АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том X 1964 Вып. 4

УДК 534-8 : 548

УСИЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА И ШУМЫ В КРИСТАЛЛЕ CdS

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

Экспериментально исследовано усиление ультразвукового сигнала и шума в монокристалле CdS. Максимальное усиление ультразвукового сигнала в 35 *дб* на частоте 30 *мггц* для образца длиной 12,3 *мм* достигнуто при следующих оптимальных условиях: проводимость кристалла $\sigma = 6{,}5 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$, напряженность поля $E = 2857$ *в/см*. Показано влияние шума на величину усиления ультразвукового сигнала.

Усиление поперечных ультразвуковых волн в полупроводниковых кристаллах за счет взаимодействия колебаний решетки кристалла с потоком электронов, создаваемым постоянным электрическим полем, было обнаружено Хатсоном, Мак Фи и Уайтом [1]. Теория этого явления развита в работах [2, 3, 4]. При практическом использовании этого эффекта (особенно для усиления слабых ультразвуковых сигналов) существенным фактором являются шумы, которые в данном случае представляют собой усиливающиеся аналогичным механизмом тепловые колебания решетки. В работе [5] показано экспериментально, что при наличии шумов усиление основного ультразвукового сигнала снижается. Ввиду важности этого вопроса нами было предпринято более детальное экспериментальное исследование влияния шумов на усиление ультразвукового сигнала. Некоторые предварительные результаты излагаются в настоящей заметке.

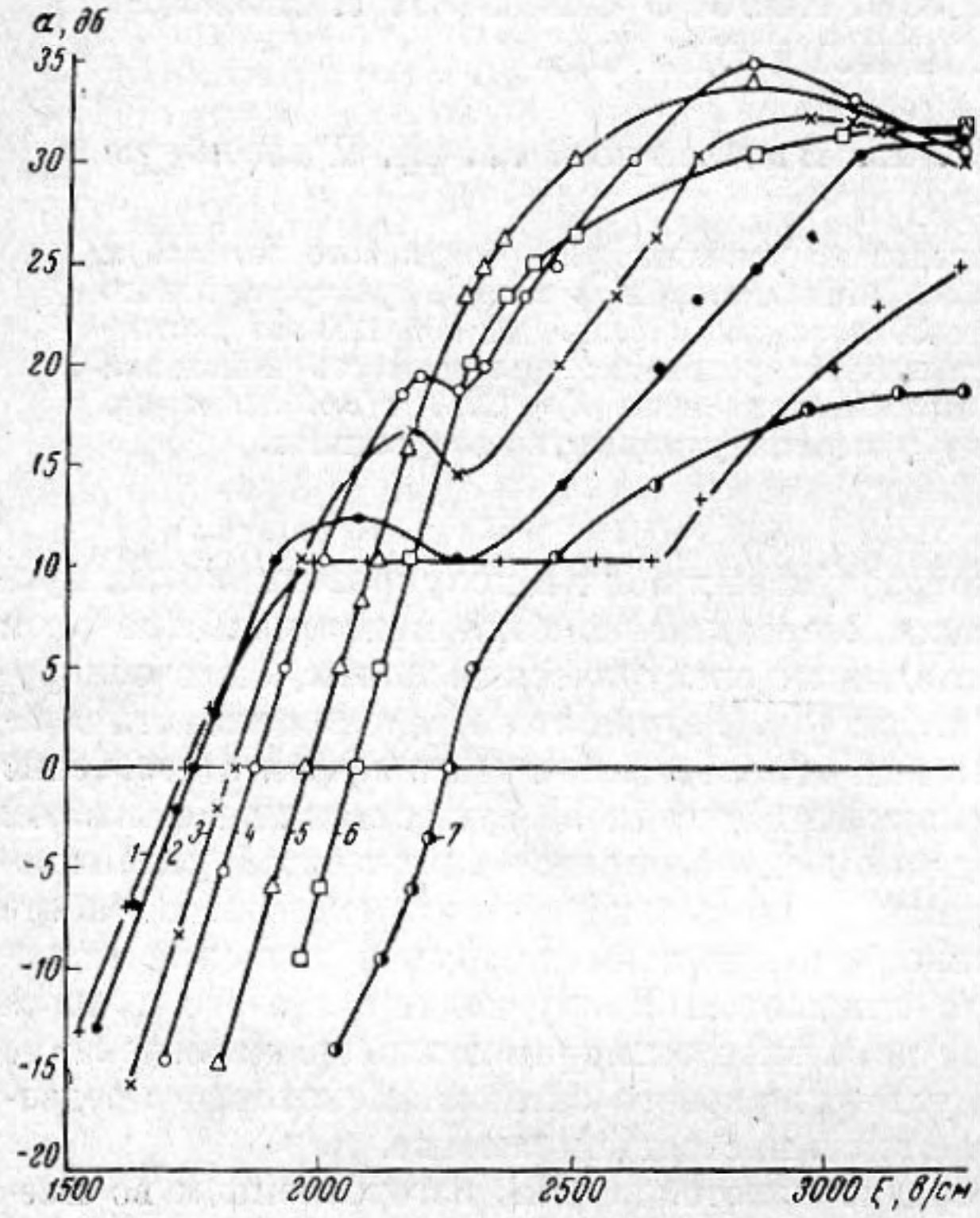
Опыты проводились на образце кристалла CdS, изготовленном во Всесоюзном н.-и. институте монокристаллов (Харьков) методом выращивания из расплава под давлением инертного газа [6]. Схема эксперимента была аналогична описанной в работе [1]. Импульс поперечных ультразвуковых волн длительностью 1 *мксек* и с частотой заполнения $\simeq 30$ *мггц*, излучаемый кварцевой пластинкой *У*-среза, проходил через систему, состоящую из исследуемого кристалла, заключенного между двумя вспомогательными волноводами, выполненными из плавленого кварца, принимался второй кварцевой пластинкой и после усиления резонансным усилителем и детектирования наблюдался на экране электронного осциллоскопа.

