АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXII 1976 Вып. 1

УДК 534:548

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

*В. И. Васькова, И. А. Викторов, А. А. Талашев*

На основании экспериментального исследования электронного затухания и усиления продольных, поперечных и рэлеевских волн в сульфиде кадмия и на границе пьезодиэлектрик — сульфид кадмия получены данные о коэффициенте электромеханической связи, электропроводности и эффективной дрейфовой подвижности электронов в объеме и поверхностном слое образцов CdS.

Применение ультразвуковых волн для определения механических свойств объема и поверхностного слоя образца твердого вещества известно [1, 2]. Что касается электрических характеристик образца, то имеются только работы по определению дрейфовой подвижности электронов в полупроводниковом кристалле с помощью упругих волн [3, 4]. Целью данной работы является попытка обобщения ультразвукового метода на случай определения совокупности как объемных, так и поверхностных акустоэлектрических характеристик пьезополупроводникового кристалла, а именно: коэффициента электромеханической связи $K$, электропроводности $\sigma$ и эффективной дрейфовой подвижности электронов $\mu_{эф}=\mu f_t$ ($f_t$ — фактор ловушек). Эти характеристики являются, в частности, определяющими для процессов возбуждения и распространения высокочастотных звуковых волн в кристаллах. Так, $K^2$ определяет эффективность возбуждения — приема звуковых волн в кристалле-изоляторе и интенсивность их взаимодействия с электронами в кристалле-полупроводнике, $\sigma$ и $\mu_{эф}$ играют основную роль при электронном затухании и усилении волн.

Для определения указанных характеристик использовался эффект взаимодействия ультразвуковых волн разного типа в широком частотном диапазоне с электронами проводимости в сульфиде кадмия. Кристаллы CdS, изготовленные в ВНИИ монокристаллов методом, описанным в работе [5], имели форму прямоугольных параллелепипедов со следующими размерами по осям: $l_x=30{,}0$, $l_y=11{,}3$, $l_z=1{,}9$ *мм* (образец № 1) и $l_x=43{,}0$, $l_y=12{,}0$, $l_z=11{,}0$ мм (образец № 2). Электропроводность образцов изменялась путем регулировки их освещенности, создаваемой киноламмой. Опыты проводились в импульсном режиме в частотном диапазоне 30—450 *Мгц*. Использовались продольные, поперечные, рэлеевские волны в кристаллах CdS, а также рэлеевские волны в кристаллах кварца и ниобата лития, граничащих с исследуемыми кристаллами CdS. Продольные и поперечные волны возбуждались пластинками кварца X- и Y-срезов соответственно, для возбуждения — приема рэлеевских волн использовалась система двухфазных металлических электродов, наносимых на кристалл или на стеклянную пластинку, прижимаемую к кристаллу. Объемные волны давали сведения о характеристиках объема образца, рэлеевские — о характеристиках поверхностного слоя толщиной $\sim\lambda_R$ ($\lambda_R$ — длина рэлеевской волны), а рэлеевские волны на границе кварца и ниобата лития с CdS — о характе-

