АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XII 1966 Вып. 1

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ЧЕТЫРЕ РАЗА В ГОД

УДК 534-16

ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА В КРИСТАЛЛАХ CdS С ЗАПИРАЮЩИМ СЛОЕМ

В. И. Васькова, И. А. Викторов, Л. Д. Розенберг

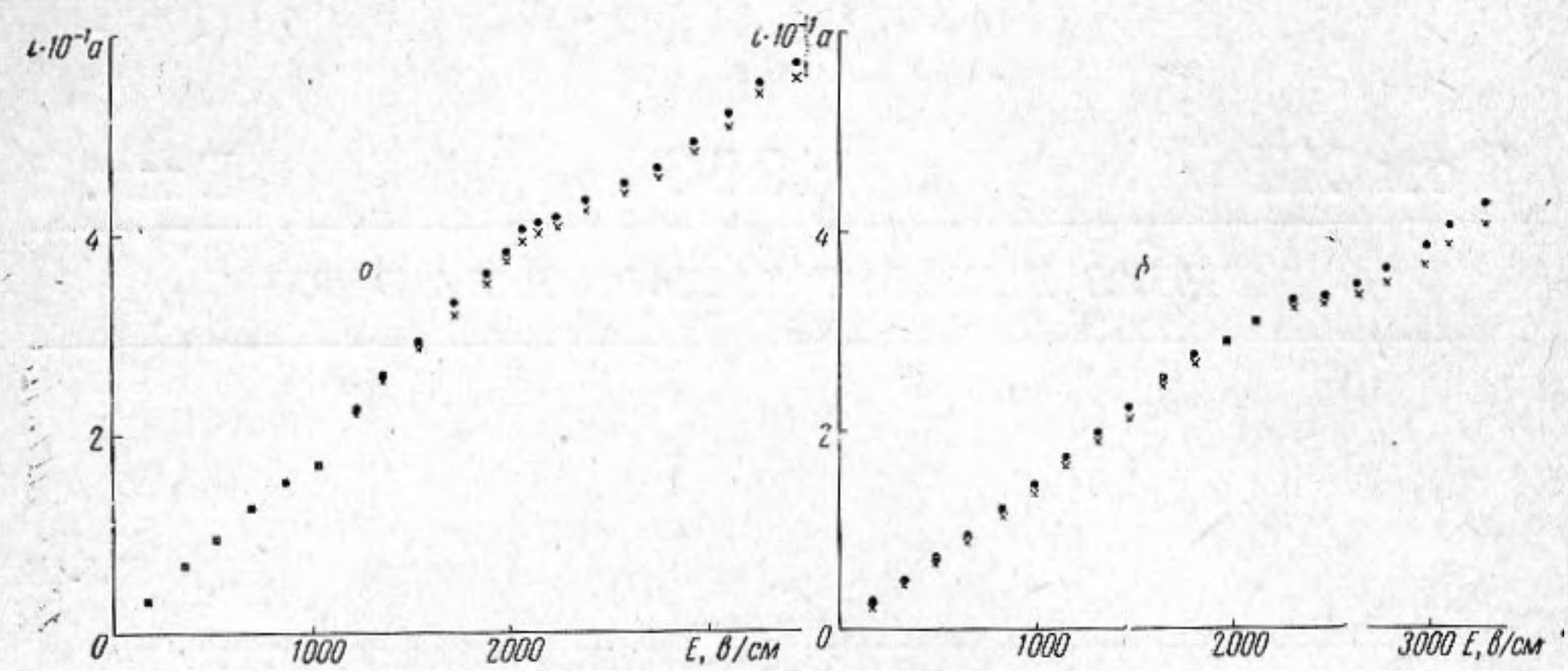
Описываются схема и результаты опытов по генерации поперечных ультразвуковых волн запирающим слоем в кристалле CdS и их последующему усилению в этом же кристалле.

Прямое усиление распространяющихся в кристаллах CdS поперечных и продольных ультразвуковых волн постоянным электрическим полем (дрейфовое поле) наблюдалось неоднократно [1—4]. В ряде работ описано также применение кристаллов CdS для возбуждения и приема высокочастотных ультразвуковых волн [5—7].

