

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ , $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$ , $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ и $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$

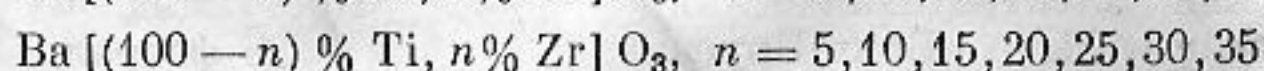
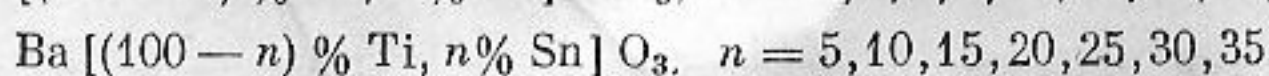
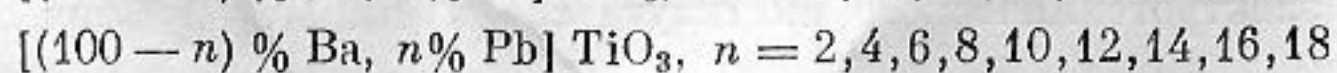
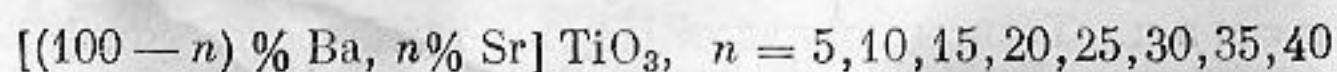
*Н. А. Рой*

Экспериментально определен температурный ход диэлектрической проницаемости некоторых твердых растворов на основе титаната бария, измерены их пьезомодули и найдена величина коэрцитивной силы при комнатной температуре. Установлено, что наиболее интересными с точки зрения применения в качестве электромеханических преобразователей являются твердые растворы титаната бария и титаната свинца, титаната бария и станната бария.

Замена в решетке титаната бария ионов бария ионами кальция, стронция, свинца и ионов титана ионами циркония, олова вызывает существенное изменение свойств этого вещества [1]. Известно, например, что частичная замена ионов бария ионами стронция [2—4] или замена ионов титана ионами циркония [2] приводит к тому, что максимум диэлектрической проницаемости, соответствующий высокотемпературному фазовому переходу, смещается в сторону низких температур. В работе [5] указывается на увеличение коэрцитивной силы керамики после замены части ионов бария ионами свинца.

Замена одних ионов другими осуществляется путем образования твердых растворов изоморфных веществ при спекании керамики. Например, для образования керамики, в которой осуществлена частичная замена ионов бария ионами стронция, поступают следующим образом. Изготавливается обычным способом керамика титаната бария и титаната стронция, затем после тщательного размола полученных веществ составляются порошкообразные смеси определенных количеств, выраженных в молекулярных процентах, исходных компонент. Полученные смеси прессуются и обжигаются обычным способом. При температуре порядка  $1360^\circ\text{C}$  в смеси происходит реакция в твердой фазе, в результате чего образуется твердый раствор, в решетке которого некоторые ионы бария заменены ионами стронция.

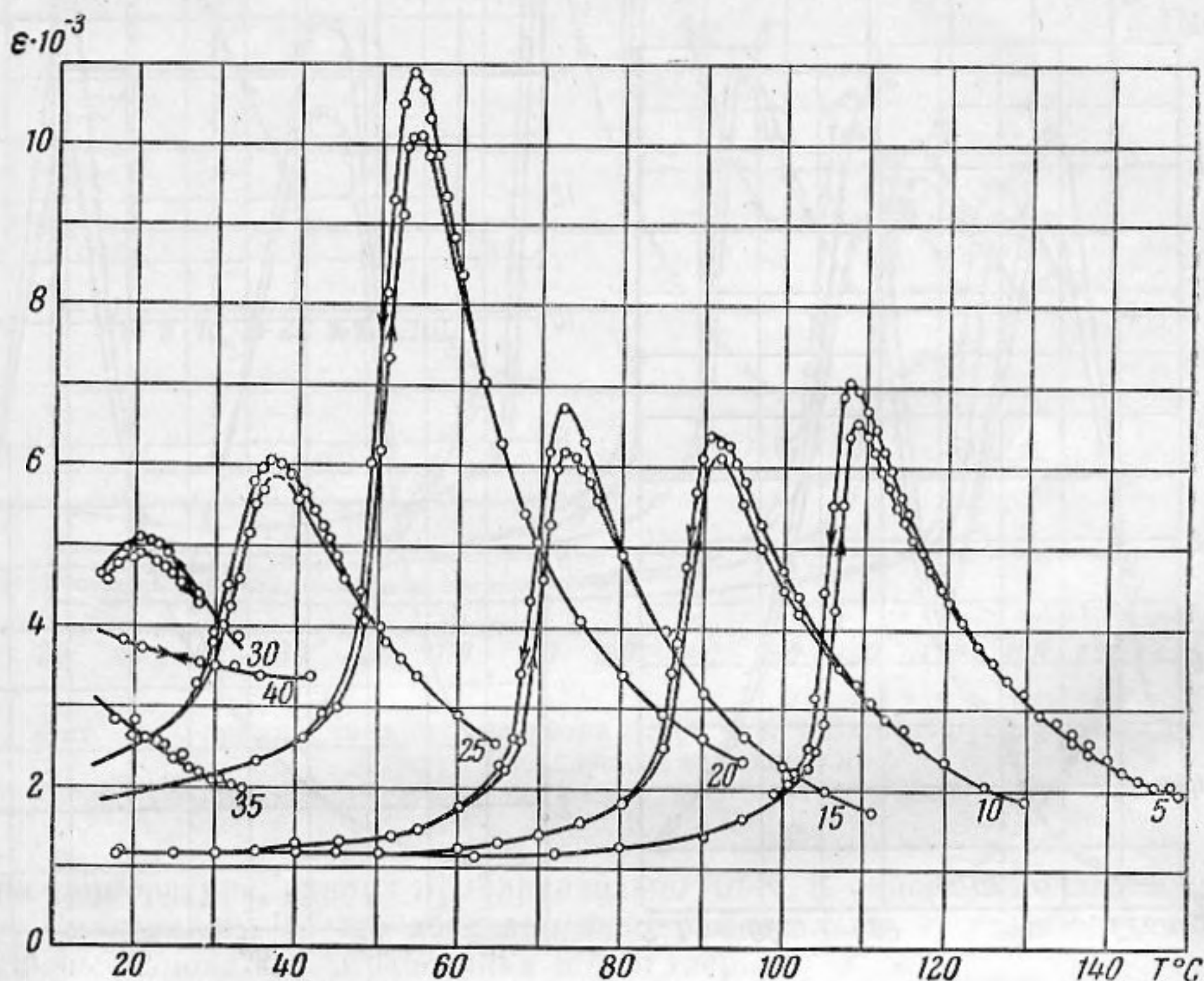
С целью выяснения свойств, интересных с точки зрения применения в качестве электромеханических преобразователей, нами были произведены исследования изменений свойств титаната бария, происходящих в результате замены в решетке титаната бария ионов бария ионами стронция и свинца и ионов титана ионами циркония и олова. В нашем распоряжении имелись изготовленные в Научно-исследовательском физико-математическом институте Ростовского государственного университета им. В. М. Молотова и любезно предоставленные нам Н. С. Новосильцевым образцы твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ,  $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$  следующих составов:



Исходные образцы были разрезаны и отшлифованы до размеров  $2 \times 3 \times 5$  мм<sup>3</sup>. Электроды наносились на грани  $3 \times 5$  мм<sup>2</sup>.