| Номер образца | Образец № 1 из CdS | | | | | | | | Образец № 2 из CdS | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тип волны | продольн. $f=28$ *Мгц* $\lambda=158$ *мкм* | продольн. $f=82$ *Мгц* $\lambda=58$ *мкм* | рэлеевск. $f=29$ *Мгц* $\lambda=59$ *мкм* | рэлеевск. $f=87$ *Мгц* $\lambda=20$ *мкм* | рэлеевск. $LiNbO_3$—CdS $f=89$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=6{,}2$ *мкм* | рэлеевск. $SiO_2$—CdS $f=88$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=5{,}7$ *мкм* | рэлеевск. $SiO_2$—CdS $f=265$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=1{,}9$ *мкм* | рэлеевск. $SiO_2$—CdS $f=442$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=1{,}1$ *мкм* | поперечн. $f=30$ *Мгц* $\lambda=60$ *мкм* | поперечн. $f=76$ *Мгц* $\lambda=24$ *мкм* | рэлеевск. $f=30$ *Мгц* $\lambda=57$ *мкм* | рэлеевск. $SiO_2$—CdS $f=88$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=5{,}7$ *мкм* | рэлеевск. $LiNbO_3$—CdS $f=89$ *Мгц* $\frac{\lambda}{2\pi}=6{,}2$ *мкм* |
| $K_{эксп}^2$ | $2{,}85\cdot10^{-2}$ | $4{,}57\cdot10^{-2}$ | $2{,}25\cdot10^{-2}$ | – | $2{,}8\cdot10^{-3}$ | $0{,}47\cdot10^{-3}$ | $0{,}23\cdot10^{-3}$ | $0{,}64\cdot10^{-3}$ | $3{,}6\cdot10^{-2}$ | – | $2{,}5\cdot10^{-2}$ | $0{,}74\cdot10^{-3}$ | $5{,}1\cdot10^{-3}$ |
| $K_{теор}^2$ | $3–5\cdot10^{-2}$ | $3–5\cdot10^{-2}$ | $2{,}9–3{,}7\cdot10^{-2}$ | $2{,}9–3{,}7\cdot10^{-2}$ | $\approx6\cdot10^{-3}$ | $\approx0{,}2\cdot10^{-3}$ | $\approx0{,}2\cdot10^{-3}$ | $\approx0{,}2\cdot10^{-3}$ | $3{,}6\cdot10^{-2}$ | – | $2{,}9\div3{,}7\cdot10^{-2}$ | $\approx0{,}2\cdot10^{-3}$ | $\approx0{,}6\cdot10^{-3}$ |
| $\sigma_{опт.\ эксп}$, $(ом\cdot см)^{-1}$ | $0{,}73\cdot10^{-4}$ | $1{,}70\cdot10^{-4}$ | $2\cdot10^{-6}$<br>$1\cdot10^{-4}$ | $1{,}25\cdot10^{-5}$<br>$\approx3\cdot10^{-4}$ | $2{,}3\cdot10^{-5}$<br>$\approx2\cdot10^{-4}$ | $2{,}4\cdot10^{-4}$ | $2\cdot10^{-3}$ | $4\cdot10^{-3}$ | $1{,}2\cdot10^{-4}$ | – | – | $2\cdot10^{-4}$ | $1{,}6\cdot10^{-4}$ |
| $\sigma_{опт.\ теор}$, $(ом^{-1}\cdot см)^{-1}$ | $1{,}35\cdot10^{-4}$ | $3{,}90\cdot10^{-4}$ | $1{,}5\cdot10^{-4}$ | $4{,}5\cdot10^{-4}$ | $5{,}6\cdot10^{-4}$ | $15{,}5\cdot10^{-4}$ | $4{,}65\cdot10^{-3}$ | $7{,}8\cdot10^{-3}$ | $1{,}45\cdot10^{-4}$ | – | – | $15{,}5\cdot10^{-4}$ | $5{,}6\cdot10^{-4}$ |
| $\frac{\sigma_{пов}}{\sigma_{объем}}$ | – | – | 75<br>1,5 | 36<br>≈1,5 | 24<br>≈2,8 | 6,5 | 2,3 | 2 | – | – | – | 7,8 | 3,5 |
| $\mu_{эф}$, $в^{-1}\cdot см^2\cdot сек^{-1}$ | 104–110 | 70–100 | – | – | 45–70 | – | – | – | 190–240 | 180–195 | – | – | 30–140 |

ристиках тонкого поверхностного слоя глубиной $\sim\lambda_R/2\pi$, поскольку взаимодействие рэлеевских волн с электронами на границе пьезодиэлектрик — полупроводник происходит в слое именно такой толщины [6].

