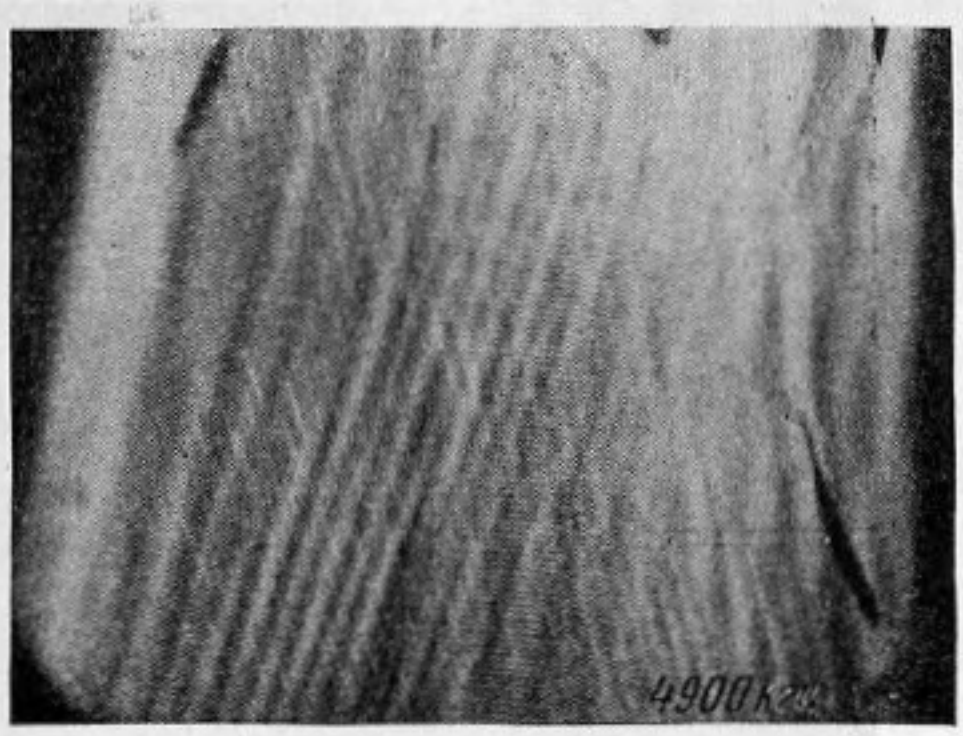


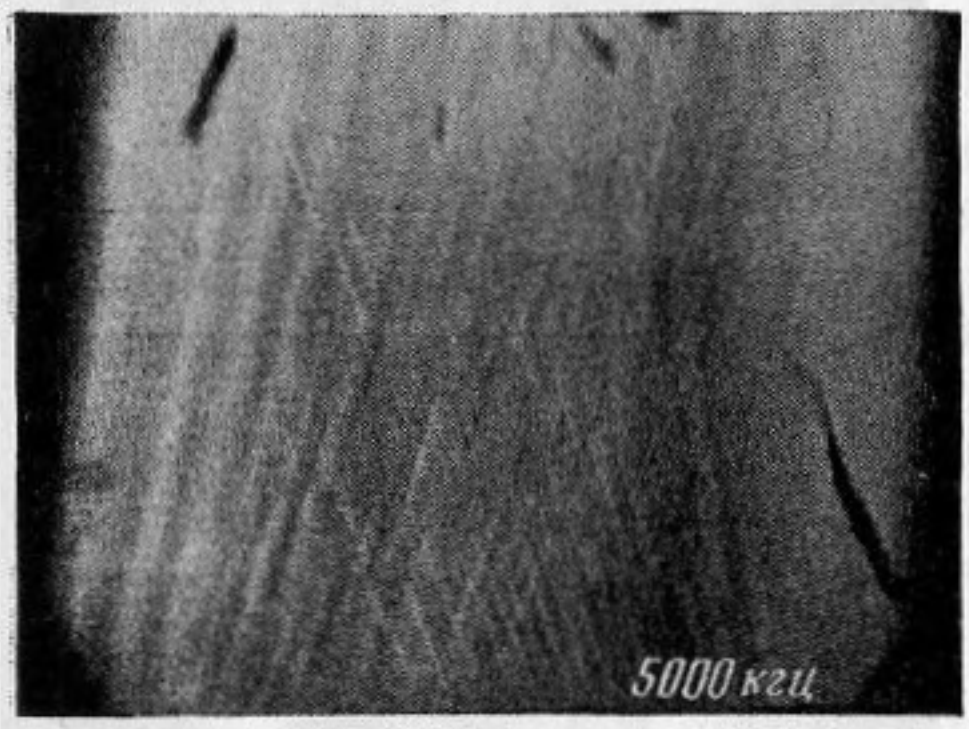
Фиг. 6

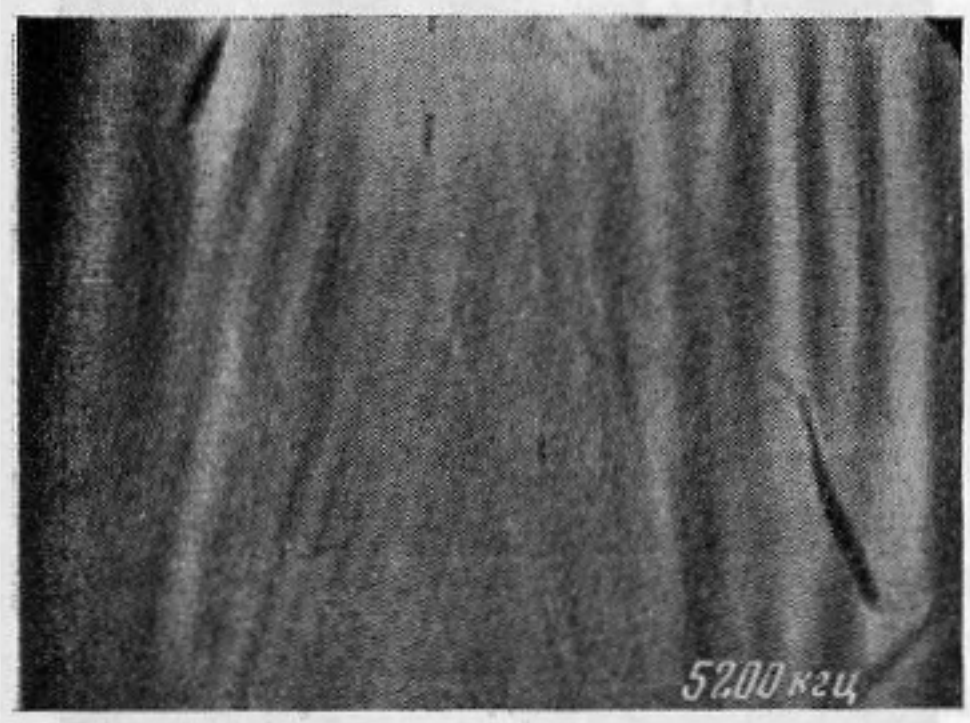
фиг. 6 приведены частотные характеристики одного из излучателей с электродами разной формы. Излучатель в этом случае зажимался между двумя электродами следующих форм: 1. Пластина 34 × 20 *мм*² и рамка с вырезом 30 × 18 *мм*². 2. Две рамки с квадратным вырезом 18 × 18 *мм*². 3. Две рамки с круглым вырезом ϕ 18 *мм*. 4. Две рамки с прямоугольным вырезом 25×18 *мм*². 5. Две рамки с прямоугольным вырезом 30 × 18 *мм*², толщина рамок 2 *мм*.

