АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XV 1969 Вып. 4

УДК 534.286:537.311.33

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В КРИСТАЛЛЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

В. И. Васькова, И. А. Викторов

Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования усиления рэлеевских волн в кристалле сульфида кадмия. Усиление рэлеевских волн сопоставляется с усилением поперечных волн в том же кристалле.

Усиление поверхностных рэлеевских волн в кристаллах CdS рассматривалось рядом авторов [1—4]. Целью настоящей работы является детальное сопоставление усиления поверхностных рэлеевских волн и объемных поперечных волн (распространяющихся в том же кристалле), а также сравнение экспериментальных и теоретических значений усиления рэлеевских и поперечных волн. Рассмотрен наиболее интересный на практике случай, когда кристалл граничит с вакуумом вдоль плоскости $z = 0$, перпендикулярной гексагональной оси, а рэлеевская волна частоты ω распространяется по направлению x в этой плоскости. В этом же направлении к кристаллу приложено постоянное дрейфовое поле E_0.

Решение уравнений движения, уравнений пьезоэффекта, тока и уравнений Максвелла, удовлетворяющее граничным условиям на плоскости $z = 0$ (по поводу последних см. работу [5]) приводит к следующим расчетным формулам для относительного изменения $\Delta c_R / c_R$ фазовой скорости рэлеевской волны и отнесенного к 2π коэффициента усиления (затухания) γ волны на длине волны:

$$\frac{\Delta c_R}{c_R} = -\operatorname{Re}\alpha, \qquad \gamma = \operatorname{Im}\alpha. \tag{1}$$

Здесь

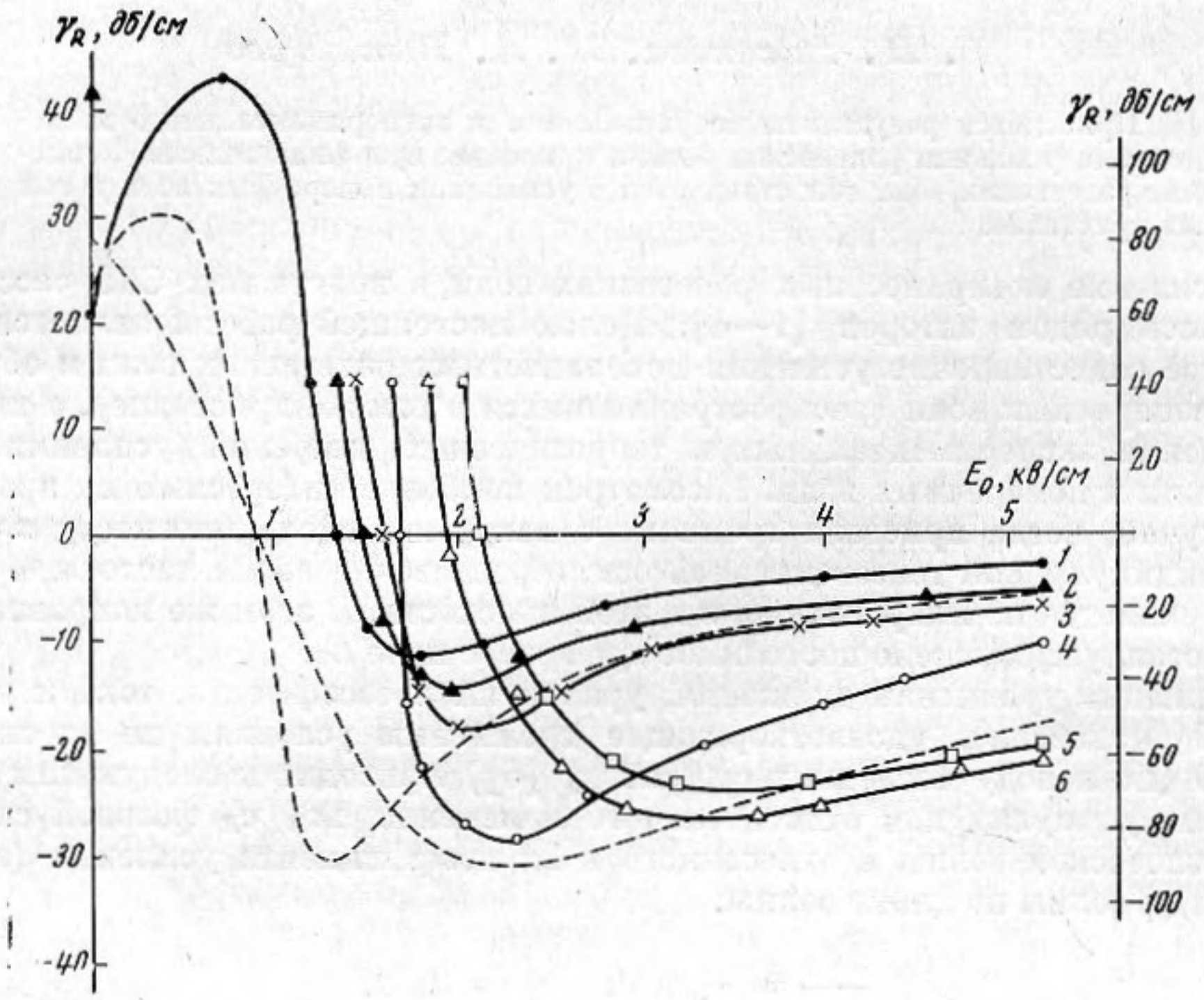
$$\alpha = \left(-0{,}0326 + 0{,}0267\,\frac{\zeta + i\dfrac{\omega}{\omega_D} + 1{,}23i\dfrac{\omega_c}{\omega}}{\zeta + i\dfrac{\omega}{\omega_D} + 1{,}19i\dfrac{\omega_c}{\omega}}\right)\delta_1 +$$