### Температурная зависимость диэлектрической проницаемости твердых растворов

При помощи  $Q$ -метра КВ-1 были произведены измерения диэлектрической проницаемости приведенных выше твердых растворов при разной температуре. На фиг. 1, 2, 3, 4 приведены температурные зависимости диэлек-

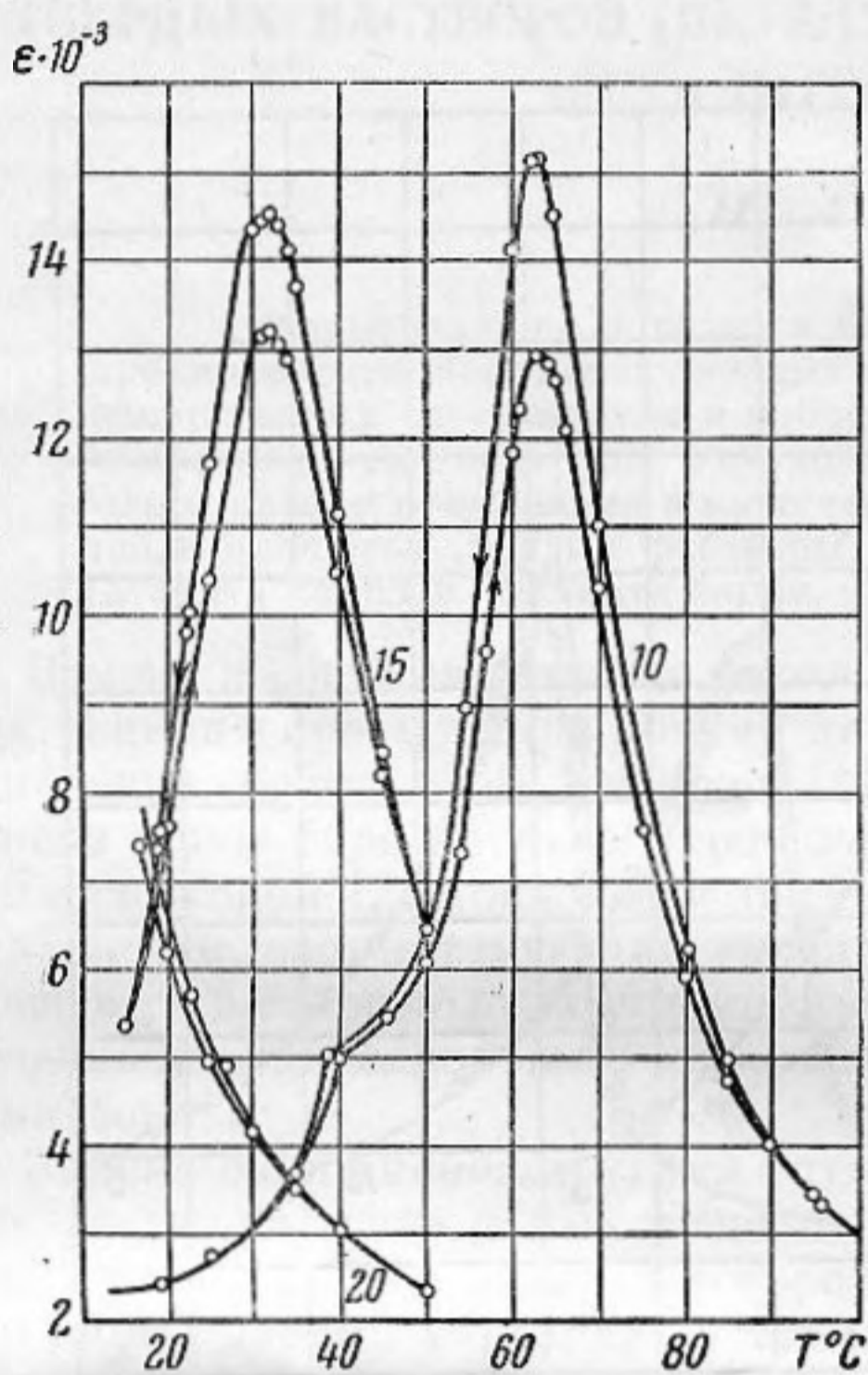


Фиг. 1. Формула твердого раствора  $[(100 - n)\% \text{Ba}, n\% \text{Sr}]\text{TiO}_3$  (цифрами обозначены значения  $n$ )