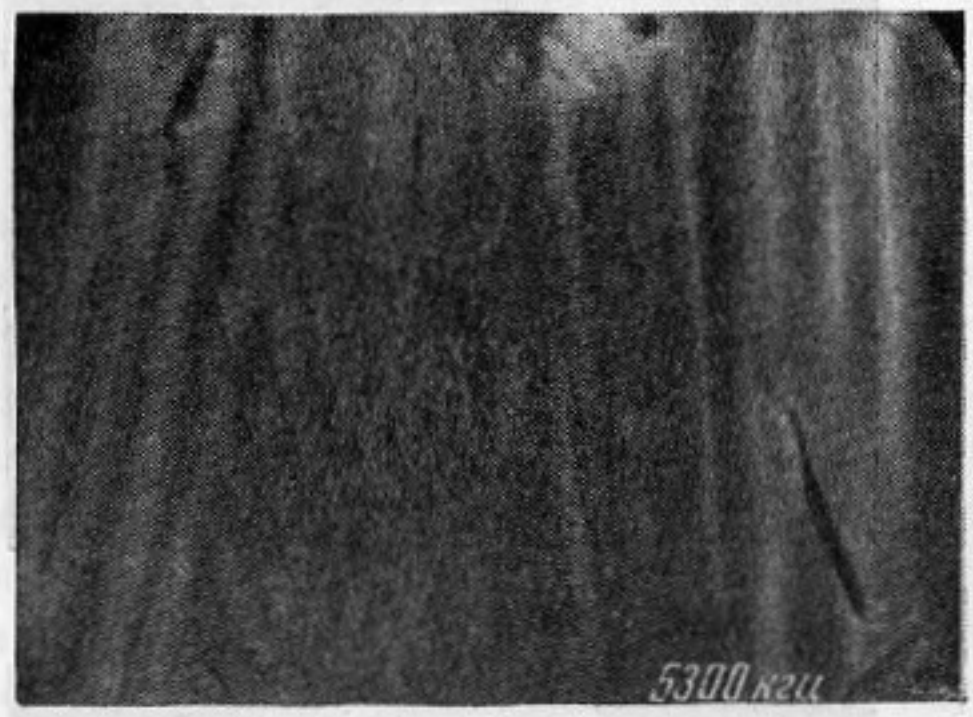
Из фигуры видно, что кривые *1* и *2*, соответствующие креплению рамками-электродами с круглым и квадратным вырезами, сходны между собой; кривые *4* и *5*, соответствующие креплениям рамками с прямоугольным вырезом и сплошным, также сходны между собою. Промежуточное положение между этими двумя типами кривых занимает кривая *3*, соответствующая креплению рамками с вырезами 24 × 18 *мм*². Таким образом, следует отметить, что при переходе от крепления с круглыми и квадратными вырезами к креплению рамками с прямоугольными вырезами, происходит заметное расширение резонансной кривой с увеличением интенсивности ультразвуковых колебаний. Такая зависимость, вероятно, может быть объяснена влиянием краевого эффекта на границе крепления пьезоизлучателя с одновременным возникновением, помимо колебаний по толщине, колебаний других типов в случае более симметричного крепления.

В ряде случаев при снятии частотных характеристик у некоторых излучателей наблюдался второй, меньший по величине, максимум со стороны высоких частот. В тех случаях, когда не было явно выраженного второго максимума, частотная характеристика на более высоких частотах всегда была более пологой, как это можно заметить на всех приведенных частотных характеристиках. Величина вторых максимумов зависит от