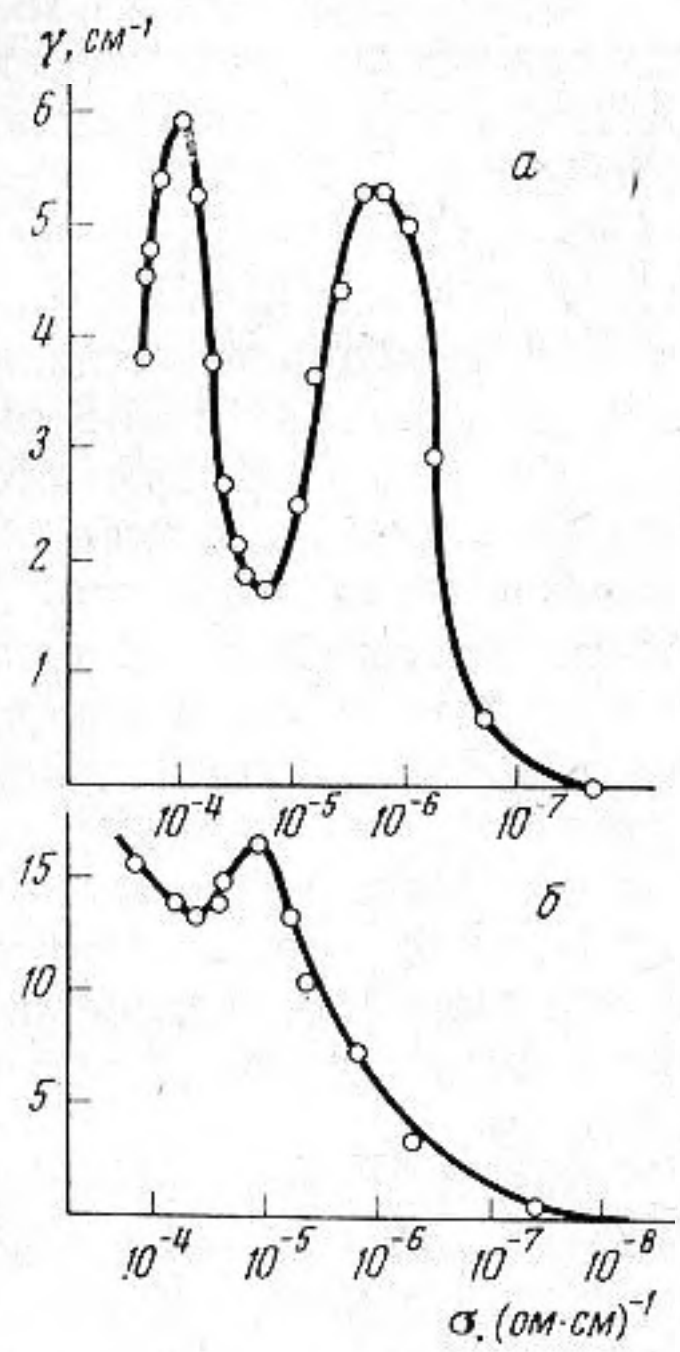
Коэффициент электромеханической связи для каждого типа волн экспериментально определялся из соотношения $K^2=4\gamma'$, где $\gamma'$ — отнесенный к $2\pi$ максимальный коэффициент затухания $\gamma$ (1/*см*) на длине волны. Для объемных волн $\sqrt{4\gamma'}$ — обычный коэффициент электромеханической связи (при $K^2 \ll 1$, см. [7]), а для поверхностных волн — его так называемое эффективное значение. В таблице приведены экспериментальные $K^2_{\text{эксп}}$ и теоретические $K^2_{\text{теор}}$ значения $K^2$. Теоретические значения для продольных и поперечных волн взяты нами из работы [7], а для рэлеевских волн в CdS — из работ [8—10]. Теоретические значения $K^2$ для рэлеевских волн на границе $SiO_2$—CdS и $LiNbO_3$—CdS приближенные. Они получены экстраполяцией нашего расчета для рэлеевской волны на границе CdS изолятор — CdS полупроводник [6] на случай границ $SiO_2$—CdS и $LiNbO_3$—CdS.

Как видно из таблицы, для объемных и рэлеевских волн в CdS теоретические и экспериментальные значения $K^2$ удовлетворительно совпадают, а для рэлеевских волн на границе кварца и ниобата лития с CdS они совпадают только по порядку величин. По-видимому, основной причиной данного расхождения является очень сильное влияние состояния контактных поверхностей кристаллов на значения $K^2$; теоретические значения $K^2$ рассчитывались в предположении идеально плоских поверхностей с бесконечно малым зазором между ними, в опытах же поверхности были оптически полированными со средним воздушным зазором $h\approx0{,}25$ *мкм*. Общее сопоставление всех экспериментальных и теоретических значений $K^2$ для разных типов волн свидетельствует о том, что в соответствии с нашими расчетами [6] значение $K^2$ для рэлеевских волн на границе пьезоэлектрика и полупроводника примерно на порядок меньше, чем для рэлеевских волн в полупроводниковом кристалле, граничащем с вакуумом, или для продольных и поперечных волн в объеме кристалла.