$$+\left(-0{,}327 + 0{,}0258\,\frac{\zeta + i\dfrac{\omega}{\omega_D} + 0{,}83i\dfrac{\omega_c}{\omega}}{\zeta + i\dfrac{\omega}{\omega_D} + 1{,}19i\dfrac{\omega_c}{\omega}}\right)\delta_2 +$$

$$+\frac{\dfrac{\omega}{\omega_D}i}{\zeta + i\dfrac{\omega}{\omega_D} + 1{,}19i\dfrac{\omega_c}{\omega}}\left[0{,}01\left(1 - \frac{\delta_1}{\delta_1}\right) - 0{,}00081\left(1 - \frac{\delta_2}{\delta_2}\right)\right],$$

$$\delta_1 = \frac{0{,}398\left(\zeta - 0{,}98\dfrac{\omega}{\omega_D}i\right)}{\zeta - 0{,}98\dfrac{\omega}{\omega_D}i + 1{,}25\dfrac{\omega_c}{\omega}i}, \quad \delta_2 = \frac{0{,}0546\left(\zeta + 0{,}968\dfrac{\omega}{\omega_D}i\right)}{\zeta + 0{,}968\dfrac{\omega}{\omega_D}i + 1{,}394\dfrac{\omega_c}{\omega}i}.$$

$\omega_c = \sigma$, $\omega_D = \frac{c_R^2}{fD}$, $\zeta = 1 - \frac{\mu f E_0}{c_R}$, σ — проводимость кристалла, μ — подвижность электронов в кристалле, D — коэффициент диффузии электронов, f — фактор ловушек, $\overline{\delta_{1,2}} = \delta_{1,2}$ при $\sigma = 0$. Значения постоянных кристалла CdS взяты нами из работы [6]. Приведенные формулы получены расчетом по методу последовательных приближений. Их максимальная относительная ошибка составляет $\simeq 25\%$. Эти формулы являются более точными, чем аналогичные формулы для $\Delta c_R / c_R$ и γ из работы [3]



