

5. I. Bohm, G. W. Farnell. GaAs transducers. IEEE Trans. Son. Ultrason., 1966, SU-13, 4, 125—129.
6. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике, (пер. с нем.), 2-е изд., М., ИЛ, 1957.
7. Б. И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., Физматгиз, 1961.
8. T. V. Bateman, H. I. McSkimin, I. M. Whelam. Elastic moduli of single-crystals gallium arsenide. J. Appl. Phys., 1959, 30, 4, 544—545.

Государственный н.-и. и проектный институт  
редкометаллической промышленности  
Москва

Поступило в редакцию  
24 июня 1967 г.

УДК 534.222

## УСИЛЕНИЕ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

*И. А. Викторов*

Усиление объемных (продольных и поперечных) волн в кристаллах сульфида кадмия исследовано подробно как теоретически, так и экспериментально; в то же время об усилении рэлеевских волн в таких кристаллах имеется лишь две небольшие экспериментальные работы [1, 2]. В настоящей заметке делается попытка рассмотреть этот вопрос теоретически.

В работе [3] рассчитано затухание рэлеевских волн в кристаллах CdS, обусловленное взаимодействием с электронами проводимости. Результаты этого расчета нетрудно обобщить и на режим усиления рэлеевских волн в таких кристаллах. Пусть кристалл граничит с вакуумом вдоль плоскости  $z = 0$ , перпендикулярной гексагональной оси, а рэлеевская волна распространяется в направлении  $x$  в этой плоскости. Пусть, далее, в кристалле наряду с переменным электрическим полем решетки и электронов имеется постоянное дрейфовое поле с напряженностью  $E_0$ , направленное по оси  $x$ . Уравнения (1) — (5) работы [3], описывающие распространение рэлеевской волны в полупроводниковом кристалле CdS, справедливы и для режима усиления волны, только под  $E_x$  теперь следует понимать прежнюю величину плюс  $E_0$ . Граничные условия на плоскости  $z = 0$  для переменных составляющих электрического поля, электрической индукции и смещений  $U_x$  и  $U_z$  (а именно эти составляющие нас интересуют, поскольку они связаны с рэлеевской волной) записываются в прежней форме.

Учитывая эти замечания и производя вычисления, аналогичные описанным в работе [3], получим следующие расчетные формулы для относительного изменения  $\Delta c / c_0$  фазовой скорости рэлеевской волны и отнесенного к  $2\pi$  коэффициента  $\gamma$  затухания (усиления) рэлеевской волны на длине волны:

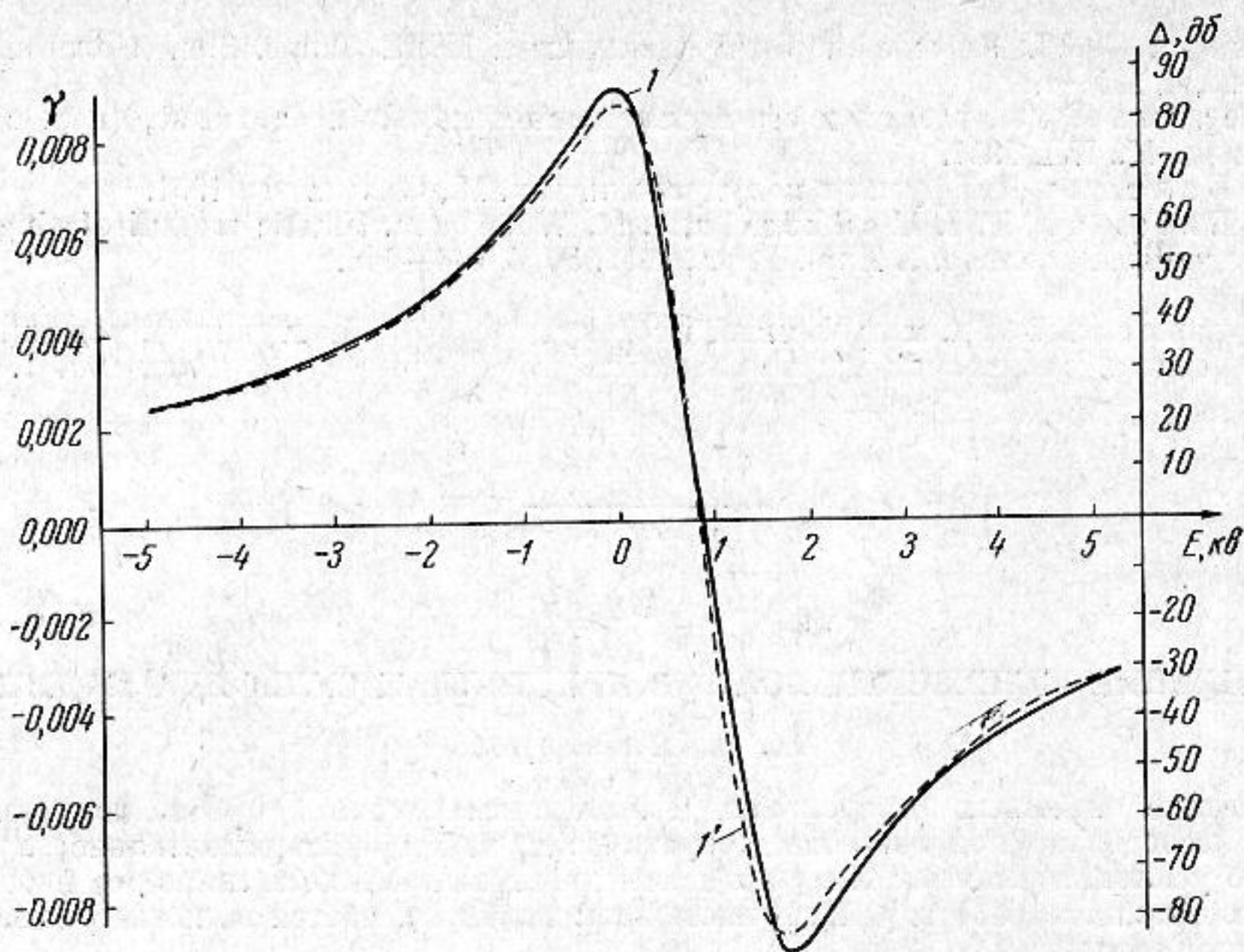
$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{0,232 \cdot 10^{-2} \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,04\zeta^2 \right) \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} - 1,277 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,04\zeta^2 \right)}{1,69 \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \zeta^2 + \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} - 1,277 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,04\zeta^2 \right)^2} +$$

$$+ \frac{1,64 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,065\zeta^2 \right) \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,438 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,065\zeta^2 \right)}{2,21 \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \zeta^2 + \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,438 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,065\zeta^2 \right)^2},$$