Кривые электронного затухания позволяли установить связь между объемной $\sigma$ и поверхностной $\sigma_{\text{пов}}$ электропроводностями образцов CdS. Объемная электропроводность $\sigma$ измерялась на пробном образце, вырезанном из исследуемого кристалла (совпадение полученного таким образом значения $\sigma$ с истинным значением подтверждалось непосредственными измерениями). Величина $\sigma_{\text{пов}}$ находилась из сопоставления теоретического [6, 8] и экспериментального оптимальных (соответствующих максимуму электронного затухания) значений $\sigma$—$\sigma_{\text{опт}}$ для рэлеевских волн, а именно, из соотношения $\frac{\sigma_{\text{пов}}}{\sigma}=\frac{\sigma_{\text{опт. теор}}R}{\sigma_{\text{опт. эксп}}R}$ где $\sigma_{\text{опт. эксп}}R$ — соответствующая электропроводность объема. Обоснованием этому способу служит следующее обстоятельство. Для объемных волн, согласно нашим и многочисленным литературным данным, всегда с хорошей точностью выполняется равенство $\sigma_{\text{опт. теор}}=\sigma_{\text{опт. эксп}}$. Для рэлеевских волн мы наблюдали и ранее [11], и в данных исследованиях резкое различие этих значений. Естественно предположить, что причиной его является отличие проводимости поверхностного слоя от проводимости объема образца. Определенные описанным образом значения электропроводностей приведены в таблице.

Как видно из таблицы, в образце № 2 электропроводность поверхностного слоя толщиной $\sim$6 *мк* в 4—8 раз больше объемной. В образце № 1 рэлеевские волны дали возможность не только заметить отличие $\sigma_{\text{пов}}$ от $\sigma$, но и проследить определенную закономерность в распределении электропроводности по толщине слоя: вблизи свободной поверхности электропроводность вдвое больше объемной, затем на глубине $\sim$30 *мк* она возрастает почти на два порядка по сравнению с $\sigma$ и далее стремится к значению $\sigma$. Этот факт следует из того, что для данного образца на кривых электронно-