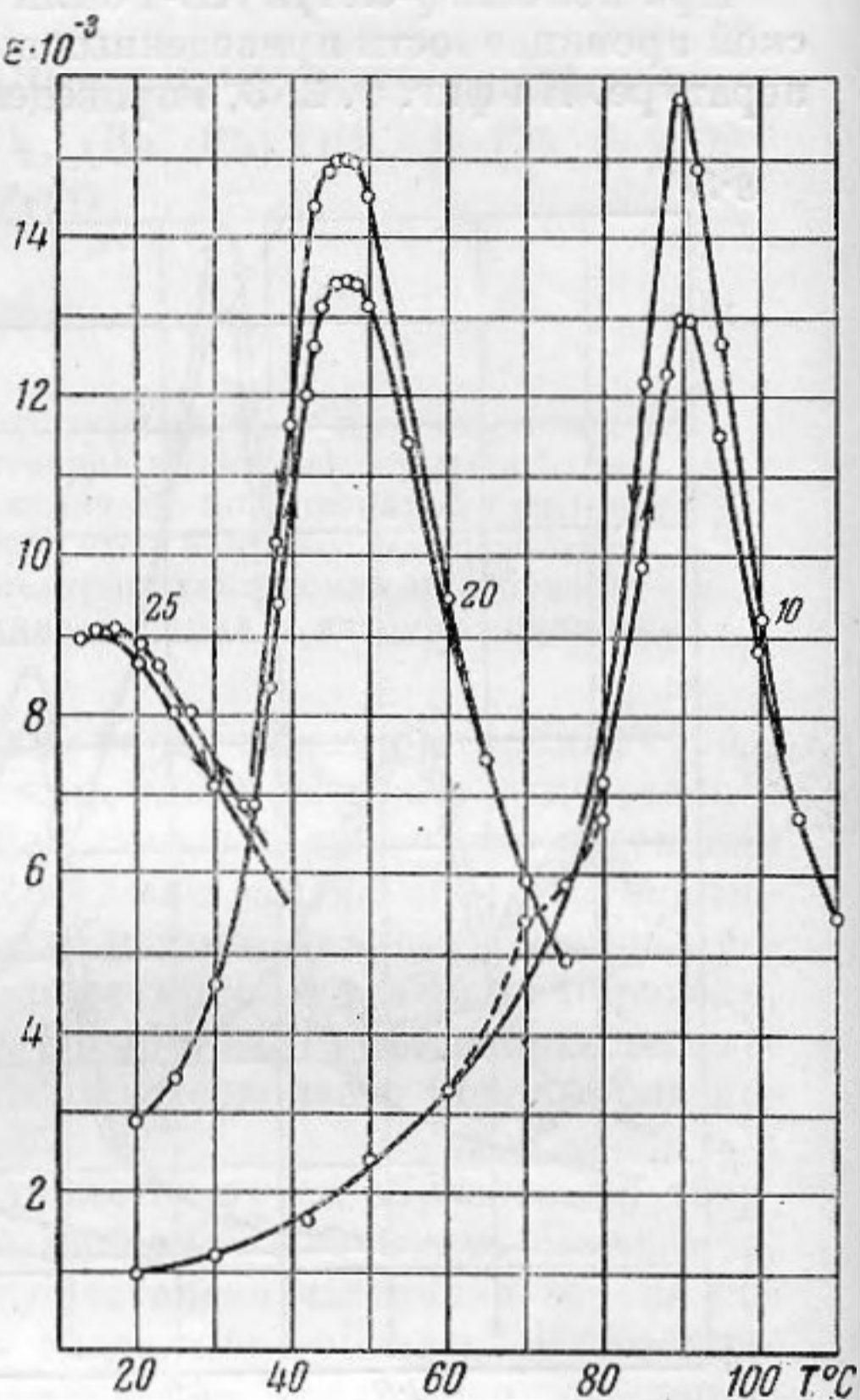
трической проницаемости некоторых из этих твердых растворов. На основании полученных результатов можно видеть, что замена ионов Ba ионами Sr и замена ионов Ti ионами Sn и Zr приводит к смещению максимума  $\epsilon$ , соответствующего высокотемпературному фазовому переходу, в сторону низких температур. Температурные точки, соответствующие максимумам  $\epsilon$  этих твердых растворов с различным содержанием добавляемых компонент, нанесены на фиг. 5. На основании приведенных на этой фигуре данных видно, что температура, соответствующая максимуму  $\epsilon$ , линейно зависит от концентрации добавляемых компонент, причем наибольший наклон имеет прямая, отвечающая твердым растворам типа  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ , т. е. наиболее быстрое смещение высокотемпературного фазового перехода в сторону низких температур вызывает замена ионов Ti ионами Sn.

Сравнение результатов измерений образцов твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ , имевшихся в нашем распоряжении, с результатами, приведенными в работе Г. А. Смоленского [2], показывает, что скорости смещения высокотемпературных фазовых переходов у наших образцов такие же, как и у образцов Смоленского. Отметим, что на основании измерений диэлектрической проницаемости твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ,

проведенных Смоленским в более широком интервале, можно видеть, что первый низкотемпературный фазовый переход, имеющий место у титаната бария вблизи  $0^\circ\text{C}$ , смещается в сторону низких температур при частичной замене ионов Ba ионами Sr медленнее, чем высокотемпературный переход. Благодаря этому область температур, в которой существует тетрагональная фаза, сокращается и при содержании  $\text{SrTiO}_3$ , равном примерно 70—80%, исчезает полностью. Это, повидимому означает, что



Фиг. 2. Формула твердого раствора  $\text{Ba}[(100-n)\% \text{Ti}, n\% \text{Sn}]\text{O}_3$  (цифрами обозначены значения  $n$ )



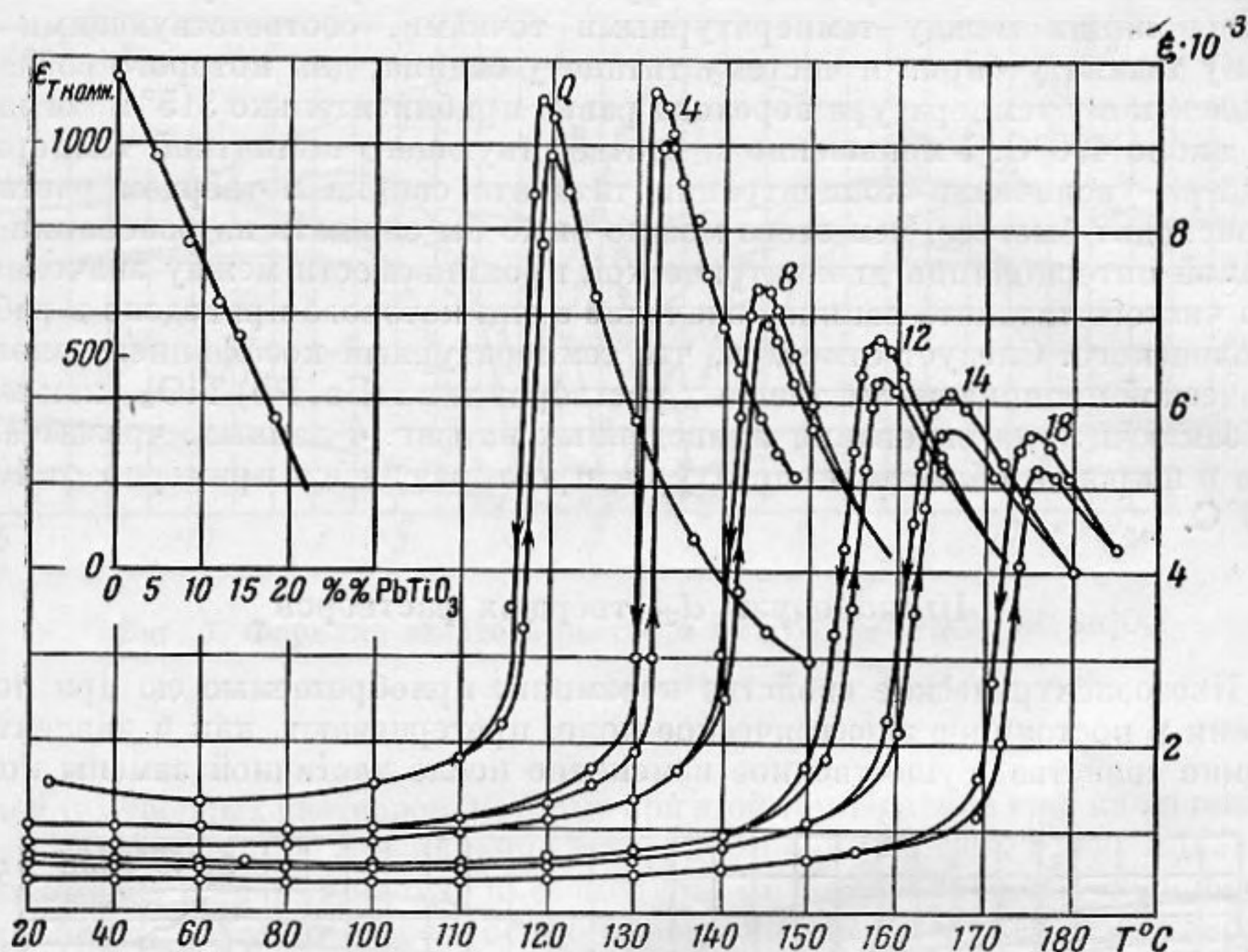
Фиг. 3. Формула твердого раствора  $\text{Ba}[(100-n)\% \text{Ti}, n\% \text{Zr}]\text{O}_3$  (цифрами обозначены значения  $n$ )

при таком соотношении компонентов в твердом растворе  $(\text{BaSr})\text{TiO}_3$  происходит при понижении температуры переход вещества из кубической фазы непосредственно в орторомбическую.