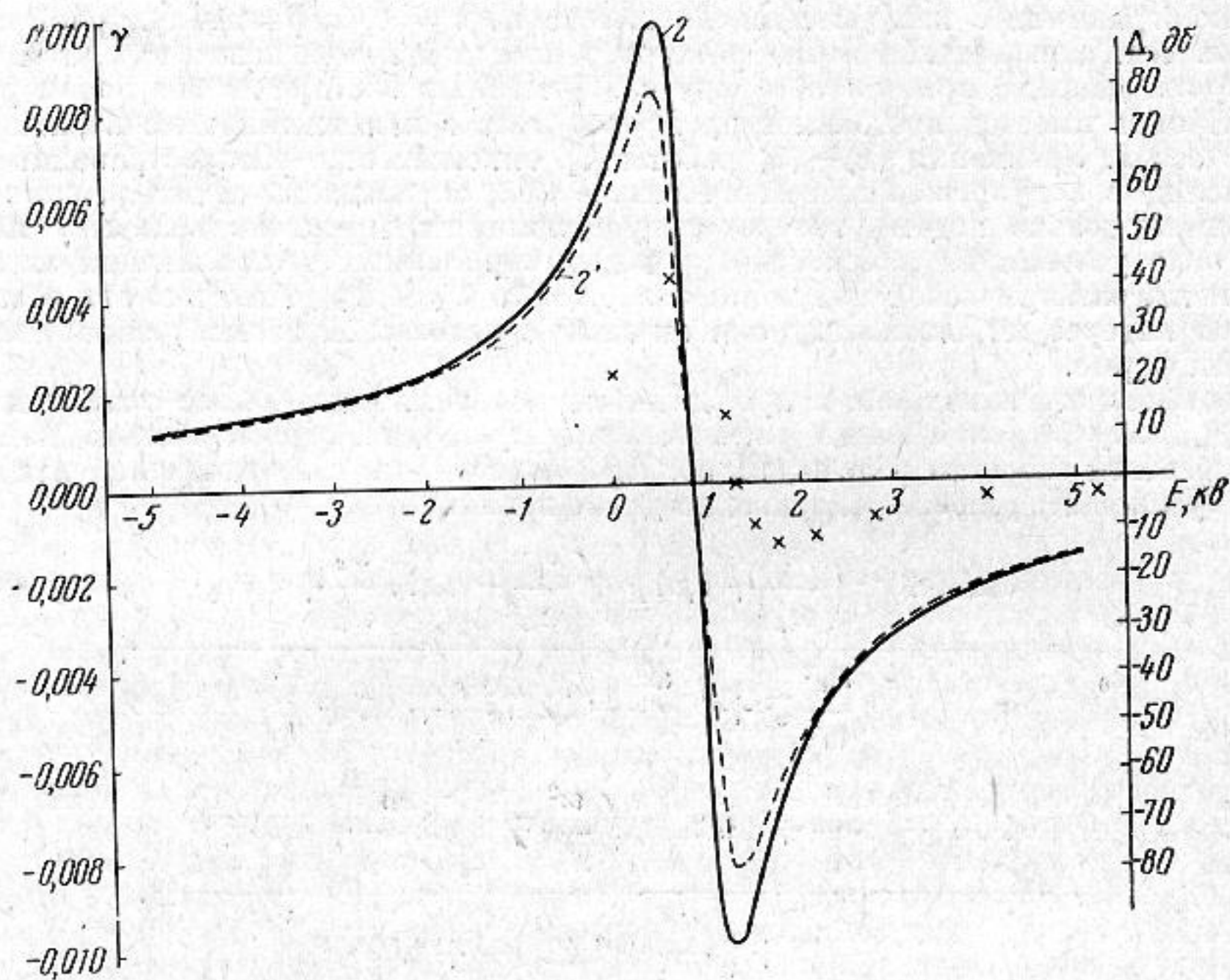
$$\gamma = \frac{0,302 \cdot 10^{-2} \frac{\omega_c}{\omega} \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,04\zeta^2 \right) \zeta}{1,69 \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \zeta^2 + \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} - 1,277 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,04\zeta^2 \right)^2} +$$

$$+ \frac{2,435 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\omega_c}{\omega} \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,065\zeta^2 \right) \zeta}{2,21 \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \zeta^2 + \left( \frac{\omega^2}{\omega_D^2} + 1,438 \frac{\omega_c}{\omega_D} + 1,065\zeta^2 \right)^2}.$$





Фиг. 1



Фиг. 2

Здесь  $\zeta = 1 - \mu f E_0 / c_0$ , остальные обозначения, а также значения постоянных кристалла CdS, используемые нами для получения этих формул, те же, что в работе [3].

На фиг. 1 и 2 изображены рассчитанные по приведенным формулам кривые зависимости  $\gamma(E_0)$  для частоты 30 Мгц при двух значениях проводимости кристалла  $\sigma_0 = 1,41 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  (кривая 1) и  $\sigma_0 = 0,67 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  (кривая 2). Напряженность дрейфового поля в киловольтах отложена по осям абсцисс, затухание (усиление)  $\gamma$  — по левым осям ординат. По правым осям ординат отложен коэффициент  $\Delta$  затухания (усиления) волн на пути 1 см в  $\text{дб}$ . Для сравнения на этих же фигурах приведены аналогичные зависимости (кривые 1' и 2' соответственно) для поперечных волн, рассчитанные по формулам работы [4]. При расчете для всех кривых предполагалось, что подвижность электронов в кристалле  $\mu = 200 \text{ в}^{-1}\text{см}^2\text{сек}^{-1}$ , а фактор ловушек  $f = 1$ . На фиг. 2 крестиками нанесены также взятые из работы [2] экспе-



риментальные значения коэффициента  $\Delta$  для рэлеевских волн на частоте 30 Мгц и при  $\sigma_0 = 0.67 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ .