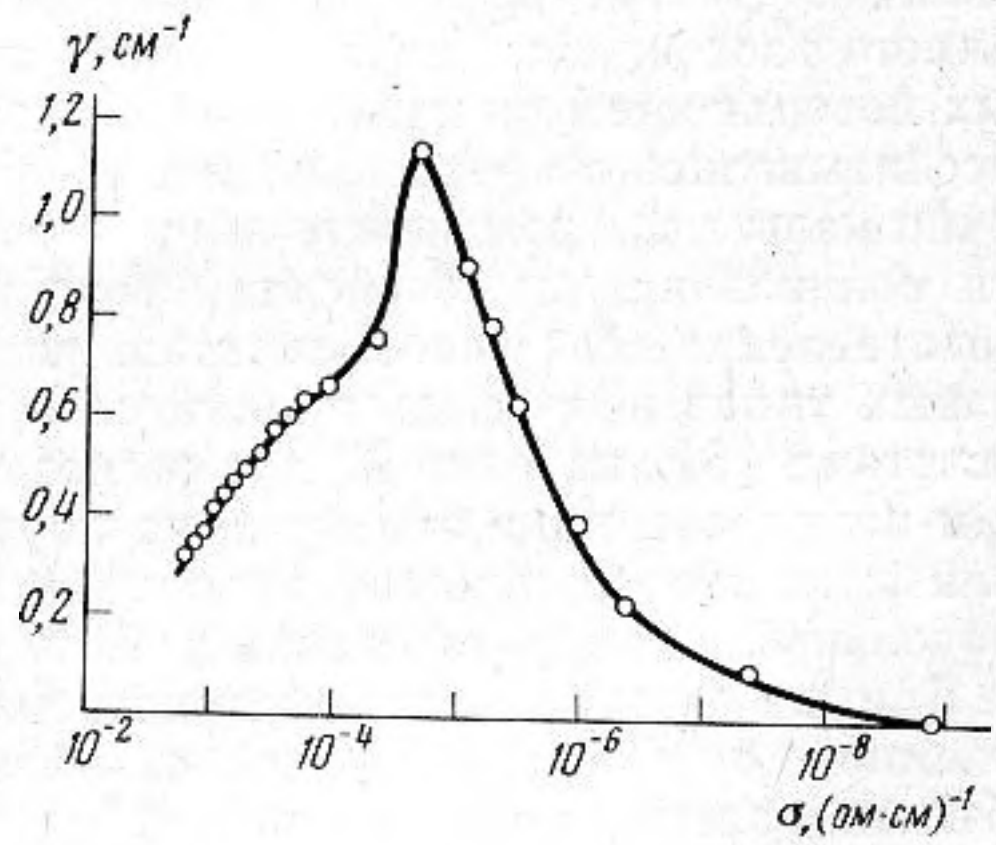
го затухания рэлеевских волн частот 29 и 87 *Мгц* (фиг. 1, *а*, *б*), локализованных в слоях толщиной ~60 и 20 *мк*, имеются два максимума, один из которых соответствует как бы слою с $\sigma_{пов} \approx 1{,}5\,\sigma$, другой — слою с $\sigma_{пов} \approx 75\,\sigma$. Для рэлеевской волны частоты 89 *Мгц*, распространяющейся на границе ниобата лития с образцом № 1 CdS и взаимодействующей с электронами CdS в поверхностном слое толщиной ~6 *мк*, второй максимум электронного затухания только намечается (фиг. 2). Установленная возможность обнаружения с помощью рэлеевских волн характера зависимости σ от расстояния до поверхности представляется нам весьма интересной.