Как показано на фиг. 2 и 3, в случае твердых растворов  $\text{Ba}^*(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$  при содержании  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$ , равном приблизительно 10%, наблюдается чрезвычайно большой и сильно растянутый по температурной шкале пик  $\epsilon$  с небольшим нарушением плавности хода  $\epsilon$  перед максимумом, аналогичным тому, которое имеет место при слиянии максимумов  $\epsilon$ , соответствующих первому низкотемпературному и высокотемпературному переходам у твердого раствора (30% Ba, 70% Sr)  $\text{TiO}_3$  Смоленского. Имея в виду этот факт, можно предположить, что и в случае твердых растворов  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$  имеет место сближение фазовых переходов, происходящее, однако, с большей скоростью, благодаря чему уже при 10% добавляемой компоненты в твердых растворах этих типов происходит при понижении температуры переход из кубической фазы в орторомбическую, а возможно даже и в тригональную.

Линейная экстраполяция зависимости температуры, соответствующей максимуму  $\epsilon$  при высокотемпературном фазовом переходе, от concentra-

ции  $\text{SrTiO}_3$  в твердых растворах типа  $(\text{Ba}, \text{Sr}) \text{TiO}_3$  на 100% содержание  $\text{SrTiO}_3$  приводит к тому, что фазовый переход титаната стронция из не-сегнетоэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую должен иметь место

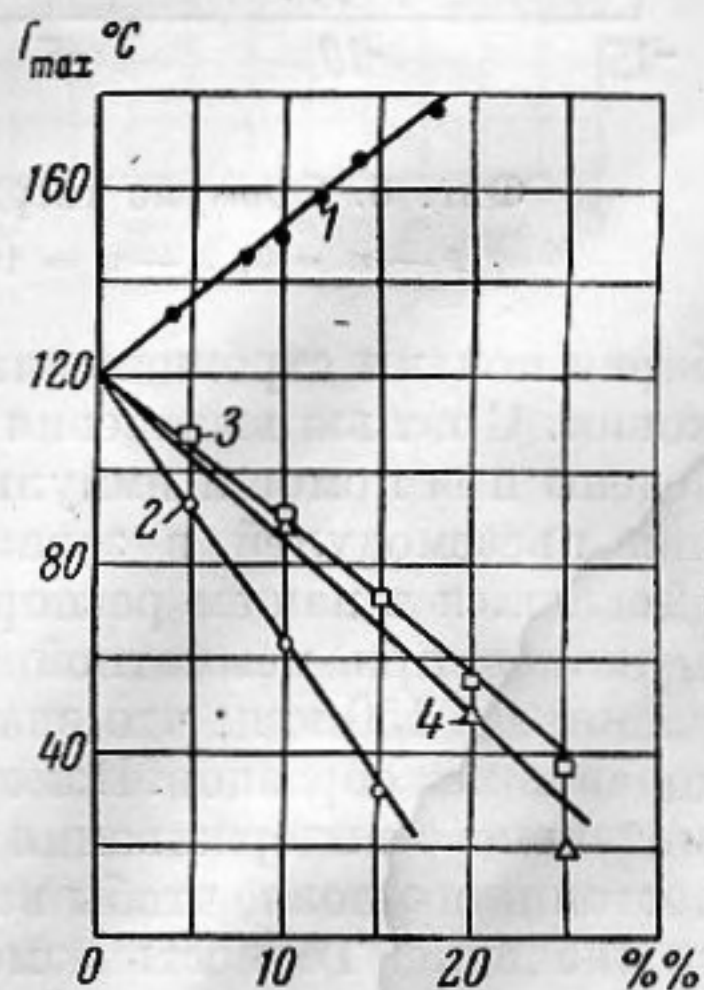


Фиг. 4. Формула твердого раствора  $[(100 - n)\% \text{Ba}, n\% \text{Pb}]\text{TiO}_3$  (цифрами обозначены значения  $n$ )

при температуре, равной приблизительно  $70^\circ \text{K}$ . В одной из последних работ Смоленского [6] это доказано экспериментально. Если такая линейная экстраполяция справедлива и для твердых растворов  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ , то можно ожидать, что  $\text{BaZrO}_3$ , так же, как и  $\text{SrTiO}_3$ , должен иметь переход в сегнетоэлектрическую фазу при низких температурах, порядка  $10^\circ \text{K}$ , в то время как  $\text{BaSnO}_3$  не превратится в сегнетоэлектрик ни при каких температурах.

Замена ионов Ba ионами Pb в решетке титаната бария приводит к смещению максимума  $\epsilon$ , соответствующего высокотемпературному переходу, в сторону высоких температур (фиг. 4), причем небольшой пик  $\epsilon$ , соответствующий первому низкотемпературному переходу, смещается в сторону низких температур, в результате чего область существования тетрагональной фазы у твердых растворов типа  $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$  в отличие от твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$  расширяется.

На фиг. 4 видно, что максимальное значение  $\epsilon$  в области высокотемпературного перехода, так же как и значение  $\epsilon$  при комнатной температуре, понижается при увеличении содержания  $\text{PbTiO}_3$  в твердом растворе.