Если на поверхности кристалла CdS образован запирающий или диффузионный слой, обладающий высоким сопротивлением, то при подаче на кристалл электрического напряжения основная его часть падает не в толще кристалла, а в поверхностном слое. Это обстоятельство является, повидимому, основной причиной того, что генерация и последующее усиление дрейфовым полем ультразвуковых волн в одном и том же кристалле CdS затруднительны и не наблюдались до сих пор: для создания в толще кристалла дрейфового поля нужной величины необходимо использовать очень высокие электрические напряжения. Нами была сделана попытка осуществить генерацию и усиление поперечных ультразвуковых волн в одном и том же кристалле CdS.

Опыты проводились на двух кристаллах CdS (образцы № 1 и № 2), изготовленных в ВНИИ Монокристаллов (г. Харьков) методом выращивания из расплава под давлением инертного газа [8]. Кристаллы представляли собой прямоугольные параллелепипеды, одно ребро которых было параллельно гексагональной оси z. Размеры l кристаллов вдоль оси x составляли $l_1 = 11{,}5$ *мм*, $l_2 = 12{,}25$ *мм*. Удельные проводимости σ кристаллов изменялись в зависимости от освещения ртутной лампой в пределах $\sigma_1 = 8 \cdot 10^{-9} \div 10^{-4}$, $\sigma_2 = 6 \cdot 10^{-8} - 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$. На поверхностях образцов, параллельных оси z, были образованы «слабые» запирающие слои путем вакуумного напыления чистого индия на поверхность кристалла без последующего его прогрева. Как известно [9], в этом случае образуется неомический контакт металла с полупроводником, что и было нам

необходимо. Наличие запирающих слоев и их свойства определялись по вольтамперным характеристикам образцов № 1 и № 2 (фиг. 1, *а*, *б* соответственно), снятым в импульсном режиме при длительности импульса напряжения 8 *мксек*, частоте повторения 60 *гц* и удельных проводимостях $\sigma_1 = 7{,}5 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_2 = 6{,}5 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$. Точки и крестики на графиках соответствуют противоположным направлениям электрического поля в кри-



Фиг. 1

сталле. На фиг. 1 *а*, *б* отчетливо заметно, что вольтамперные характеристики при противоположных направлениях поля различны: одна кривая идет выше другой.

Контрольный опыт с прогревом кристалла в течение двух часов при температуре $\simeq 200°$ показал, что после прогрева различие между токами при противоположных направлениях поля полностью исчезло. Это доказывает наличие запирающих слоев нужного нам типа. Разность ΔE напряженностей поля, соответствующих одинаковому значению тока через кристалл при противоположных направлениях поля, умноженная на длину l кристалла, по порядку величины соответствует падению напряжения v_c на запирающем слое. Зная величину v_c, проводимость, диэлектрическую постоянную ε и подвижность μ электронов в кристалле, можно по известной формуле

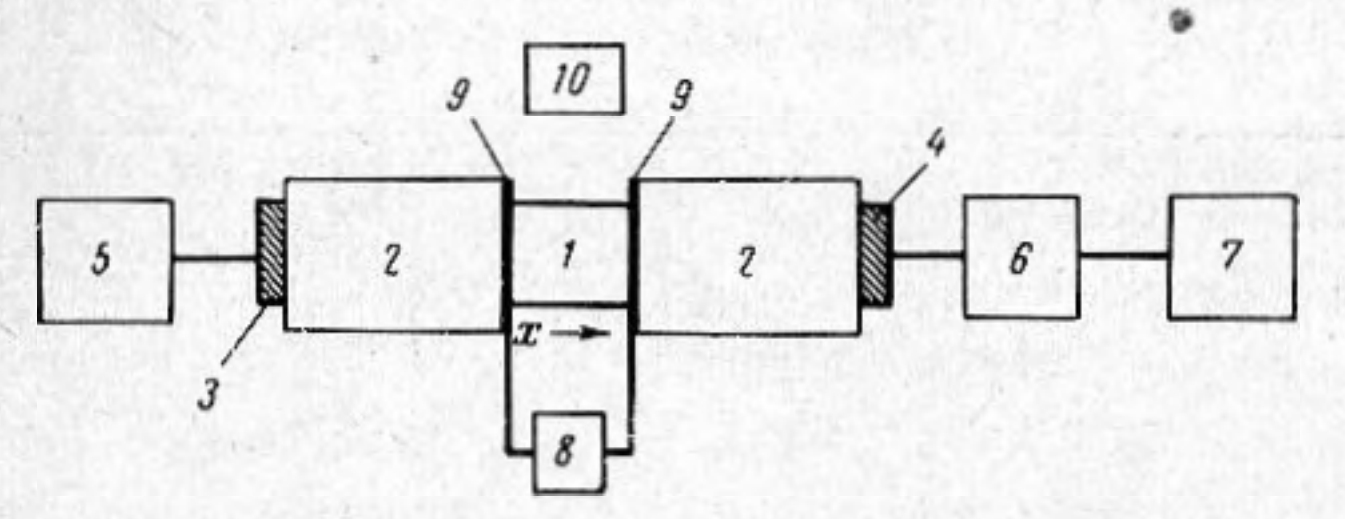
$$L = \sqrt{\varepsilon v_c \mu / 2\pi\sigma}$$