Направление распространения ультразвуковых волн составляло прямой угол с гексагональной осью кристалла, а вектор колебательного смещения совпадал с этой осью; размер кристалла по направлению распространения ультразвуковых волн составлял 12,3 *мм*. Проводимость кристалла регулировалась посредством освещения его ртутной лампой. На кристалл подавались импульсы постоянного «тянущего» электрического поля длительностью $1 \div 50$ *мксек* при напряжении $100 \div 4000$ *в*. Время прихода на кристалл переднего фронта ультразвукового импульса могло быть задержано на промежуток $\tau = 0 \div 20$ *мксек* по отношению к моменту подачи на кристалл постоянного электрического поля.

На фиг. 1—3 приведены результаты экспериментов. Фиг. 1 показывает зависимость коэффициента α(*дб*) усиления ультразвуковых волн, равного $20 \lg A / A_0$, от напряженности E (*в / см*) постоянного электрического поля

в кристалле; A — амплитуда сигнала на приемном кварце в присутствии постоянного электрического поля и при освещении кристалла, A_0 — амплитуда сигнала в темноте *. При этом «тянущее» электрическое поле включалось одновременно с приходом ультразвукового импульса к кристаллу. Каждая кривая соответствует определенному значению проводимости σ ($ом^{-1}\,см^{-1}$) кристалла: *1* — $1{,}3\cdot10^{-4}$; *2* — $9{,}7\cdot10^{-5}$; *3* — $7{,}3\cdot10^{-5}$; *4* — $6{,}5\cdot10^{-5}$; *5* — $4{,}5\cdot10^{-5}$; *6* — $2{,}8\cdot10^{-5}$; *7* — $1{,}2\cdot10^{-5}$.

На фиг. 2 приведены аналогичные зависимости для коэффициента усиления α ($дб$) $= 20\lg A_ш / A_0$ шумового сигнала, также наблюдавшегося на экране осциллоскопа. Здесь $A_ш$ — амплитуда шумового сигнала на приемном кварце на частоте $\simeq$30 *мггц* (в полосе пропускания системы).



Фиг. 1

На фиг. 3 представлена зависимость максимального коэффициента усиления ультразвуковых волн в кристалле, полученного при оптимальных условиях ($\sigma = 6{,}5\cdot10^{-5}$ $ом^{-1}\,см^{-1}$; $E = 2857$ *в/см*) от времени задержки τ ультразвукового импульса относительно импульса постоянного электрического поля в кристалле (длительность импульса постоянного поля составляла 50 *мксек*).

Анализируя фиг. 1—3, можно высказать ряд соображений об усилении сигнала и шума в кристалле и о влиянии уровня шума на усиление сигнала.

Усиление как сигнала, так и шума сильно зависит от проводимости кристалла (фиг. 1, *2*). При уменьшении проводимости от $1{,}3\cdot10^{-4}$ до $1{,}2\cdot10^{-5}$ максимальное усиление сигнала сначала возрастает, достигает 35 *дб* (что соответствует 28,5 *дб/см*) при $\sigma = 6{,}5\cdot10^{-5}$ $ом^{-1}\,см^{-1}$, а затем уменьшается.