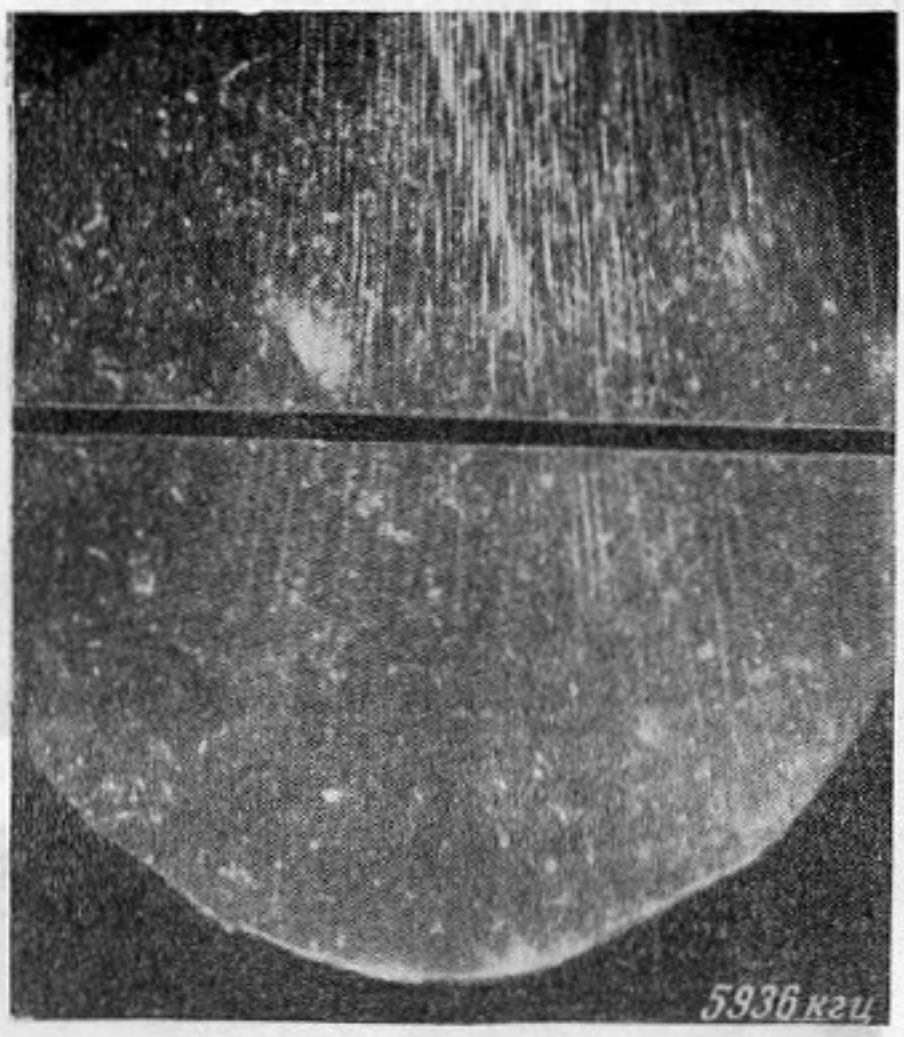


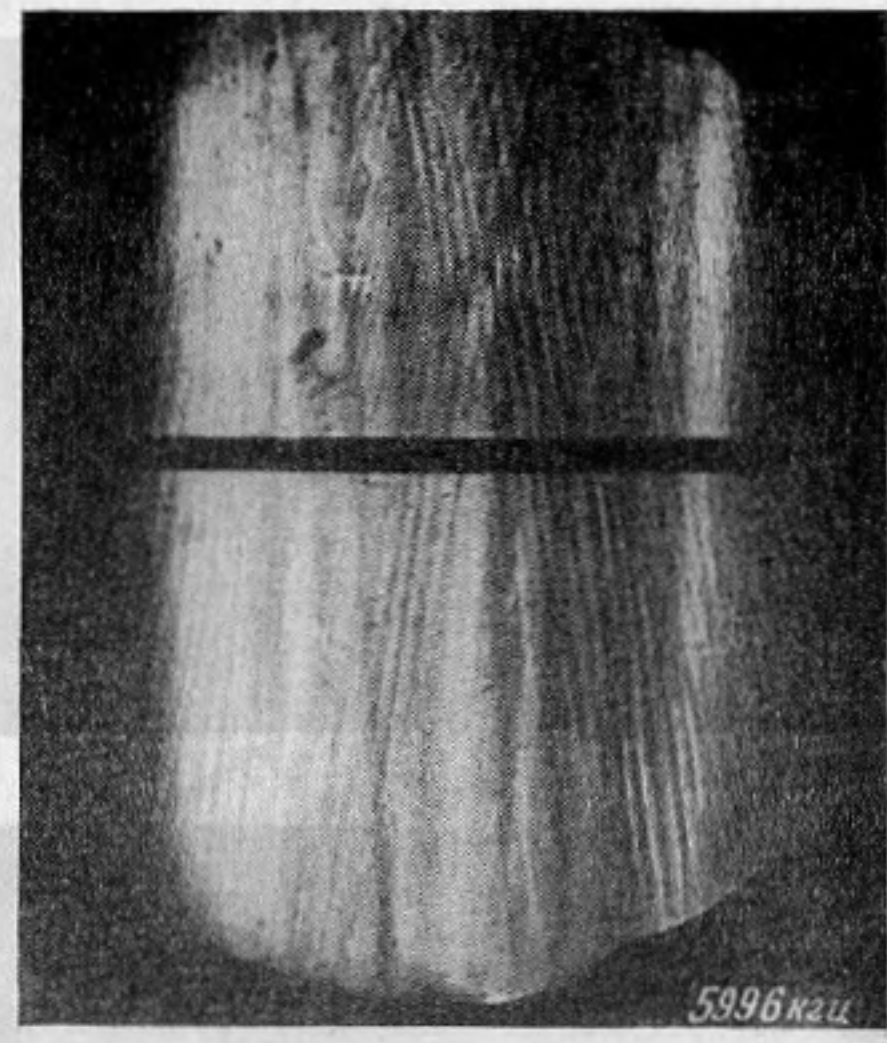
Фиг. 7