оценить толщину L запирающего слоя. Поскольку v_c возрастает при увеличении напряжения на кристалле, толщина запирающего слоя тем больше, чем больше напряжение на кристалле. Согласно приведенной формуле, при напряженности электрического поля $E \sim 2000 \div 3000$ *в/см* и $\sigma \simeq 7 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$, $L_1 \sim 0{,}2$ *мм*, $L_2 \sim 0{,}3$ *мм*.

Экспериментальная установка для наблюдения генерации и усиления поперечных ультразвуковых волн была собрана по общеизвестной схеме для исследования усиления ультразвука дрейфом электронов в кристаллах (см., например, работу [1]).

Была создана система буфер — кристалл — буфер (см. фиг. 2), состоящая из кристалла CdS (*1*) и двух буферов, выполненных из плавленого кварца. Кварцевая пластина *3* являлась возбудителем колебаний, кварцевая пластина *4* — приемником. Обе пластины *Y*-среза имели резонансную частоту ~ 30 *мггц*. На пластину *3* подавались прямоугольные импульсы напряжения с частотой заполнения 30 *мггц* от генератора *5*. На приемной стороне использовались резонансный усилитель *6* с полосой пропускания 27—33 *мггц* и электронный осциллоскоп *7*. Дрейфовое поле создавалось путем подачи прямоугольных импульсов напряжения 100—4000 *в* от ге-

нератора *8*, для чего на торцах буферов *2* были созданы, путем распыления серебра, обкладки *9*. Ртутная лампа *10* служила для создания необходимых значений проводимости кристалла CdS. Для проверки работы кристаллов как усилителей поперечных ультразвуковых волн производился контрольный опыт. На излучающую пьезопластинку *3* подавался прямоугольный электрический импульс с частотой заполнения 30 *мггц*. Она из-