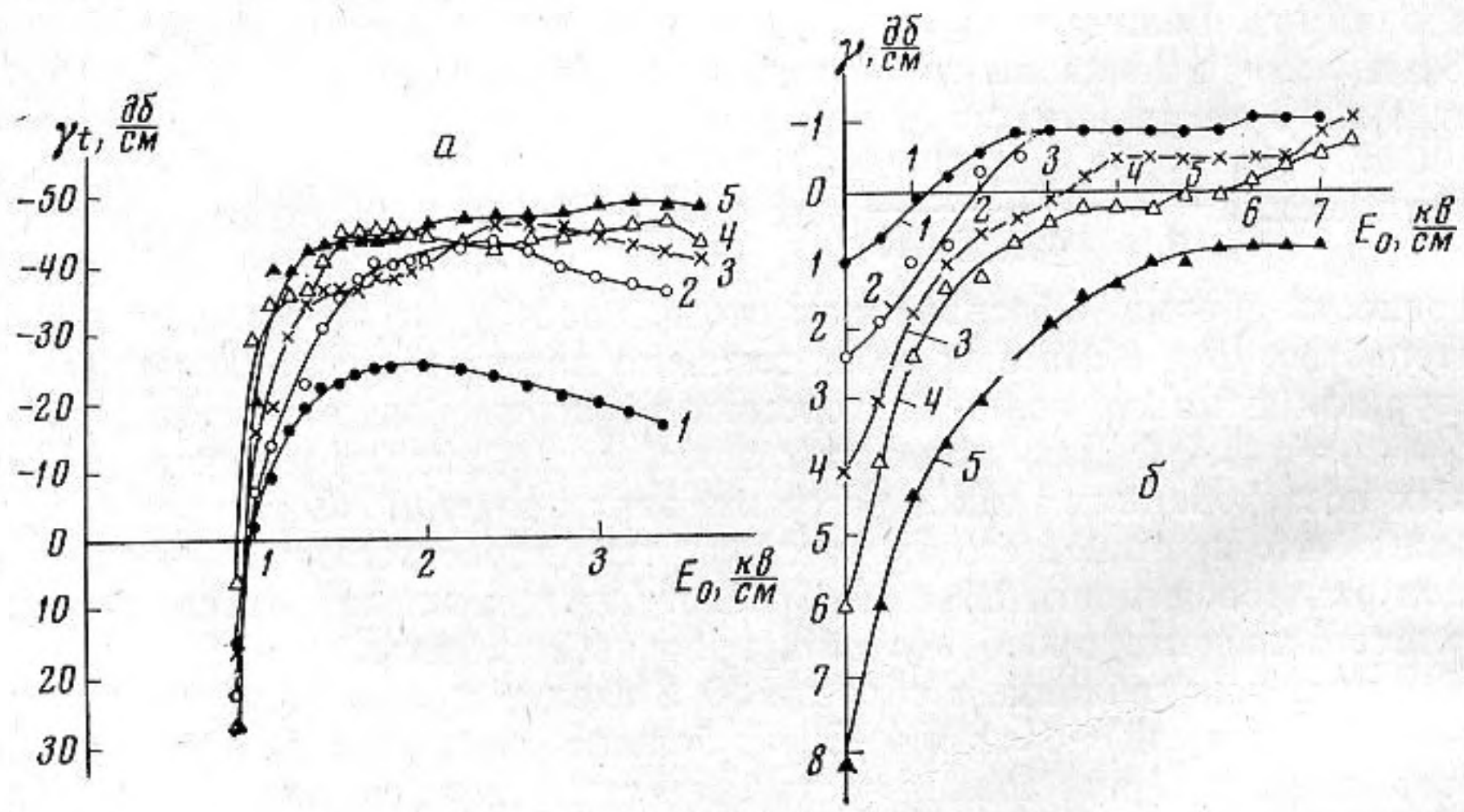

Фиг. 1

Фиг. 1. Зависимости коэффициента электронного затухания γ (*см*⁻¹) рэлеевских волн частоты 29 *Мгц* (*а*) и 87 *Мгц* (*б*) от электропроводности σ в образце № 1 CdS

Фиг. 2. Зависимость коэффициента электронного затухания γ (*см*⁻¹) рэлеевских волн частоты 89 *Мгц*, распространяющихся в ниобате лития, граничащем с образцом № 1 CdS, от электропроводности σ