Усиление же шума при тех же пределах изменения σ изменяется монотонно; оно тем больше, чем больше проводимость. Это качественно согласуется с теорией, развитой в работе [1].

Величина критической напряженности поля, при которой начинается собственно усиление сигнала ($\alpha > 0$) тем больше, чем меньше проводимость кристалла. Эту зависимость величины критического поля от проводимости можно объяснить наличием некоторого паразитного запирающего слоя, сопротивление которого, как известно, пропорционально $\sigma^{-1/2}$. Поэтому падение напряжения на запирающем слое при малой общей проводимости кристалла будет больше (а на кристалле соответственно меньше), чем при большой проводимости. При этом, как нетрудно показать, разность двух значений E_m и E_n напряженности критического поля

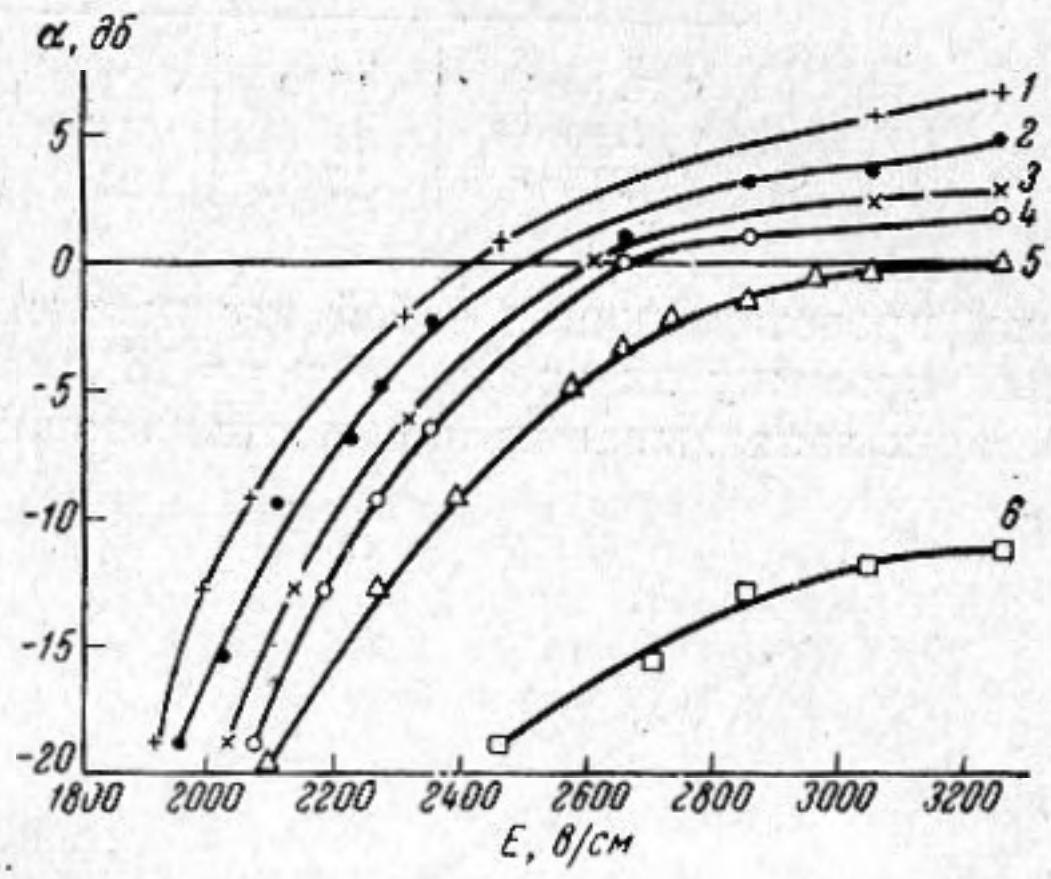
* В статье [1] аналогичные графики построены как ослабление сигнала в функции напряженности поля. Мы предпочли более естественное построение, поскольку интересующим нас полезным фактором является именно коэффициент усиления.

и соответственные значения проводимости σ_m и σ_n должны удовлетворять соотношению

$$\frac{E_m - E_n}{|\sigma_m^{-1/2} - \sigma_n^{-1/2}|} = \text{const}.$$

Из табл. 1 видно, что это соотношение выполняется с разбросом до $\pm 15\%$.