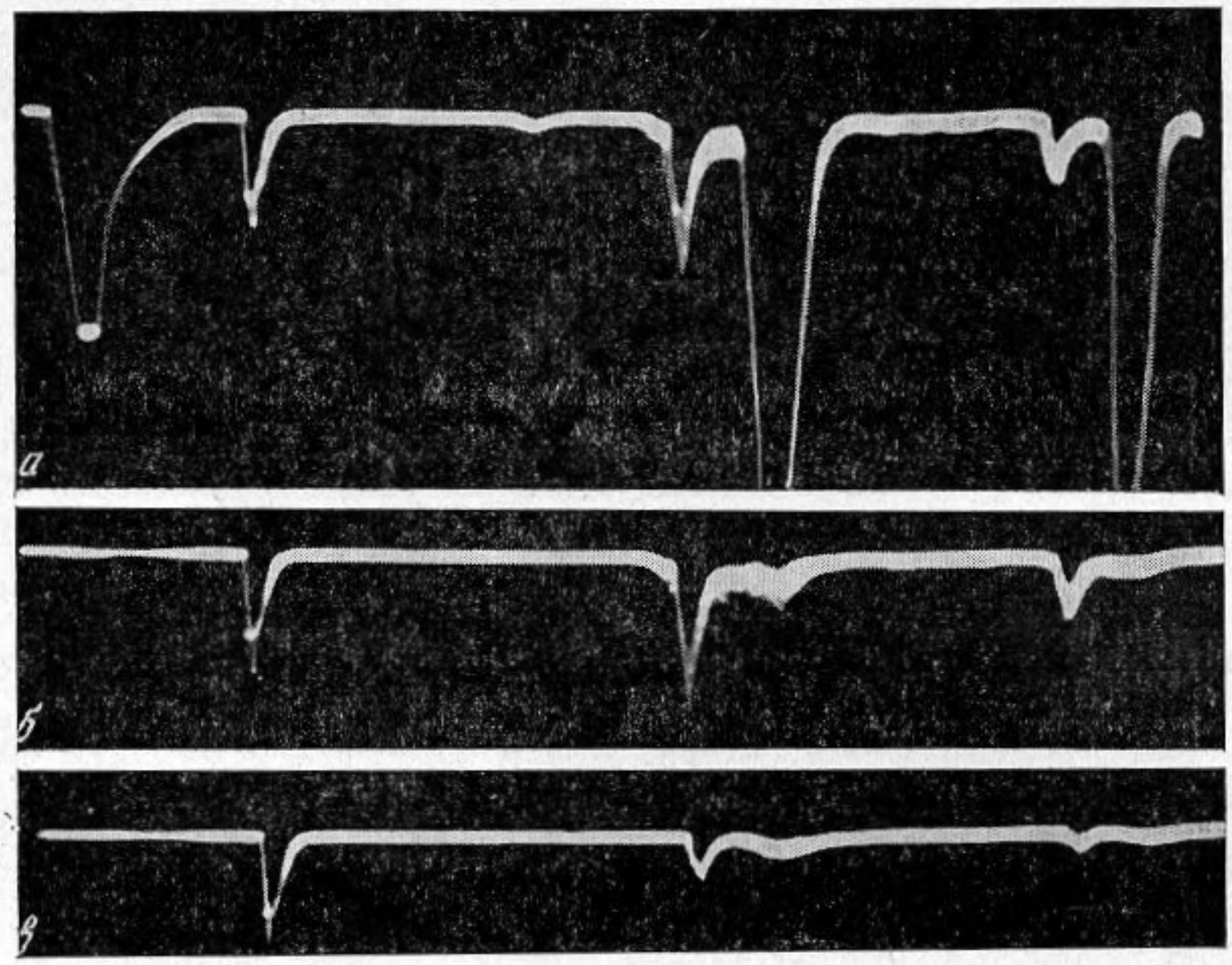
Фиг. 2

лучала поперечные ультразвуковые волны с направлением распространения вдоль оси x кристалла и с вектором колебательного смещения по оси z. Распространяясь в кристалле, эти волны усиливались. Кривые усиления для образца № 2 при разных проводимостях имеются в работе [4].

Помимо такого «обычного» усиления ультразвуковых волн в наших образцах наблюдалась генерация импульсов ультразвуковых волн запирающими слоями, расположенными у левой границы кристалла (фиг. 2), с последующим усилением этих импульсов в объеме кристалла. Генерация ультразвуковых сигналов запирающими слоями происходила при воздействии переднего фронта импульса дрейфового поля на кристалл. Прямоугольный импульс дрейфового поля при этом имел длительность 8 *мксек*, амплитуду $2000 \div 3000$ *в* и время нарастания τ переднего фронта 0,2 *мксек*. В промежутке времени τ увеличение напряжения в импульсе происходило примерно по линейному закону. Этот закон изменения напряжения можно представить рядом Фурье с гармониками $n\omega_0$, где $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi / \tau \simeq 30$ *мггц*. При амплитуде напряжения импульса на кристалле 2500 *в* соответствующая амплитуда напряжения на запирающем слое составляет (см. фиг. 1 *а*, *б*) примерно 100—200 *в*, а амплитуда гармоники с частотой $f \simeq 30$ *мггц* при этом имеет порядок 10 *в*. Эта гармоника и генерирует наблюдаемый нами ультразвуковой сигнал, который мы в дальнейшем, для краткости, будем обозначать буквой С. Остальные гармоники находятся вне полосы пропускания приемного тракта, поэтому результат их воздействия на запирающий слой мы не видим.