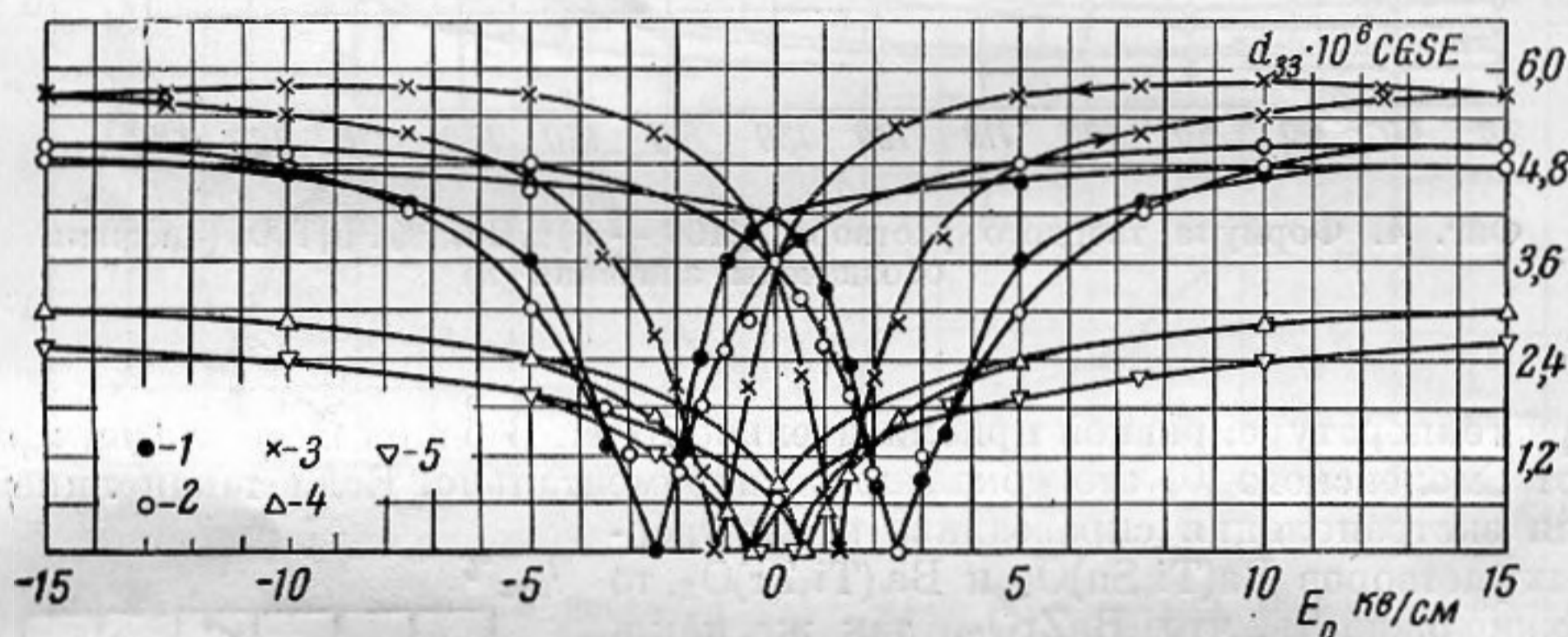


Фиг. 5. 1— $\text{PbTiO}_3$ , 2— $\text{BaSnO}_3$ , 3— $\text{SrTiO}_3$ , 4— $\text{BaZrO}_3$

Скорость смещения высокотемпературного фазового перехода, найденная на основании приведенной на фиг. 5 зависимости температуры, соответствующей максимуму  $\epsilon$ , от концентрации титаната свинца оказывается несколько меньше скорости, которую можно получить путем линейной интерполяции между температурными точками, соответствующими чистому титанату бария и чистому титанату свинца, для которого согласно Смоленскому температура перехода равна приблизительно  $515^\circ$  и согласно [7] около  $490^\circ\text{C}$ . Уменьшение  $\epsilon$ , соответствующего комнатной температуре, при увеличении концентрации титаната свинца в твердом растворе происходит быстрее, чем этого можно было бы ожидать на основании линейной интерполяции диэлектрической проницаемости между значениями для чистого титаната свинца, значение  $\epsilon$  для которого приведено в работе Смоленского. Следует отметить, что температурный коэффициент диэлектрической проницаемости твердых растворов типа  $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$ , как можно заключить на основании приведенных на фиг. 4 данных, чрезвычайно мал в широкой области температуры, простирающейся примерно от  $10$  до  $410^\circ\text{C}$ .

### Пьезомодуль $d_{33}$ твердых растворов

Пьезоэлектрические свойства керамики, приобретаемые ею при помещении в постоянное электрическое поле, претерпевают, как и диэлектрические свойства, существенное изменение после частичной замены ионов



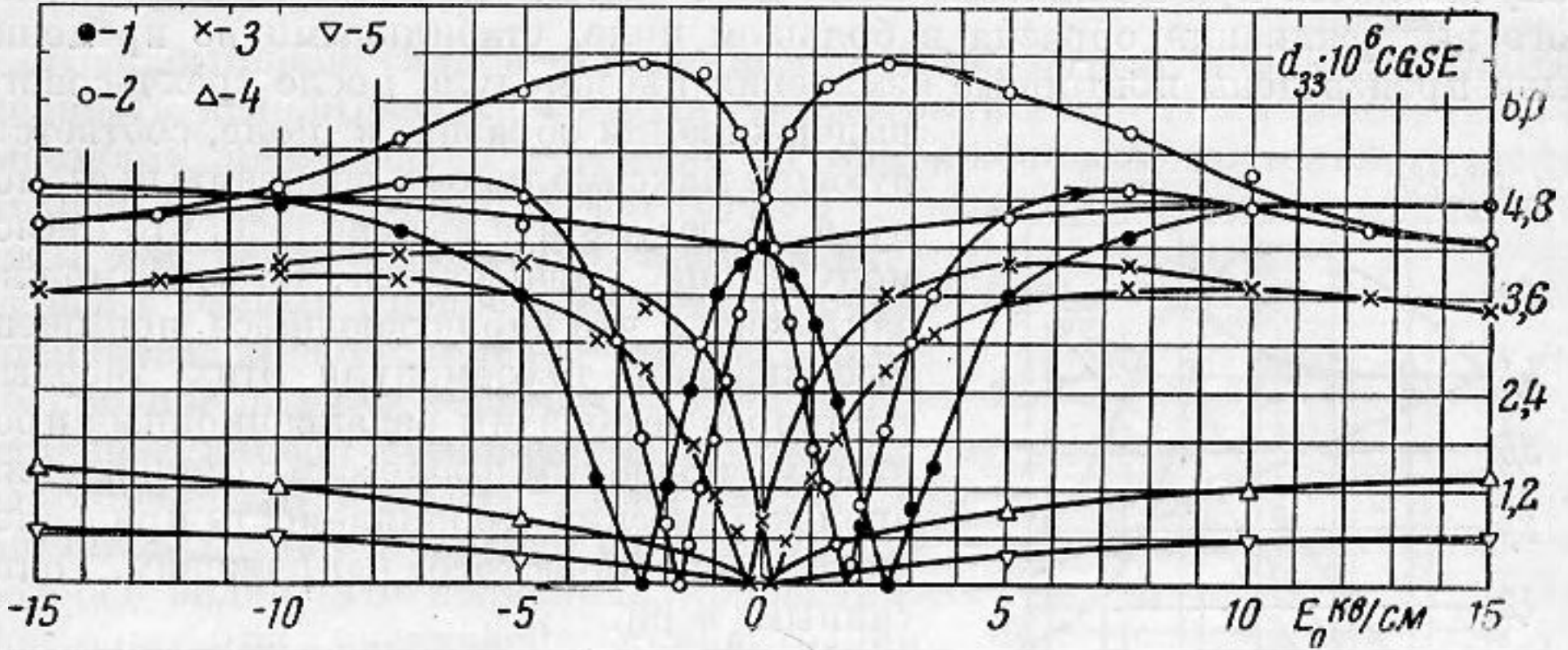
Фиг. 6. Формула твердого раствора  $[(100 - n)\% \text{Ba}, n\% \text{Sr}] \text{TiO}_3$ :

1 —  $n = 0$ , 2 —  $n = 10$ , 3 —  $n = 20$ , 4 —  $n = 25$ , 5 —  $n = 28$

бария ионами стронция или свинца, ионов титана ионами олова или циркония. С целью выяснения характера этого изменения нами были произведены при помощи импульсного электромеханического щупа [8] измерения пьезомодулей в зависимости от напряженности постоянного поля имевшихся в нашем распоряжении твердых растворов. Измерения производились при комнатной температуре. Частота заполнения импульсов равнялась  $150$  кгц; что значительно ниже всех собственных частот исследовавшихся образцов. Измерения производились после достаточно продолжительного выдерживания образца при каждом значении напряженности постоянного поля, чтобы величина пьезомодуля принимала установившееся значение. Точность измерения равнялась  $10-15\%$ .