Интересным фактом, не наблюдавшимся ранее, является наличие у кривых усиления сигнала (фиг. 1) при $\sigma \geqslant 6{,}5 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$ участков, на которых при увеличении напряженности электрического поля в кристалле усиление перестает расти и даже уменьшается. Можно предположить, что этот эффект связан с резким возрастанием усиления шумов при этих полях и соответственным «отсосом» энергии электрического поля на усиление шумов. Согласно работе [1], из всего спектра тепловых шумов кристалла максимально усиливаются шумы с частотой порядка $\omega_0 \simeq 10^9$ *гц*. Наибольший коэффициент усиления при этом достигается при напряженности электрического поля $E_ш = E_к + 2\frac{v}{\mu}\frac{\omega_c}{\omega_D})^{1/2}$, где $E_к$ — напряженность критического поля, при котором $\alpha = 0$, v — скорость поперечных ультразвуковых волн в кристалле, μ — подвижность электронов, ω_c и ω_D — некоторые величины, определение которых дано в работе [1]. Подставляя в эту формулу числовые значения величин из работы [7], получим, что при $\sigma = 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$ $\Delta E = E_ш - E_к \simeq 400$ *в/см* (фиг. 1). Наши экспериментальные данные дают: $\Delta E = 400$ *в/см* для $\sigma = 0{,}65 \cdot 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$; $\Delta E = 430$ *в/см* для $\sigma = 0{,}73 \cdot 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$ и $\Delta E = 520$ *в/см* для $\sigma = 0{,}97 \cdot 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$, что



Фиг. 2

Таблица 1

σ_m, *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$	σ_n, *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$	E_m, *в/см*	E_n, *в/см*	$\frac{E_m - E_n}{\sigma_m^{-1/2} - \sigma_n^{-1/2}}$
$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	$7{,}3 \cdot 10^{-5}$	2070	1840	3,2
$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$9{,}7 \cdot 10^{-5}$	2260	1750	2,8
$4{,}5 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	1970	1730	3,7
$4{,}5 \cdot 10^{-5}$	$6{,}5 \cdot 10^{-5}$	1970	1870	3,6
$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	$6{,}5 \cdot 10^{-5}$	2070	1870	3,1

близко к расчетной величине. Согласно теории [1], разность $\Delta E = E_ш - E_к$ должна быть прямо пропорциональна корню из проводимости кристалла, т. е. $\Delta E / \sigma^{1/2} = \text{const}$. Такая зависимость хорошо выполняется, как это видно из табл. 2. Следовательно, при $E \simeq E_ш$ действительно наблюдается сильное взаимодействие сигнала и шума.

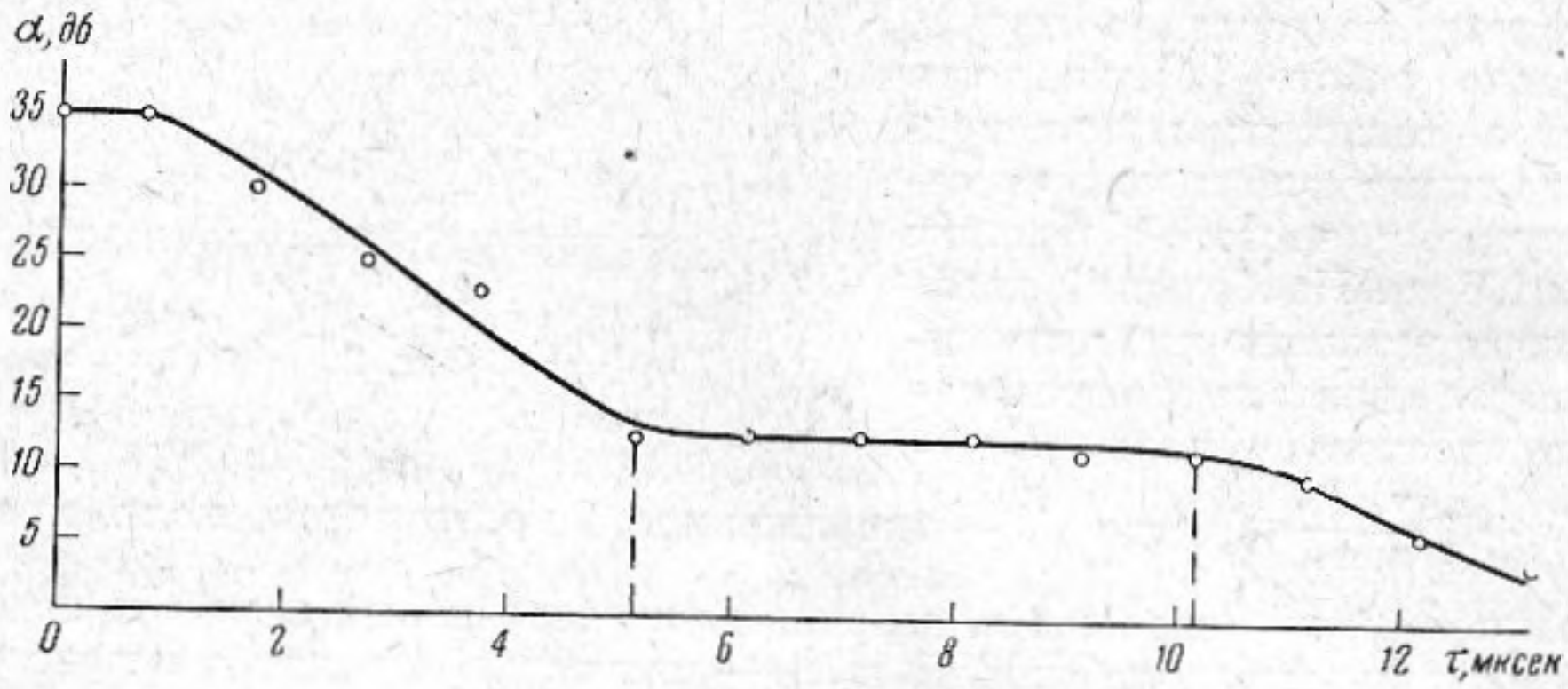
Наконец, шумы не только изменяют форму кривой усиления сигнала (фиг. 1), но и существенно уменьшают максимальное значение коэффициента усиления сигнала. Это хорошо видно из кривой на фиг. 3; если электрическое поле подается на кристалл раньше, чем звуковой сигнал, то к моменту прихода последнего шумы успевают «разогнаться» и забирают часть энергии электрического поля, понижая, таким образом, максимальный коэффициент усиления сигнала. Это понижение сигнала, грубо