Подтверждением такого механизма происхождения сигнала являются осциллограммы, приведенные на фиг. 3 *а*, *б*, *в*. Осциллограммы дают зависимость напряжения на выходе детектора от времени в режиме ждущей развертки индикатора. Начало развертки совпадает с моментом запуска схемы синхронизирующим импульсом. Если излучающая пьезопластинка *3* (фиг. 2) присоединена к генератору электрических импульсов *5*, то в начале развертки мы видим продетектированный импульс (фиг. 3, *а*). Если излучающая пьезопластинка не присоединена к генератору, то этого импульса нет (фиг. 9 *б*, *в*). Через некоторое время после запуска схемы на кристалл подается импульс постоянного дрейфового поля. Наводки от его переднего фронта видны в форме второго всплеска на фиг. 3, *а* и первого — на фиг. 3 *б*, *в*. Правее наводок от импульса дрейфового поля на всех осциллограммах видны всплески, которые, как будет показано ниже, представляют интересующий нас сигнал С, генерируемый запирающим слоем кристалла. Еще правее на фиг. 3, *а* виден очень большой всплеск от ультразвукового импульса, излученного пьезопластинкой *3*, усиленного в кристалле и принятого пьезопластинкой *4* (фиг. 2). На фиг. 3 *б*, *в* этого всплес-

ка нет и вместо него видны нарастающие во времени (пока на кристалле имеется дрейфовое поле) шумы. На фиг. 3, *в* напряженность дрейфового поля существенно меньше, чем на фиг. 3, *б*, поэтому сигнал С и шумы имеют значительно меньшие амплитуды, чем на фиг. 3, *б*. В конце всех осциллограмм видны всплески, соответствующие трехкратным пробегам ультразвуковых сигналов (от запирающего слоя и пьезопластинки *3*) по правому буферу.



Фиг. 3

Наряду с вольтамперными характеристиками (фиг. 1 *а*, *б*), показывающими наличие у кристаллов слабых запирающих слоев, и осциллограммами, доказательством описанного происхождения сигнала С служат следующие положения:

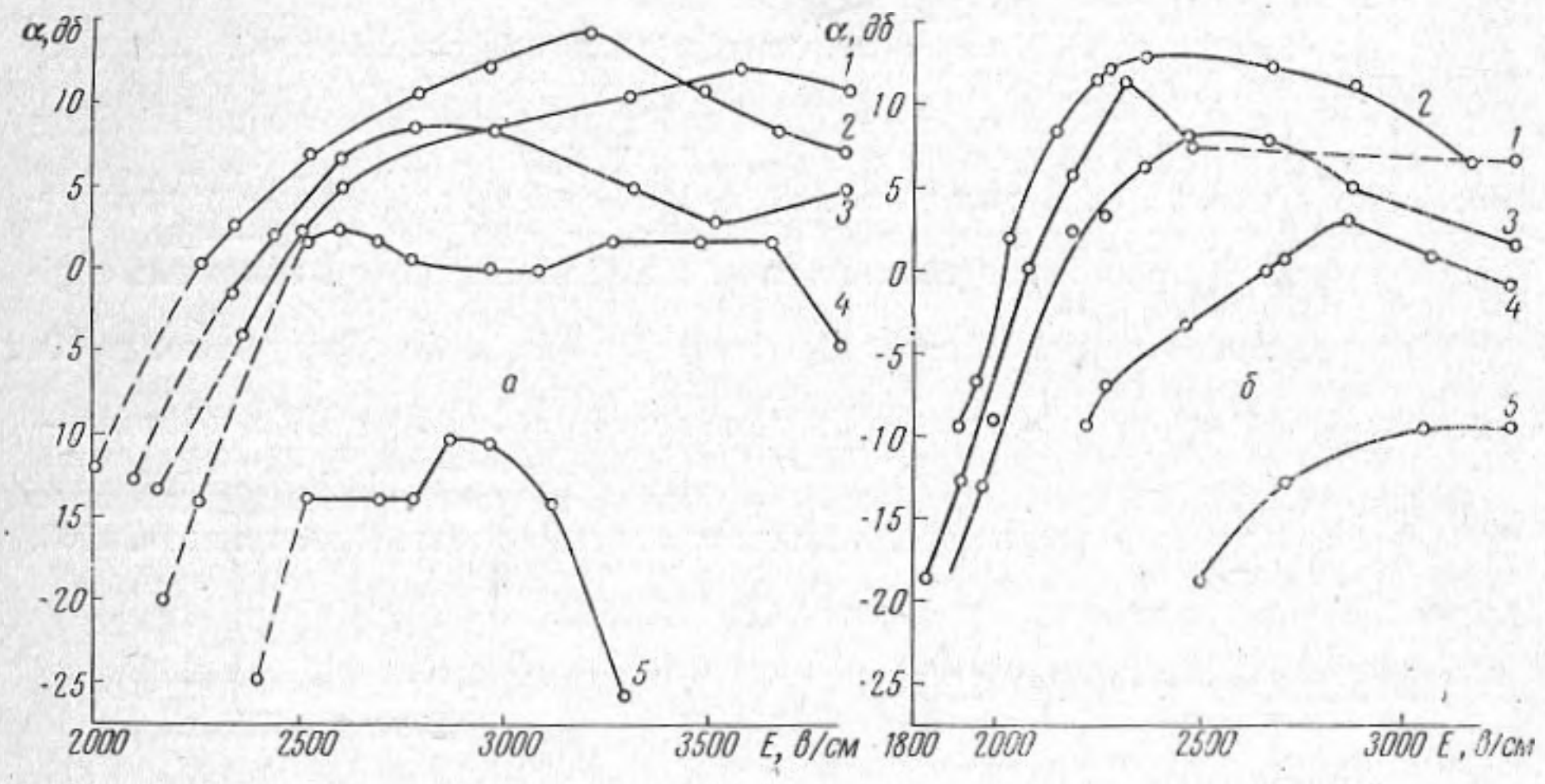
1. Сигнал С так же как и сигнал, излученный пьезопластинкой *3*, принимается кварцевой пластинкой *Y*-среза *4*. Это означает, что он представляет собой импульс поперечных ультразвуковых волн.

2. Сигнал С не связан с наличием излучающей пьезопластинки и электрическим импульсом, подаваемым на нее, поскольку отключение пластинки *3* от генератора импульсов не влияет на сигнал С. Остается предположить, что сигнал «рождается» в кристалле.

3. Возникновение сигнала С, несомненно, связано с наличием дрейфового электрического поля в кристалле. При отсутствии импульса дрейфового поля сигнал С не наблюдается, а при изменении амплитуды импульса дрейфового поля амплитуда сигнала С изменяется. Зависимость амплитуды сигнала С от дрейфового поля *E* для образцов № 1 и № 2 изображена на фиг. 4 *а*, *б*, где по осям ординат отложена величина α, равная двадцати логарифмам отношения амплитуды сигнала С к амплитуде ультразвукового импульса от пьезопластинки *3* при отсутствии дрейфового поля и освещения кристалла (так называемый темновой сигнал). Кривые на фиг. 4, *а* соответствуют следующим проводимостям кристалла: *1* — $1{,}6\cdot10^{-4}$; *2* — $7{,}5\cdot10^{-5}$; *3* — $3{,}3\cdot10^{-5}$; *4* — $2{,}4\cdot10^{-5}$; *5* — $1{,}2\cdot10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$, на фиг. 4, *б*: *1* — $1{,}3\cdot10^{-4}$; *2* — $9{,}7\cdot10^{-5}$; *3* — $6{,}5\cdot10^{-5}$; *4* — $2{,}8\cdot10^{-5}$; *5* — $1{,}2\cdot10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$. Как видно из фиг. 4, имеется некоторая оптимальная проводимость и оптимальное значение амплитуды дрейфового поля, при кото-

рых сигнал С максимален. Характер кривых на фиг. 4 аналогичен характеру кривых усиления поперечных ультразвуковых волн в кристалле № 2 [4].