Фиг. 1

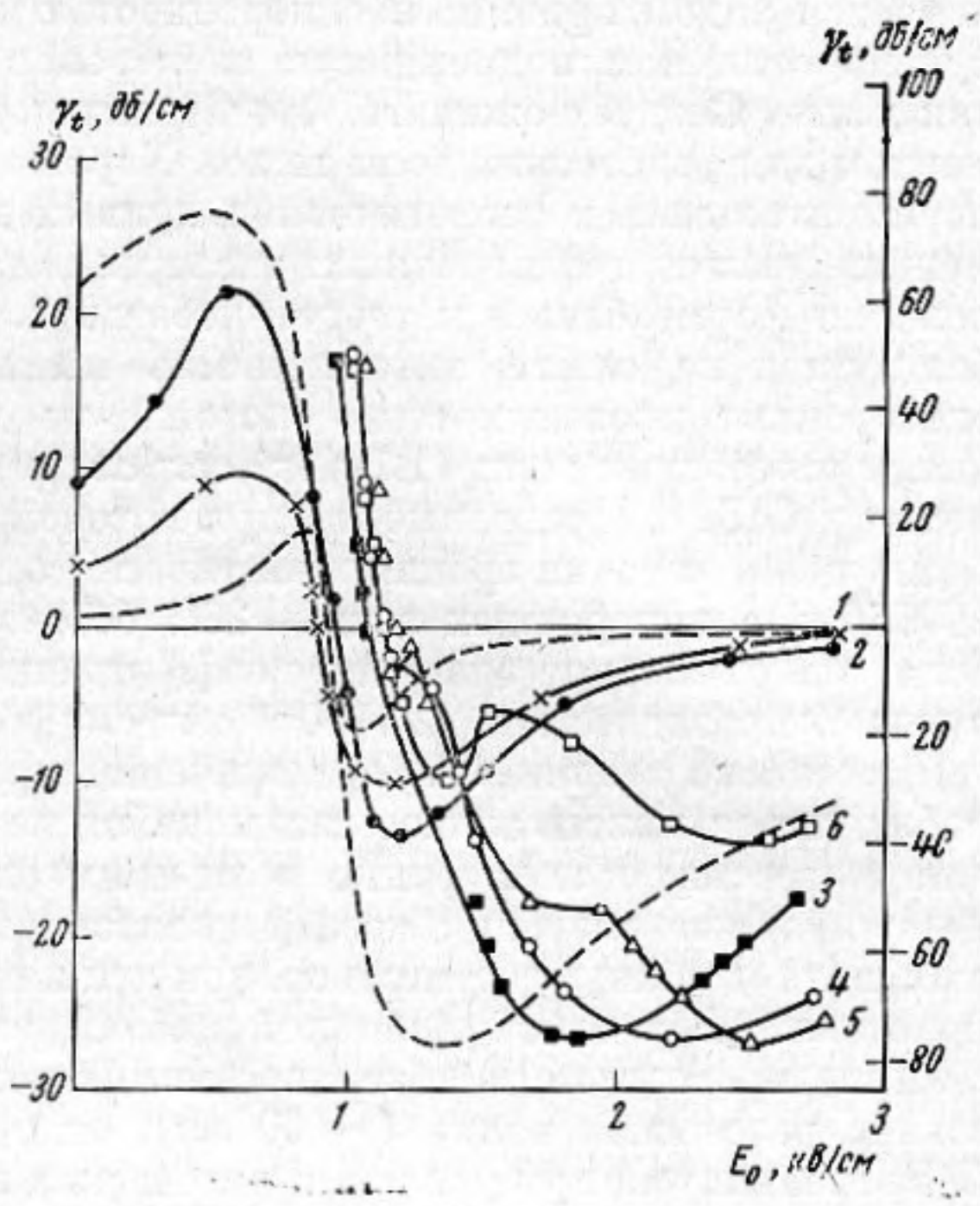
(последние были выведены при использовании приближенного граничного условия непрерывности вектора электрической индукции на плоскости $z = 0$). Однако на частотах $\omega \ll \omega_D$ (в частности, при частоте 30 *Мгц*, на которой были выполнены описанные ниже опыты) различие в результатах расчета по указанным формулам составляет не более 10%.

Эксперименты проводились на кристалле CdS, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда с размерами по осям $l_x = 52$, $l_y = 11{,}50$, $l_z = 11{,}55$ *мм*. Рэлеевские волны распространялись вдоль грани $52 \times \times 11{,}5$ *мм*, а поперечные — по оси y с направлением смещения частиц в волне вдоль оси z. Рэлеевскую волну было целесообразно сопоставлять именно с такой объемной волной, поскольку фазовые скорости этих волн почти одинаковы и «основное» (нормальное) смещение в рэлеевской волне параллельно смещению в поперечной волне.