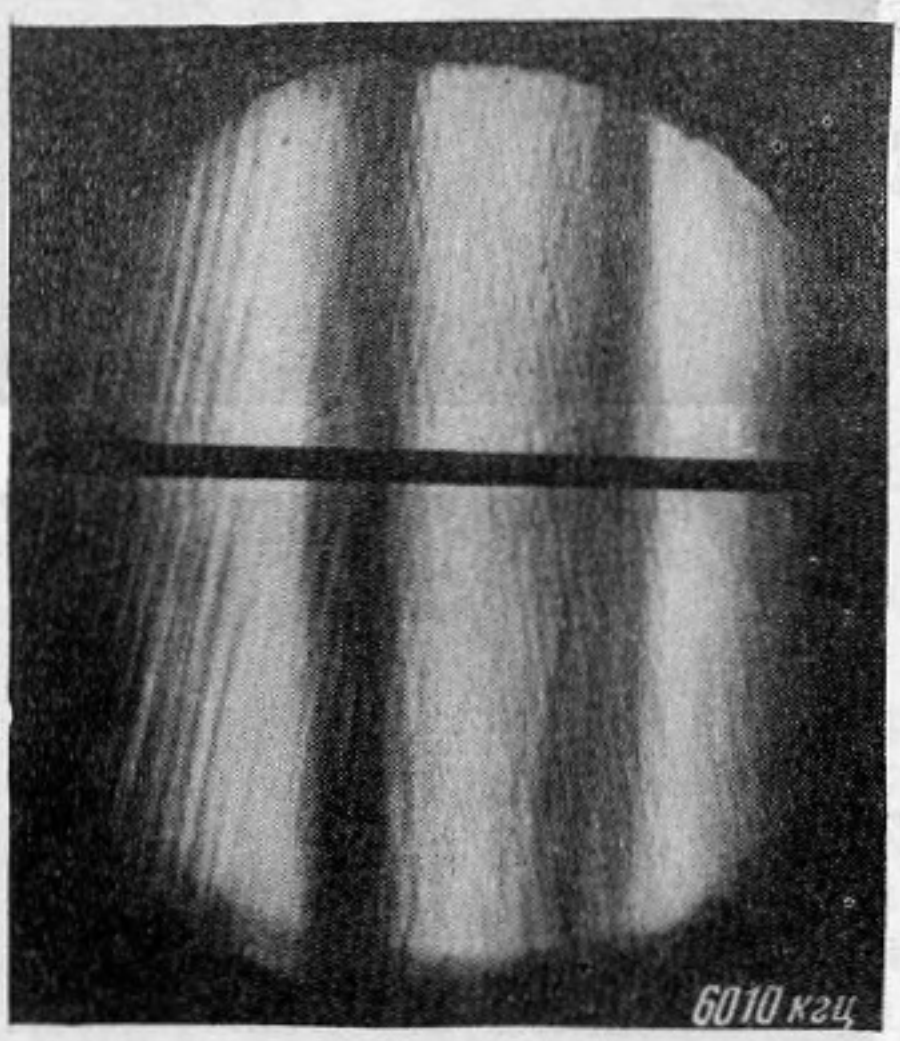
способа крепления (см. фиг. 6), что согласуется с результатами Голяминой [6].