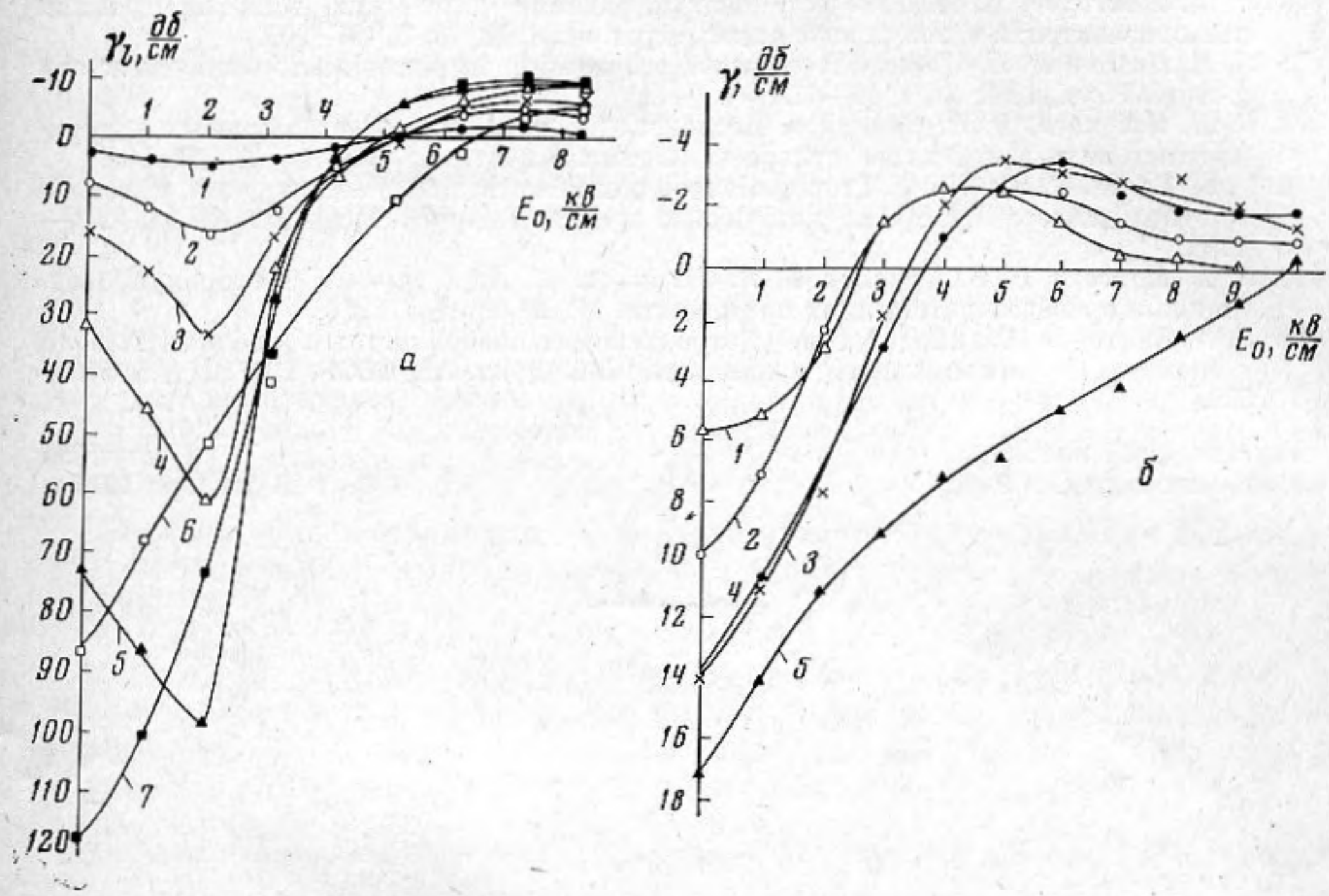



Фиг. 2




Фиг. 3. Зависимости коэффициента γ (*дб/см*) электронного затухания — усиления от дрейфового поля $E_0$ для поперечных волн частоты 76 *Мгц* в образце № 2 CdS (*а*) и для рэлеевских волн частоты 89 *Мгц* на границе ниобат лития — образец № 2 CdS (*б*); на фиг. 3, *а*: кривая *1* — $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}$; *2* — $\sigma = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$; *3* — $\sigma = 8 \cdot 10^{-5}$; *4* — $\sigma = 2 \cdot 10^{-4}$; *5* — $\sigma = 5 \cdot 10^{-4}$ *ом*⁻¹·*см*⁻¹; на фиг. 3, *б*: кривая *1* — $\sigma = 4{,}5 \cdot 10^{-5}$; 2 — $\sigma = 5{,}5 \cdot 10^{-5}$; *3* — $\sigma = 9{,}1 \cdot 10^{-5}$; *4* — $\sigma = 1{,}04 \cdot 10^{-4}$; *5* — $\sigma = 1{,}9 \cdot 10^{-4}$ *ом*⁻¹·*см*⁻¹

Измерение электронного усиления рэлеевских волн частоты 89 *Мгц*, распространяющихся в $LiNbO_3$, граничащем с CdS, а также усиления продольных и поперечных волн позволили получить сведения об эффективной дрейфовой подвижности $\mu_{эф}=\mu f_t$ в образцах № 1 и 2 кристаллов CdS. Эффективная дрейфовая подвижность вычислялась нами по критическому полю $E_{кр}$ из соотношения $\mu_{эф}=c/E_{кр}$, где $c$ — фазовая скорость объемной или поверхностной волны. Достоинством этого метода является его