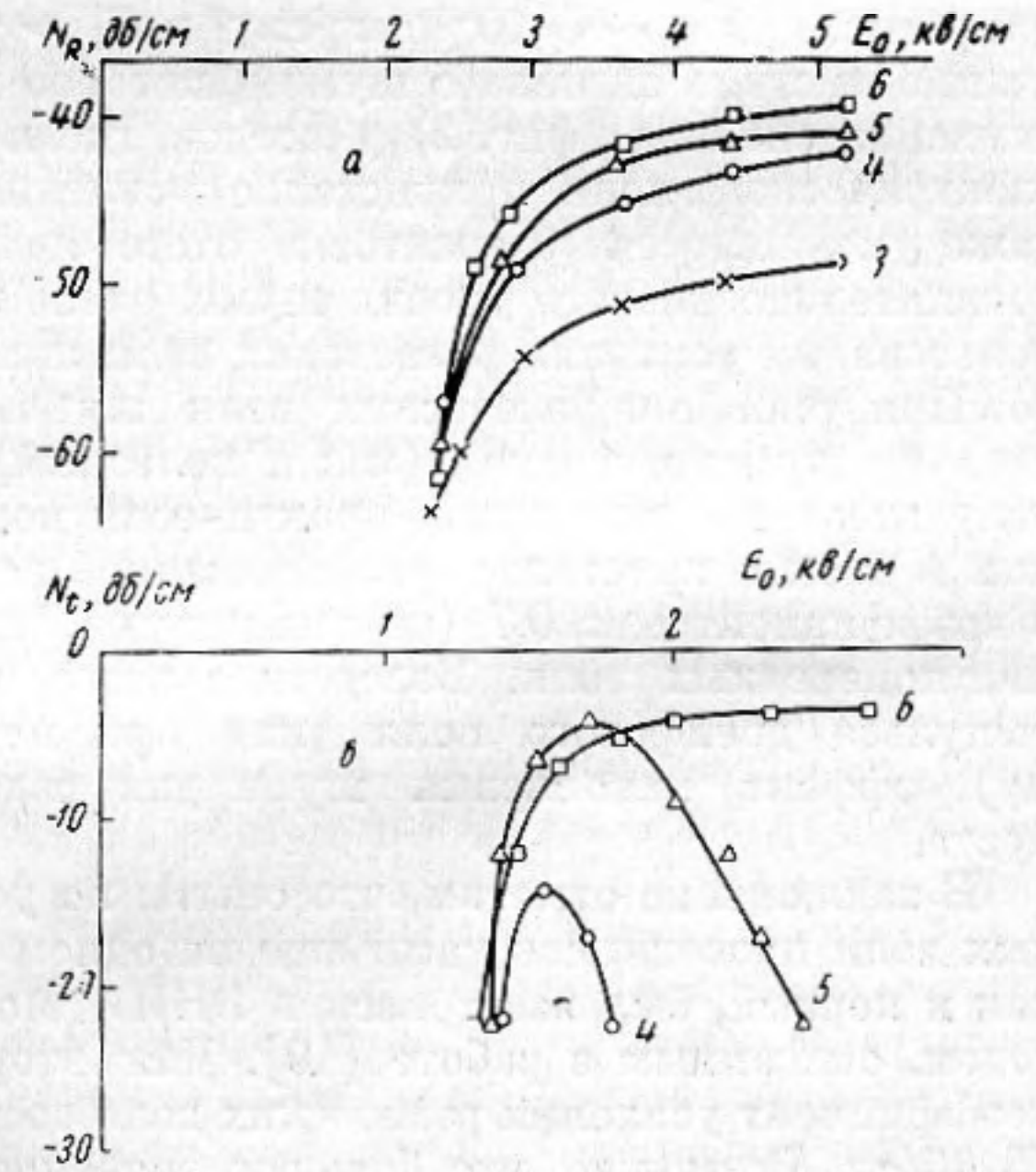
Усиление измерялось в импульсном режиме на частоте 30 *Мгц* при длительности импульсов в пределах $1 \div 3$ *мксек*. Для исследования усиления рэлеевских волн использовалась схема, описанная в работе [2], а для поперечных волн применялась общеизвестная схема [7]. Длина пути, на котором происходило усиление рэлеевских волн, составляла 7 *мм*, для поперечных волн — 11,5 *мм*.

На фиг. 1—3 приведены результаты измерений и расчета. На фиг. 1 изображены кривые для рэлеевских, а на фиг. 2 — для поперечных волн.