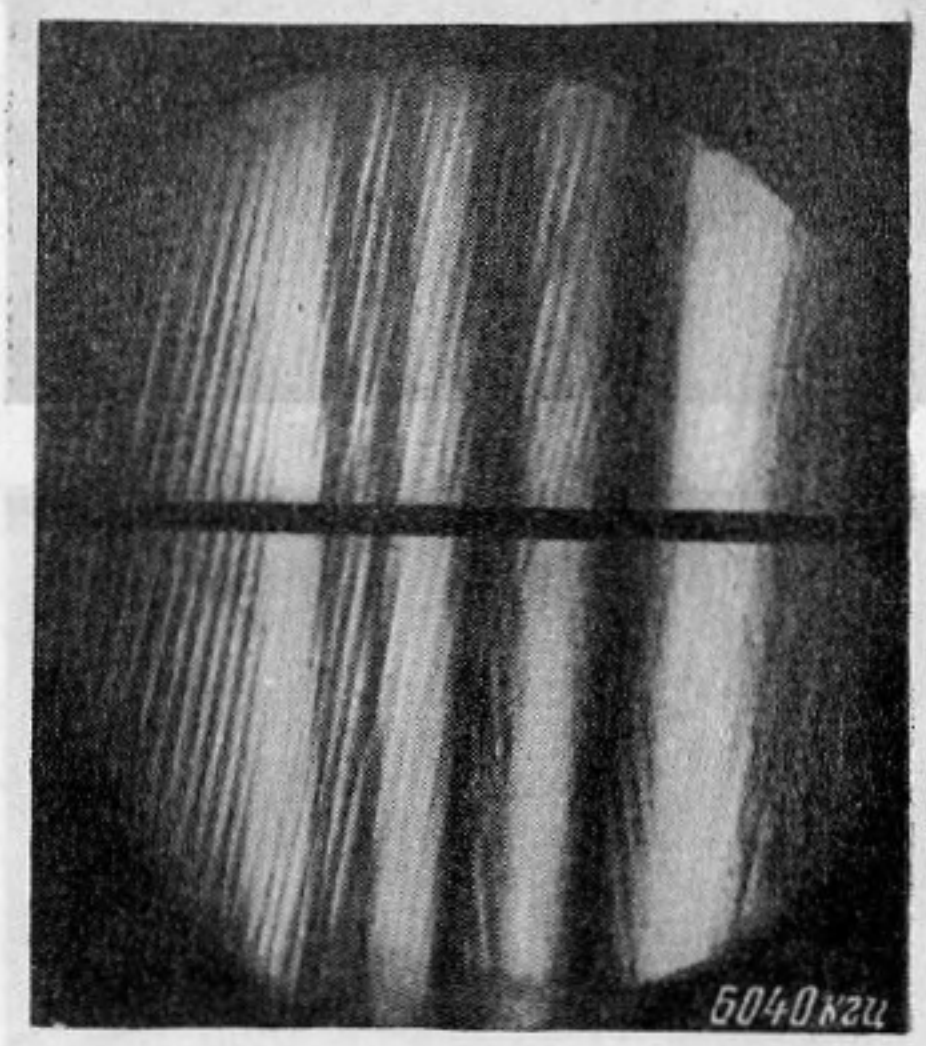
Многочисленные исследования [5, 6, 8] показали, что сложный характер колебаний пьезокерамических пластин по толщине, обусловленный в основном конечными контурными размерами пластин, приводит к существованию дополнительных резонансов вблизи основной частоты резонанса колебаний по толщине. По-видимому, у пластинок с большим отношением линейных контурных размеров к толщине t ($l_{экв}/t \sim 50—100$ в наших опытах)* дополнительные резонансные частоты выражены не столь сильно, как у дисков, исследованных Шоу [8] ($2R/t \leqslant 6{,}63$) и другими исследователями. Очевидно, именно поэтому ни одна из частотных характеристик в наших исследованиях не имела острых и раздельно расположенных максимумов излучения. Способ крепления пластинок изменял гра-

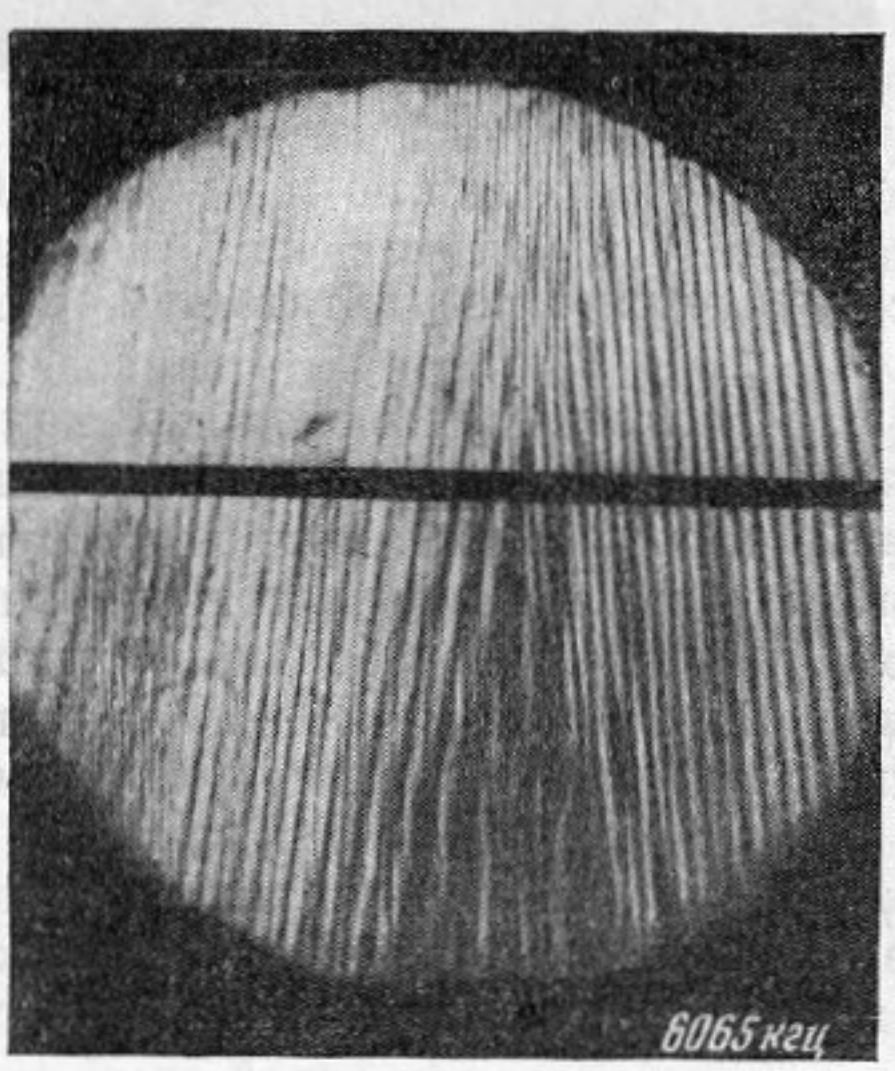
* За эквивалентную длину пластинки принята величина $l_{экв} = \sqrt{S}$, где S — площадь пластинки.