Фиг. 4. Зависимости коэффициента $\gamma$ (*дб/см*) электронного затухания – усиления от дрейфового поля $E_0$ для продольных волн частоты 82 *Мгц* в образце № 1 CdS (*а*) и для рэлеевских волн частоты 89 *Мгц* на границе ниобат лития – образец № 1 CdS (*б*); на фиг. 4, *а*: кривая *1* – $\sigma=2{,}73\cdot10^{-6}$; *2* – $\sigma=1{,}15\cdot10^{-5}$; *3* – $\sigma=2{,}3\cdot10^{-5}$; *4* – $\sigma=4\cdot10^{-5}$; *5* – $\sigma=8{,}57\cdot10^{-5}$; *6* – $\sigma=1{,}67\cdot10^{-4}$; *7* – $\sigma=2{,}5\cdot10^{-4}$ $ом^{-1}\cdot см^{-1}$; на фиг. 4, *б*: кривая *1* – $\sigma=1{,}94\cdot10^{-6}$; *2* – $\sigma=5{,}2\cdot10^{-6}$; *3* – $\sigma=1{,}40\cdot10^{-5}$; *4* – $\sigma=1{,}94\cdot10^{-5}$; *5* – $\sigma=5{,}6\cdot10^{-5}$ $ом^{-1}\cdot см^{-1}$

простота и приспособленность к акустическим измерениям. К недостаткам относится возможность определения только величины $\mu f_t$, а не просто $\mu$, и невысокая точность измерений, вызванная сильным влиянием акусто-э.д.с. и электрических неоднородностей кристалла на результаты измерений. На фиг. 3, 4 приведены кривые усиления, полученные при разных значениях электропроводности $\sigma$. Как видно из кривых, величина $\mu_{эф}$ и в объеме, и в поверхностном слое толщиной ~5 *мк* зависит от электропроводности образца. Для объема (опыты с продольными и поперечными волнами) эта зависимость выражена слабо: в интервале значений $\sigma$ от $10^{-6}$ до $10^{-4}$ подвижность практически постоянна и несколько уменьшается при $\sigma>10^{-4}$ $ом^{-1}\cdot см^{-1}$. Для тонкого поверхностного слоя величина $\mu_{эф}$ существенно зависит от $\sigma$, уменьшаясь с ростом электропроводности. Среднее значение объемной подвижности для образца № 1 примерно в 2 раза больше, чем значение поверхностной подвижности, а для образца № 2 — в 2,5 раза больше (см. таблицу).

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Л. Бергман.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. *И. А. Викторов.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике, М., «Наука», 1966.

3. *С. В. Богданов, М. Д. Левин, И. Б. Яковкин.* Определение подвижности носителей заряда в поверхностном слое полупроводников по усилению упругих поверхностных волн. ФТП, 1974, *8*, 6, 1191—1194.
4. *В. И. Пустовойт, В. И. Байбаков, Г. С. Падо.* Акустоэлектрический эффект в CdSe в режиме непрерывного усиления ультразвука потоком электронов. Докл. АН СССР, 1967, *174*, 4, 791–794.
5. *Л. А. Сысоев, Б. Л. Тиман, А. С. Гершун, Э. К. Райскин, Л. В. Конвиссар, В. К. Комарь.* О выращивании кристаллов CdS для целей усиления ультразвука. Кристаллография, 1966, *11*, 6, 933—935.
6. *И. А. Викторов, А. А. Талашев.* Распространение рэлеевских волн на границе пьезодиэлектрика и полупроводника. Акуст. ж., 1972, *18*, 2, 197–205.
7. *A. R. Hutson, D. L. White.* Elastic wave propagation in piezoelectric semiconductors. J. Appl. Phys., 1962, *33*, 1, 40—47.
8. *В. И. Васькова, И. А. Викторов.* Исследование усиления ультразвуковых поверхностных волн в кристалле сульфида кадмия. Акуст. ж., 1969, *15*, 4, 529–533.
9. *C. C. Tseng, R. M. White.* Propagation of piezoelectric and elastic surface waves on the basal plane of hexagonal piezoelectric crystals. J. Appl. Phys., 1967, *38*, 11, 4274—4280.
10. *А. И. Морозов, В. В. Проклов, Б. А. Станковский, А. Д. Гингис.* Пьезополупроводниковые преобразователи и их применение. М., «Энергия», 1973.
11. *И. А. Викторов.* Взаимодействие ультразвуковых поверхностных и объемных волн с электронами проводимости в кристалле CdS. Докл. АН СССР, 1967, *174*, 3, 556—559.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
23 декабря 1974 г.