говоря, продолжается до тех пор, пока время запаздывания ультразвукового импульса не станет равным времени прохождения сигнала по кристаллу, составляющему в нашем случае $\tau_0 = 6{,}5$ *мксек*. После этого усиление стабилизируется до тех пор, пока не появится новая шумовая по-

Таблица 2

σ, $ом^{-1}\ см^{-1}$	$E_к$, *в/см*	$E_ш$ *в/см*	$\Delta E = E_ш - E_к$, *в/см*	$\Delta E/\sigma^{1/2}$
$6{,}5\cdot10^{-5}$	1870	2270	400	$5\cdot10^4$
$7{,}3\cdot10^{-5}$	1840	2270	430	$5\cdot10^4$
$9{,}7\cdot10^{-5}$	1750	2270	520	$5{,}3\cdot10^4$

меха, представляющая собой отражение шумового пакета, что наступает через промежуток времени $2\tau_0 = 13$ *мксек*. При дальнейшем увеличении времени запаздывания начинается второй «тур» ослабления сигнала. Как



Фиг. 3

видно из фиг. 3, ход кривой соответствует приведенным выше рассуждениям, а критические точки (5 *мксек* и 10 *мксек*) лежат близко к значениям τ_0 и $2\tau_0$.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Л. А. Сысоеву за предоставленные монокристаллы сульфида кадмия, А. А. Чабану за ценные советы и обсуждение работы и Н. И. Безруковой за помощь в разработке экспериментальной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. R. Hutson, J. H. McFee, D. L. White. Ultrasonic amplification in CdS. Phys. Rev. Let., 1961, **7**, 6, 237—239.
2. H. N. Spector. Amplification of acoustic waves through interaction with conduction electrons. Phys. Rev., 1962, **127**, 4, 1084—1090.
3. Р. Ф. Казаринов, В. Г. Скобов. О возможности усиления ультразвука в полуметаллах в электрическом поле. Ж. эксп. и теор. физ., 1962, **42**, 3, 910—912.
4. Р. Ф. Казаринов, В. Г. Скобов. К теории усиления ультразвука полуметаллами в электрическом и магнитном полях. Ж. эксп. и теор. физ., 1962, **43**, 4(10), 1496—1503.
5. J. H. McFee. Ultrasonic amplification and nonohmic behavior in CdS and ZnO. J. Appl. Phys., 1963, **34**, 5, 1548—1553.
6. 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.
7. A. R. Hutson, D. L. White. Elastic wave propagation in piezoelectric semiconductors. J. Appl. Phys., 1962, **33**, 1, 40—47.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
19 июля 1964 г.