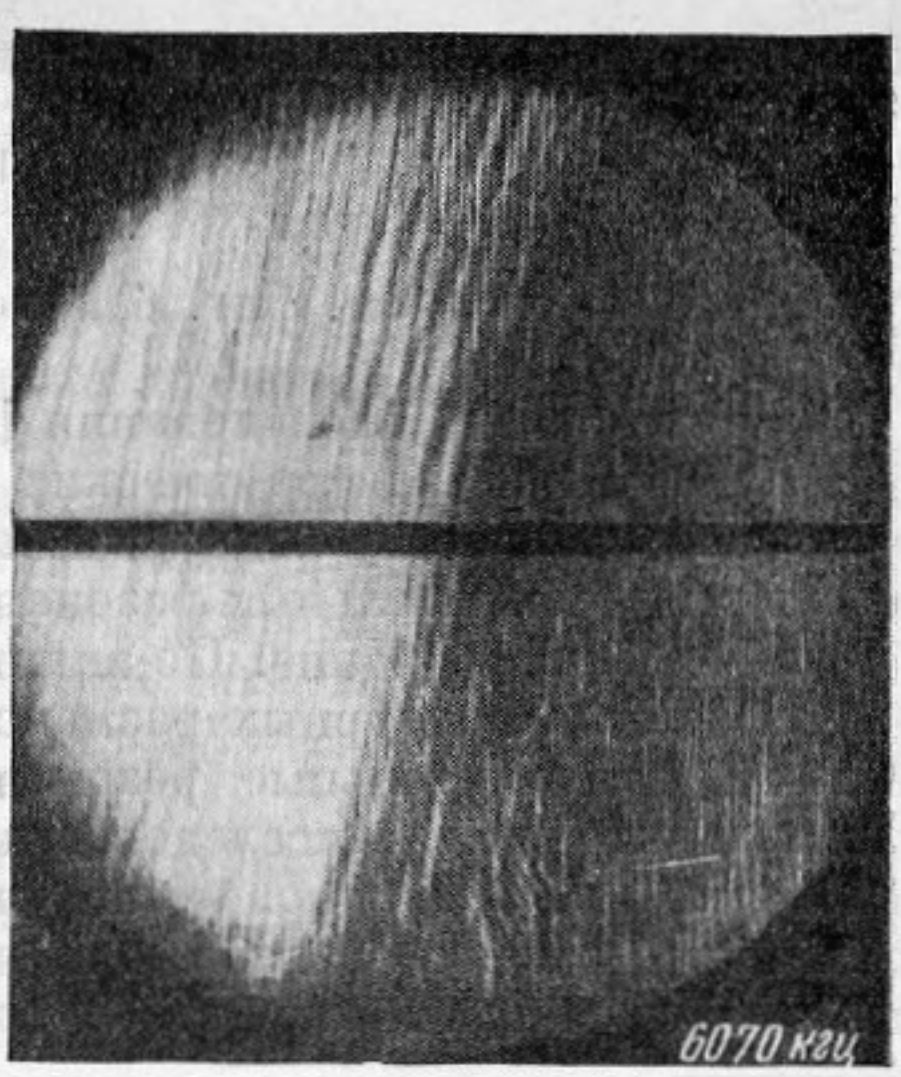












Фиг. 8

ничные условия на контуре пластинки и мог поэтому привести к возникновению более интенсивных колебаний на одной из дополнительных резонансных частот. Однако наличие в ряде случаев дополнительных максимумов излучения на первой и третьей гармонике заставляет предположить, что характер колебаний излучателя принципиально не изменяется при увеличении $l_{экв}/t$ до 100.