Результаты измерений приведены на фиг. 6, 7, 8. Здесь показаны зависимости пьезомодулей  $d_{33}$  от напряженности постоянного поля для некоторых образцов твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ . Как показано выше, у этой группы твердых растворов имеет место смещение высокотемпературного фазового перехода в сторону низких температур при возрастании концентрации добавляемых компонентов. При анализе

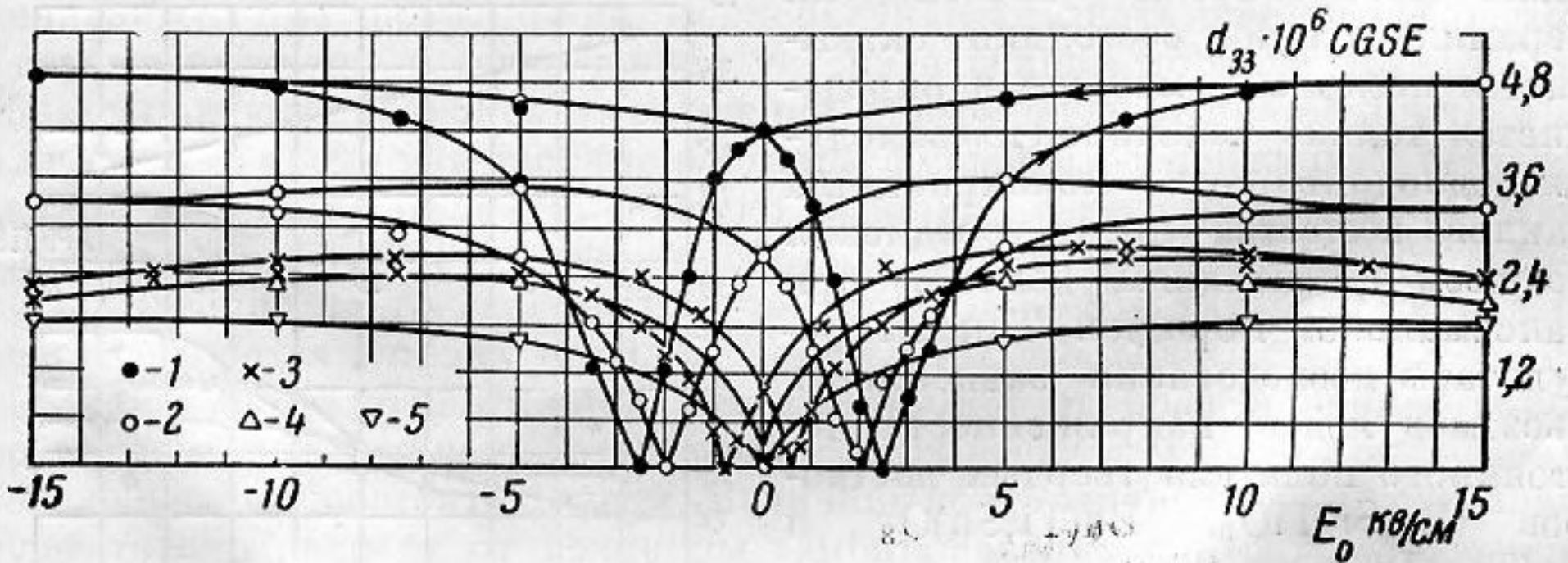
полученных результатов прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что пьезомодули твердых растворов, находящихся при комнатной температуре в сегнетоэлектрической фазе, значительно больше пьезомо-



Фиг. 7. Формула твердого раствора  $\text{Ba}[(100 - n)\% \text{Ti}, n\% \text{Sn}]\text{O}_3$ :

1 —  $n=0$ , 2 —  $n=10$ , 3 —  $n=20$ , 4 —  $n=25$ , 5 —  $n=30$

дулей тех твердых растворов, которые при этой температуре уже не являются сегнетоэлектриками. Это явление отчетливо видно на фиг. 9, где показана зависимость максимального пьезомодуля от концентрации добавляемой компоненты. Другой особенностью поведения пьезомодулей этих твердых



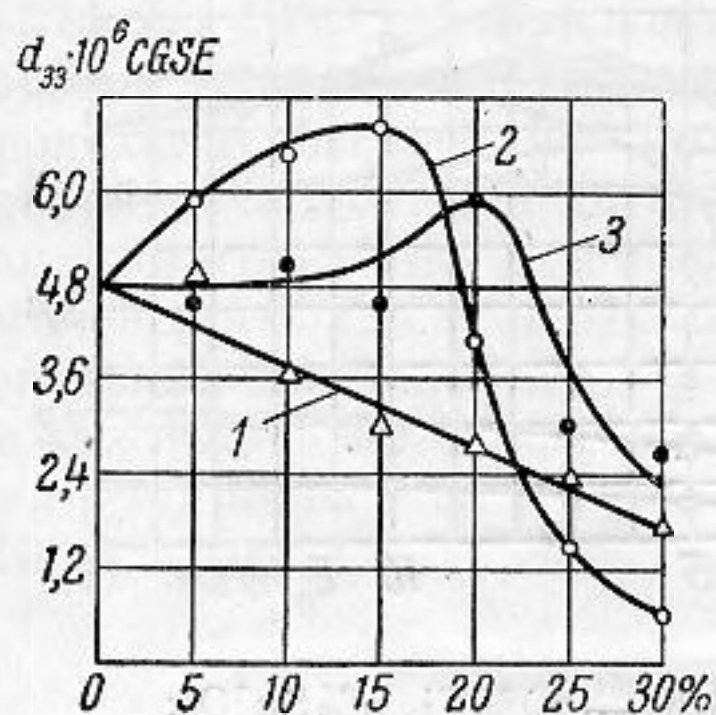
Фиг. 8. Формула твердого раствора  $\text{Ba}[(100 - n)\% \text{Ti}, n\% \text{Zr}]\text{O}_3$ :

1 —  $n=0$ , 2 —  $n=10$ , 3 —  $n=20$ , 4 —  $n=25$ , 5 —  $n=30$

растворов является то, что у тех твердых растворов, которые находятся при комнатной температуре в сегнетоэлектрической фазе, пьезомодуль при увеличении напряженности постоянного поля вначале возрастает, а затем при дальнейшем увеличении напряженности постоянного поля обнаруживает тенденцию к уменьшению. Наиболее ярко это явление выражено у твердых растворов типа  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ . У всех образцов этого типа, в которых содержание  $\text{BaSnO}_3$  не превышает 15%, т. е. до тех пор, пока они при комнатной температуре являются сегнетоэлектриками, имеется при некотором значении напряженности постоянного поля максимум пьезомодуля. Особенно больших значений пьезомодуль достигает при понижении напряженности постоянного поля после предварительного выдерживания образца в относительно большом, порядка 15 кВ/см, постоянном поле. Интересно отметить, что при повторном увеличении напряжен-

ности поля и вообще при увеличении напряженности постоянного поля в пределах от 0 до 15 кв/см или в пределах от 0 до -15 кв/см повышенные значения пьезомодуля хорошо воспроизводятся.