4. Сигнал С возникает в момент включения дрейфового электрического поля, т. к. промежуток времени t от момента включения дрейфового поля до появления на индикаторе сигнала С с большой точностью совпадает с временем распространения импульса поперечных ультразвуковых волн через кристалл и правый буфер. Для образца № 1 $t = 11{,}5$ *мксек*, для об-



Фиг. 4

разца № 2 $t = 12$ *мксек*. Соответственные времена распространения импульса поперечных волн, непосредственно измеренные нами, составляют 11,55 и 12,05 *мксек*.

5. Сигнал С не является шумовым сигналом, т. к. он имеет характер резко выраженного пика, а шумовой сигнал плавно и непрерывно нарастает в течение всего времени, пока к кристаллу приложено дрейфовое электрическое поле (см. фиг. 3, *б*). Кроме того, при уменьшении крутизны переднего фронта импульса дрейфового электрического поля сигнал С пропадает, а шумовой сигнал остается без изменения.

Все изложенные соображения показывают, что сигнал С действительно представляет собой ультразвуковой импульс поперечных волн, генерируемый и усиливаемый в кристалле. Генерация сигнала С осуществляется передним фронтом импульса дрейфового поля благодаря наличию в кристалле запирающего слоя. Таким образом, в одном кристалле CdS может быть осуществлена и генерация и усиление ультразвуковых волн.

Если делать количественные оценки данного эффекта, то следует отметить, что при оптимальных проводимости кристалла и величине дрейфового поля сигнал С существенно (на 15 *дб*, см. фиг. 4) превосходит ультразвуковой сигнал, излученный резонансной кварцевой пластинкой Y-среза при напряжении на ней $\simeq 20$ *в* (темновой сигнал). Такое сравнение уместно, поскольку амплитуда гармоники электрического напряжения частоты 30 *мггц* на запирающем слое составляет (как отмечалось выше) $\simeq 10$ *в*, т. е. величину того же порядка. Следовательно, кристалл CdS, генерирующий и одновременно усиливающий звук, работает значительно эффективнее обычной резонансной кварцевой пластинки. Необходимо подчеркнуть, что выигрыш в 15 *дб* отнюдь не максимально возможный, т. к. параметры запирающего слоя (толщина, электрическое сопротивление и т. д.) были в наших опытах в известной мере случайными. При надлежа-

щем выборе параметров слоя можно, по-видимому, существенно увеличить сигнал С.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Л. А. Сысоеву за предоставленные монокристаллы сульфида кадмия и А. А. Чабану за ценные советы и обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. R. Hutson, J. H. McFee, D. L. White. Ultrasonic amplification in CdS, Phys. Rev. Let., 1961, **7**, 6, 237—239.
2. F. S. Hickernell, N. G. Sakiotis, An electroacoustic amplifier with net electrical gain. Proc. IEEE, 1964, **52**, 2, 194.
3. K. Blötekjer, C. F. Quate. The coupled modes of acoustic waves and drifting carriers in piezoelectric crystals, Proc. IEEE, 1964, **52**, 4, 360—377.
4. В. И. Васькова, И. А. Викторов, Л. Д. Розенберг. Усиление ультразвукового сигнала и шумы в кристалле CdS. Акуст. ж., 1964, **10**, 4, 403—406.
5. D. L. White. The depletion layer transducer. IRE Transactions on ultrasonic engineering, 1962, UE-9, 1, 21—27.
6. J. de Klerk, E. F. Kelly. Coherent phonon generation in the gigacycle range via insulating CdS films. Appl. Phys. Let., 1964, **5**, 1, 2—3.
7. N. F. Foster. The performance of dilatational mode cadmium sulfide diffusion — layer transducers. IEEE Trans. on Ultrasonic Eng, 1963, **UE-10**, 1, 39—44.
8. Л. А. Сысоев, Н. И. Крайнюков. Получение фоточувствительных кристаллов сульфида кадмия из расплава под давлением инертного газа, Физ. тв. тела, 1962, 4, 3, 807—809.
9. Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел. М., ИЛ, 1962.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
2 марта 1965 г.