Ультразвуковое поле излучателя из пьезокерамики отличается большой однородностью в пределах ширины частотной характеристики около каждой резонансной частоты, тогда как для кварцевых излучателей однородное поле удавалось получить только при определенных частотах. На фиг. 7 и 8 приведены для сравнения фотографии ультразвуковых полей, полученных на различных частотах от излучателей соответственно из керамики Т-1700 и из кварца *X*-среза.

Единственным недостатком излучателей ультразвука из керамики титаната бария для дифракционных модуляторов света является их очень большая электрическая емкость, что создает существенные трудности в согласовании выхода генератора с излучателем и приводит к необходимости реализовывать бо́льшие мощности, чем это требуется для возбуждения излучателя.

Этот недостаток сказывается еще больше при переходе на более высокие частоты; поэтому уже для получения ультразвуковых колебаний на частотах порядка 10 *мггц* выгоднее пользоваться излучателями, колеблющимися на 3-й гармонике, хотя частотные характеристики излучателей на 1-й гармонике на 10 *мггц* значительно лучше, чем для излучателей на 3-й гармонике.

Выводы

На основании проведенных исследований ультразвуковых излучателей в диапазоне частот 3—15 *мггц* следует, что из известных в настоящее время пьезоматериалов наилучшим для конструирования дифракционных модуляторов света является пьезокерамика титаната бария.

На частотах выше 6 *мггц* заметно сказывается влияние толщины серебряного слоя электрода на частотную постоянную, что следует учитывать при изготовлении высокочастотных излучателей. Для получения широкополосных излучателей с большой пьезоконстантой является выгодным режим поляризации последовательно полем напряженностью 10—12 *кв/см* и 15—16 *кв/см* по 20 *мин*. При возбуждении излучателей на резонансных частотах, для получения интенсивности ультразвука, потребной для максимальной глубины модуляции света, необходимы напряжения около 0,2 *в* при возбуждении на 1-й гармонике и около 1,5 *в* при возбуждении на 3-й гармонике на частоте 5 *мггц*. Ширина полосы частот, в которой для получения интенсивности ультразвука, необходимой для максимальной глубины модуляции, требуются напряжения на излучателе, не превышающие в 1,4 раза напряжения на резонансной частоте, составляет 4,5% при возбуждении на 1-й гармонике и 2% при возбуждении на 3-й гармонике.

Заметное изменение частотных характеристик происходит в течение первых 3—4 суток после поляризации, после чего они практически не изменяются, по крайней мере, в течение года. Частотные характеристики, как правило, имеют плавный вид без резко выраженных вторичных максимумов, причем наличие и характер вторичных максимумов связаны с условиями закрепления излучателей.

Ультразвуковые поля пьезокерамических излучателей отличаются большой однородностью в пределах ширины частотной характеристики около каждой резонансной частоты.

В проведении экспериментов по исследованию пьезокерамических излучателей принимали участие Л. Н. Розина и Н. А. Драновский. В зак-

лючение авторы выражают благодарность В. Г. Вафиади за ценные указания при написании настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Попов. Геодезические световые дальномеры ГОИ с интерференционным и дифракционным модуляторами света. Изв. высш. учебн. завед. МВО СССР, Геодезия и аэрофотосъемка, 1957, 2, 55—71.
2. Ю. В. Попов, И. И. Адрианова, И. А. Тельтевский. Фазовый светолокационный дальномер. Оптикомех. промышл., 1959, 1, 30—41.
3. F. H. Sanders. Intensity measurements in the diffraktion of light by ultrasonic waves. Canad. J. Res., 1936, A14, 158.
4. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. Изд. 2-е, М., ИЛ, 1957, стр. 92.
5. Г. П. Мотулевич, И. Л. Фабелинский. Исследование акустического излучения титаната бария. Ж. эксп. и теор. физ., 1953, 25, 5 (11), 605—613.
6. И. П. Голямина. О колебаниях по толщине поляризованных пластин титаната бария. Акуст. ж., 1955, 1, 1, 40—47.
7. У. Мэзон. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике (Пер. под ред. А. В. Шубникова и С. Н. Ржевкина), М., ИЛ, 1952.
8. E. A. J. Shaw. On the resonant vibrations of thick barium titanate disks. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 1, 38—50.

Государственный оптический институт
Ленинград

Поступила в редакцию
24 апреля 1959 г.