С целью выяснить, являются ли повышенные значения пьезомодуля, получающиеся при понижении поля до 1—1,5 кв/см после предварительного выдерживания образца в большом поле, стабильными во времени, были произведены повторные измерения пьезомодуля после трехчасового



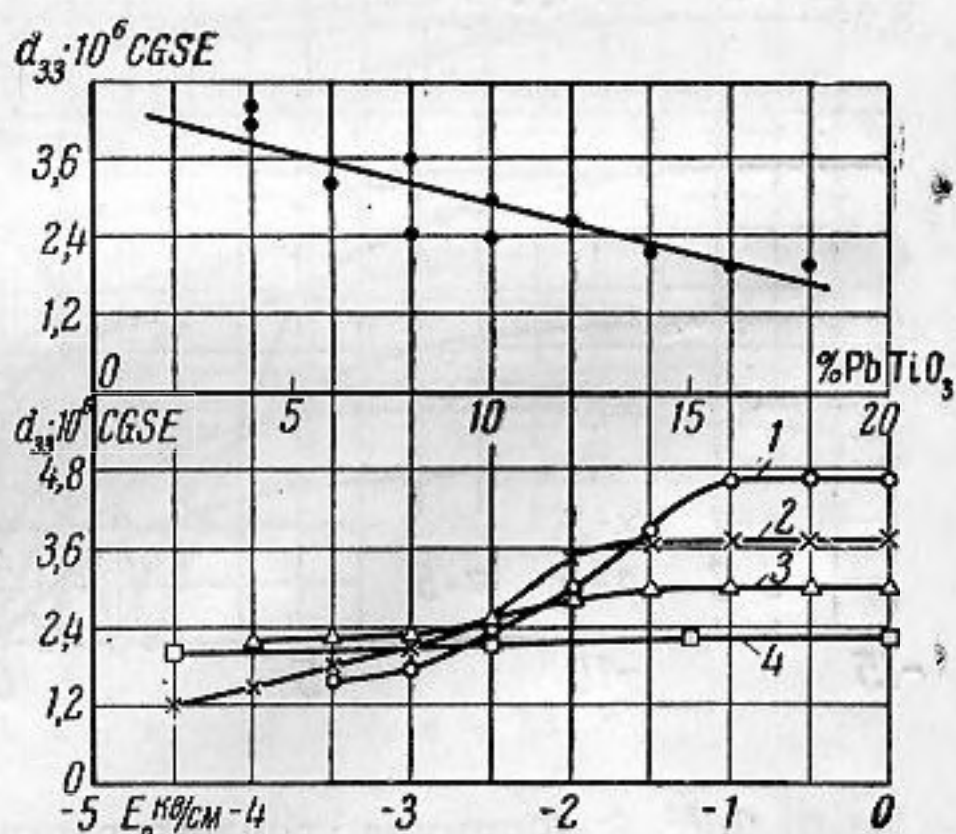
Фиг. 9

1 — BaZrO<sub>3</sub>, 2 — BaSnO<sub>3</sub>, 3 — SrTiO<sub>3</sub>

выдерживания образца в поле, соответствующем максимальному значению пьезомодуля. В результате выяснилось, что пьезомодуль не уменьшается. Отсюда можно заключить, что наблюдающиеся повышенные значения пьезомодуля этих твердых растворов не обязаны релаксационным процессам, подобным процессам установления диэлектрической проницаемости при наложении механического напряжения, описанным в [9].

Намечающееся падение пьезомодуля при больших постоянных полях можно объяснить, если предположить, что в высокотемпературной части сегнетоэлектрической области существенное влияние на величину пьезомодуля оказывают процессы изменения доменной структуры. Изменение доменной структуры и связанное с ним изменение размеров керамики прекращается при больших постоянных полях, когда достигается максимальная упорядоченность доменной структуры. Вследствие этого значение пьезомодуля керамики в таком состоянии оказывается несколько меньше и определяется только величиной пьезомодуля однодоменного монокристалла данного вещества после усреднения по всем ориентациям доменов при максимальном порядке. Таковы результаты исследования зависимости пьезомодулей от напряженности постоянного поля для твердых растворов (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>, Ba(Ti,Sn)O<sub>3</sub> и Ba(Ti, Zr)O<sub>3</sub>.

В значительной степени отличаются от описанных выше результаты, полученные при исследовании пьезоэлектрических свойств твердых растворов (Ba,Pb)TiO<sub>3</sub>. Здесь прежде всего выяснилось, что обычной поляризацией этих твердых растворов не удастся получить сколько-нибудь существенную величину пьезомодуля. Поэтому нами был применен указанный в [5] и исследованный Б. М. Вулом и Р. Я. Разбаш метод поляризации с подогревом. Этот метод заключается в том, что образцы в присутствии сравнительно небольшого, порядка 5—10 кв/см, постоянного поля подогреваются до температуры, соответствующей области высокотемпературного фазового перехода, и затем медленно охлаждаются до комнатной температуры при включенном поле. В результате такой обработки образцы оказываются поляризованными до насыщения и обладают максимальной остаточной поляризацией после выключения постоянного поля. Результаты измерений пьезомодулей поляризованных таким образом твердых растворов (Ba,Pb)TiO<sub>3</sub> приведены на фиг. 10 (вверху), где видно, что пьезомодуль



Фиг. 10

1 — 4% PbTiO<sub>3</sub>, 2 — 8% PbTiO<sub>3</sub>,  
3 — 10% PbTiO<sub>3</sub>, 4 — 14% PbTiO<sub>3</sub>

Уменьшается приблизительно в два раза при возрастании концентрации титаната свинца в твердом растворе до 15%.