Как видно из фиг. 1 и 2, кривые для рэлеевских и поперечных волн очень близки друг к другу. Такой результат представляется несколько неожиданным, если учесть, что для рэлеевских волн, локализованных в тонком поверхностном слое, казалось бы, должен проявиться эффект размагничивания [5], уменьшающий их взаимодействие с электронами (а значит, и усиление) по сравнению со случаем объемных волн.

Характер экспериментальной зависимости  $\gamma(E_0)$  для рэлеевских волн такой же, как и соответственной теоретической, однако имеются и заметные различия: теоретическая кривая сдвинута влево относительно совокупности экспериментальных точек, а экспериментально наблюдаемое усиление существенно меньше теоретического. Такое расхождение теории и эксперимента типично и для опытов с объемными волнами. Следует ожидать, что причины расхождений здесь одни и те же: наличие в кристалле ловушек, неоднородность кристалла, отличие подвижности электронов от ее расчетного значения и т. д.

Что касается зависимости  $\Delta c / c_0$  от напряженности дрейфового поля, то она тоже очень близка к соответственной зависимости для поперечных волн [4] и на ней мы останавливаться не будем.

Автор благодарит Л. Д. Розенберга и А. А. Чабана за полезные дискуссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. White, F. W. Voltmer. Ultrasonic surface — wave amplification in cadmium sulfide. Appl. Phys. Let., 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. Рэлеевские волны в кристаллах сульфида кадмия. Докл. АН СССР, 1968, 178, 6, 1281—1284.
4. D. L. White. Amplification of ultrasonic waves in piezoelectric semiconductors. J. Appl. Phys., 1962, 33, 8, 2547—2554.
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., ГИИТ, 1957, стр. 65.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступило в редакцию  
7 июня 1967 г.

УДК 534.833.524.2

### О ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С ВОЗДУШНЫМ ПРОМЕЖУТКОМ БЕЗ СВЯЗИ ПО КОНТУРУ

В. И. Заборов

Звукоизоляция таких ограждений рассматривалась в работах [1, 2]. А. Лондон в работе [1] для согласования расчета с результатами измерений ввел физически неясную величину сопротивления плиты, определяемую из измерения ее звукоизоляции. Полученное в интегральной форме выражение звукоизоляции не позволяет в явном виде установить влияние различных факторов на величину звукоизоляции ограждения. В работе [2] приведено значение дополнительной звукопроницаемости ограждения, составленного из двух упруго связанных плит, при распространении звука в воздушном промежутке между связями.

Ниже получены простые формулы звукоизоляции двойного ограждения без связи по контуру для различных областей частот. Пусть на ограждение, составленное из двух одинаковых безграничных плит с воздушным промежутком  $d$ , падает плоская звуковая волна под углом  $\theta$ . Полагая, что плиты совершают чисто изгибные колебания, из условия равенства нормальных составляющих колебательных скоростей воздуха у поверхностей плит колебательным скоростям этих плит получим коэффициент прохождения звука через двойное ограждение:

$$A = 1 / [(1 + \bar{u} / 2)^2 e^{\bar{\mu}} - (\bar{u} / 2)^2 e^{-\bar{\mu}}],$$

где

$$\begin{aligned} \bar{u} &= u - iv, & u &= \eta_{\text{п}} \Delta \psi \cos \theta, & v &= \Delta (\psi - 1) \cos \theta, \\ \psi &= (\omega / \omega_{\text{гр}})^2 \sin^4 \theta, & \bar{\mu} &= ikd(1 - i\eta_{\text{в}} / 2) \cos \theta, & \Delta &= m_{\text{п}} \omega / \rho_{\text{в}} c, \end{aligned}$$

$m_{\text{п}}$  — масса единицы площади одной плиты,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота колебаний,  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воздуха,  $c$  — скорость воздуха,  $\eta_{\text{п}}$  и  $\eta_{\text{в}}$  — коэффициенты потерь в плите и в воздушном промежутке,  $\omega_{\text{гр}} = 2\pi f_{\text{гр}}$  — круговая граничная частота плиты.