По осям абсцисс отложена напряженность дрейфового поля в кристалле в *кв/см*, по осям ординат — коэффициенты $\gamma_{R,\,t}$ усиления ($\gamma < 0$) или затухания ($\gamma > 0$) в *дб/см*. Каждая кривая на фигурах соответствует определенному значению проводимости σ кристалла. На фиг. 1 — это следующие значения: *1* — $6{,}7 \cdot 10^{-5}$, *2* — $7{,}5 \cdot 10^{-5}$, *3* — $8{,}8 \cdot 10^{-5}$, *4* — $1{,}7 \cdot 10^{-4}$, *5* — $2{,}1 \cdot 10^{-4}$, *6* — $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$; на фиг. 2: *1* — $2{,}1 \cdot 10^{-6}$, *2* — $3{,}1 \cdot 10^{-6}$, *3* — $1{,}6 \cdot 10^{-5}$, *4* — $2{,}1 \cdot 10^{-5}$, *5* — $3{,}5 \cdot 10^{-5}$, *6* — $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$. Области значений σ выбирались с таким расчетом, чтобы получить максимальные на данной частоте значения коэффициентов усиления (затухания) волн в кристалле. На каждой из фигур имеется по две теоретических кривых (штриховые линии), соответствующих граничным (наибольшему и наименьшему) значениям проводимости. (Масштаб изменения коэффициентов $\gamma_{R,\,t}$ для них см. на правых осях ординат). Теоретические кривые для рэлеевских волн рассчитаны по формулам (1), а для поперечных волн — по формулам работы [8]. При расчете мы полагали $\mu = 200$ *в*$^{-1}$ *см*^{2} *сек*$^{-1}$, $T = 300°$ К, $f = 1$. На фиг. 3 изображены кривые усиления шума в образце при различных значениях его проводимости (фиг. 3, *а* — шум в опытах с рэлеевскими волнами, фиг. 3, *б* — шум в опытах с поперечными волнами). Под шумом здесь понимаются тепловые колебания решетки кристалла (волны Дебая), усиленные дрейфовым полем. Естественно, что шум измерялся в полосе пропускания нашей схемы (28—32 *Мгц*). Уровень шума $N_{R,\,t}$, отложенный на фигуре по оси ординат, представляет собой $20\lg\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_0}$, где ε_N — э. д. с., раз-



Фиг. 2



Фиг. 3

виваемая шумовым сигналом на приемной кварцевой пластинке, ε_0 — некоторый постоянный уровень (э.д.с. темнового сигнала поперечных волн в кристалле).

Анализируя кривые, представленные на фиг. 1—3, можно констати-

ровать следующее: 1. Для рэлеевских, и для поперечных волн соответствие экспериментальных и теоретических кривых усиления носит только качественный характер. Для опытов с объемными волнами такое расхождение теории и эксперимента типично (см. например, работы [7, 8]) и объясняется рядом причин: неоднородностью кристалла, наличием в нем ловушек, отличием подвижности электронов от ее расчетного значения и так далее. Следует ожидать, что причины расхождения теории с экспериментом для рэлеевских волн те же. Характерно, что степень различия экспериментальных и теоретических кривых для рэлеевских волн несколько меньше, чем для поперечных: экспериментальные кривые для рэлеевских волн по форме ближе к теоретическим. 2. В соответствии с теорией, наблюдаемая на опыте интенсивность взаимодействия рэлеевских волн с электронами проводимости кристалла не меньше, чем для поперечных ление рэлеевских волн ($1{,}7 \cdot 10^{-4}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$) существенно больше соответстления в CdS. 3. Проводимость, при которой достигается максимальное усиочень ценно с точки зрения практического использования эффекта их уси-29 *дб/см*, а поперечных волн — 26,6 *дб/см*. Это свойство рэлеевских волн волн: максимальное значение коэффициента усиления рэлеевских волн — вующей проводимости ($2{,}1 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$) для поперечных волн. Между тем, согласно теории, области значений проводимости, в которых должно наблюдаться максимальное взаимодействие волн с электронами кристалла, для рэлеевских и поперечных волн примерно совпадают. Это означает, что максимальные значения коэффициентов усиления рэлеевских и поперечных волн должны достигаться при одинаковых значениях проводимости кристалла. Вероятной причиной наблюдаемого различия может являться отличие проводимости поверхностного слоя кристалла, в котором локализована рэлеевская волна (~ 60 *мк*), от проводимости объема кристалла. 4. Уровень шума при усилении рэлеевских волн меньше, чем при усилении поперечных волн. Благодаря этому шумы не оказывают существенного влияния на усиление импульса рэлеевских волн. Для поперечных волн, напротив, при $\sigma \sim 5 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$*см*$^{-1}$ и $E_0 \sim 1{,}5$ *кв/см* наблюдается сильное взаимодействие сигнала с шумом, которое приводит к наличию у кривых усиления сигнала (фиг. 2) участков, где при увеличении напряженности электрического поля в кристалле усиление временно перестает расти и даже уменьшается (о трактовке этого явления см. работу [9]). Помимо сравнительно низкого уровня шума, очень важным для практического использования усиления рэлеевских волн является следующее обстоятельство. При усилении рэлеевских волн шумам негде «накапливаться», поскольку шумовой сигнал (как и полезный), пройдя однократно путь от излучателя до приемника, практически полностью поглощается приемником и частью кристалла, расположенной за ним, а не отражается обратно с коэффициентом $\simeq 0{,}7$ (по амплитуде), как это происходит при усилении поперечных волн. Вследствие этого, при увеличении длительности импульса дрейфового поля (или при переходе к непрерывному режиму) эффект накопления шума для рэлеевских волн не будет иметь места.