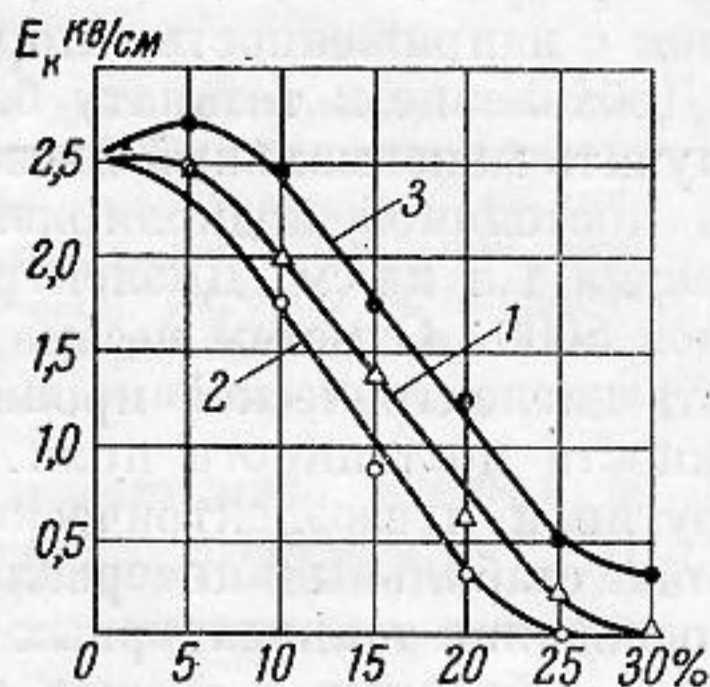
### Коэрцитивная сила твердых растворов

Коэрцитивная сила в статическом режиме, определяемая как напряженность деполяризующего поля, может быть найдена на основании зависимости пьезомодуля керамики от напряженности постоянного поля. Исходя из приведенных на фиг. 6, 7, 8 данных относительно этой зависимости для различных типов твердых растворов с разным процентным содержанием компонент, можно найти, что величина коэрцитивной силы зависит от концентрации добавляемой компоненты в твердых растворах  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$  и  $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ , как показано на фиг. 11, из которой видно, что величина коэрцитивной силы при увеличении концентрации падает, обращаясь в нуль при таких концентрациях, когда вещество при комнатной температуре перестает быть сегнетоэлектриком. Противоположный эффект вызывает добавление к титанату бария титаната свинца. Коэрцитивная сила этих твердых растворов определялась путем деполяризации обратным полем предварительно поляризованных указанным выше способом образцов. В результате найдено, что коэрцитивная сила твердых растворов  $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$  увеличивается при возрастании концентрации титаната свинца (фиг. 10). Твердые растворы с содержанием титаната свинца порядка 10—15% не обнаруживают признаков уменьшения пьезомодуля в полях порядка — 5 кв/см, в то время как твердые растворы с меньшим содержанием титаната свинца при таких полях уменьшают величину своего пьезомодуля приблизительно в 2—3 раза. Таким образом, в наших опытах не подтвердилось указание на то, что твердые растворы с 4—8% титаната свинца не деполяризуются в полях порядка 30 кв/см [5].

Зависимость коэрцитивной силы керамики от рода и концентрации добавляемых к титанату бария изоморфных веществ связано, по видимому, со следующим обстоятельством. Величина коэрцитивной силы, очевидно, существенно зависит от величины самопроизвольной электрострикционной деформации элементарных ячеек. Действительно, переориентация ячейки под действием внешнего электрического поля произойдет тогда, когда электрострикционное напряжение, вызванное этим полем, сравняется с противодействующими переориентации упругими напряжениями окружающих ячеек. Поэтому чем больше самопроизвольная электрострикционная деформация, т. е. чем больше самопроизвольная поляризация, тем больше коэрцитивная сила. Этот эффект и наблюдается у твердых растворов. У тех твердых растворов, у которых добавка смещает фазовый переход в сторону низких температур, и, следовательно, при комнатной температуре приводит к уменьшению самопроизвольной поляризации и соответствующей ей электрострикционной деформации при увеличении концентрации добавки, коэрцитивная сила падает и, наоборот, увеличение самопроизвольной поляризации и соответствующей ей электрострикционной деформации при добавлении титаната свинца приводит к увеличению коэрцитивной силы.

На основании изложенных выше результатов исследования свойств твердых растворов можно сделать следующие выводы.

Добавление к титанату бария до 15% цирконата бария приводит к



Фиг. 11

1 —  $\text{BaZrO}_3$ , 2 —  $\text{BaSnO}_3$ , 3 —  $\text{SrTiO}_3$

возрастанию диэлектрической проницаемости и уменьшению пьезомодуля и коэрцитивной силы, соответствующих комнатной температуре. Эти изменения, по видимому, не представляют интереса для применений этого типа твердых растворов в качестве электромеханических преобразователей.

Добавление к титанату бария до 20% титаната стронция вызывает увеличение диэлектрической проницаемости при комнатной температуре до 2000, к увеличению пьезомодуля до  $5,5-10 \cdot 10^{-6}$  CGSE и к падению коэрцитивной силы до 1,2 кв/см. Для сохранения большой величины пьезомодуля требуется постоянная подполяризация постоянным электрическим полем с напряженностью порядка 3—5 кв/см.

Добавление к титанату бария до 10—15% станната бария позволяет получить максимальный пьезомодуль порядка  $6,5-8 \cdot 10^{-6}$  CGSE при условии постоянной подполяризации постоянным полем с напряженностью порядка 1,5 кв/см. Диэлектрическая проницаемость при этом имеет порядок 5000. Отметим весьма сильную и практически обратимую зависимость диэлектрической проницаемости этих твердых растворов от напряженности постоянного поля. При наличии постоянной подполяризации упругие и пьезоэлектрические свойства твердых растворов указанного состава стабильны в интервале температур от 10 до 30°C, о чем можно судить на основании температурных зависимостей резонансных частот и модуля Юнга, найденных в опытах с радиальными колебаниями тонкого диска.

Добавление к титанату бария титаната свинца вызывает существенное увеличение коэрцитивной силы вещества, что позволит применять его в ультразвуковых излучателях большой мощности. У твердых растворов этого типа наблюдается уменьшение пьезомодуля и диэлектрической проницаемости; интересно отметить, что отношение этих характеристик остается неизменным при увеличении концентрации титаната свинца в твердом растворе от 0 до 18%. Пьезоэлектрические и диэлектрические свойства этих веществ стабильны в температурном интервале от 0 до 110°C.

Таким образом, можно заключить, что среди твердых растворов, подвергавшихся исследованию, наиболее интересными для применений в качестве электромеханических преобразователей являются твердые растворы типа  $Ba,Pb)TiO_3$  и  $Ba(Ti,Sn)O_3$ .

Работы автора, опубликованные в этом и предыдущем номерах Акустического журнала, были выполнены в 1952—53 гг. под руководством академика Н. Н. Андреева, которому автор выражает свою признательность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Смоленский. Поляризация и диэлектрические потери цирконатов, станнатов и некоторых титанатов двухвалентных металлов. ЖТФ, 1952, 22, 1, 3—11.
2. Г. А. Смоленский, М. А. Карамышев, К. И. Розгачев. Сегнето-электрические свойства некоторых твердых растворов. ДАН, 1951, 79, 1, 53—56.
3. Б. М. Вул, И. М. Гольдман, Р. Я. Разбаш. Электрическая прочность титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева. ЖЭТФ, 1950, 20, 5, 465—470.
4. А. К. Ишхели. Диэлектрические свойства изоморфных смесей титаната бария. Сообщения АН Грузинской ССР, 1950, 11, 5, 275—279.
5. W. P. Mason. Barium—titanate ceramic as an electromechanical transducer. Bell Lab. Record, 1948, 27, 8, 285—288.
6. Г. А. Смоленский. Сегнето-электрические свойства некоторых кристаллов. ДАН, 1952, 85, 5, 985—987.
7. G. Shirane, K. Suzuki. On the phase transition in barium—lead titanate. J. Phys. Soc. Japan, 1951, 6, 274—278.
8. А. Н. Рой. Температурная зависимость электрострикционных и упругих свойств керамического титаната бария. Акуст. журн., 1955, 1, 3, 264—271.
9. Н. А. Рой. Зависимость коэрцитивной силы и диэлектрической проницаемости керамического титаната бария от механических напряжений. Акустич. журн. 1955, 1, 4, 352—355.