В заключение отметим, что опыты по усилению рэлеевских и поперечных волн проводились нами еще на одном кристалле CdS. Этот кристалл, как и первый, был изготовлен в ВНИИ Монокристаллов (г. Харьков) методом, описанным в работе [10]. Для второго кристалла максимальный коэффициент усиления рэлеевских волн составлял 58 *дб/см*, поперечных — 35 *дб/см*. Возможно, что большее значение коэффициента усиления рэлеевских волн связано здесь с большей однородностью кристалла в случае усиления рэлеевских волн, когда неоднородность по координате z не проявляется. Как и в первом кристалле, проводимость, при которой достигалось максимальное усиление рэлеевских волн, была больше соответствующей проводимости для поперечных волн. Уровень шума при усилении рэлеевских и поперечных волн был примерно одинаков. Однако, вслед-

ствие больших значений коэффициентов усиления рэлеевских волн, соотношение сигнал — шум при усилении рэлеевских волн было по-прежнему существенно лучше, чем при усилении поперечных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. White, F. W. Voltmer. Ultrasonic surface-wave amplification in cadmium sulfide. Appl. Phys. Lett., 1966, **8**, 2, 40—42.
2. В. И. Васькова, И. А. Викторов. Прямое усиление рэлеевских волн в кристалле CdS на частоте 30 *Мгц*. Акуст. ж., 1967, **13**, 2, 292—294.
3. И. А. Викторов. Усиление рэлеевских волн в кристаллах сульфида кадмия. Акуст. ж., 1968, **14**, 3, 467—469.
4. S. Kaliski. Direct amplification of ultra and hypersonic surface waves in semiconducting crystals of wurtzite group. Proc. Vibr. Probl., 1968, **9**, 3, 221—242.
5. И. А. Викторов. Рэлеевские волны в полупроводниковых пьезоэлектрических кристаллах арсенида галия. Докл. АН СССР, 1969, **187**, 2, 294—297.
6. D. Berlincourt, H. Jaffe, L. R. Shiozawa. Electroelastic properties of the sulfides selenides and tellurides of zinc and cadmium. Phys. Rev., 1963, **129**, 3, 1009—1017.
7. A. R. Hutson, J. H. McFee, D. D. White. Ultrasonic amplification in CdS. Phys. Rev. Lett., 1961, **7**, 6, 237—239.
8. D. L. White. Amplification of ultrasonic waves in piezoelectric semiconductors. J. Appl. Phys., 1962, **33**, 1, 40—47.
9. В. И. Васькова, И. А. Викторов, Л. Д. Розенберг. Усиление ультразвукового сигнала и шумы в кристалле CdS. Акуст. ж., 1964, **10**, 4, 403—406.
10. Л. А. Сысоев, Б. Л. Тиман, А. С. Гершун, Э. К. Райскин, Л. В. Конвисар, В. К. Комарь. О выращивании кристаллов CdS для целей усиления ультразвука. Кристаллография, 1966, **11**, 6, 933—935.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
26 ноября 1968 г.