

рассуждая, как и прежде, мы получили бы для коэффициента поглощения более сложное выражение:

$$\gamma = K^2 \frac{\omega}{v_{s0}} \frac{\omega \tau_M \eta}{(1 + q_0^2 L_D^2)^2 + (\omega \tau_M \eta)^2}. \quad (4.30)$$

Здесь  $L_D$  — длина экранирования Дебая, выражаемая формулой (VI.7.2), а  $q_0 = \omega/v_{s0} = 2\pi/\lambda_z$ , где  $\lambda_z$  — длина звуковой волны. Сравнивая формулы (4.27) и (4.30), мы видим, что диффузия уменьшает  $\gamma$ . Это и понятно, так как диффузия противодействует группировке электронов. Далее, из этих формул видно, что учет диффузии становится существенным, если только  $q_0^2 L_D^2 \gtrsim 1$ , или, иначе, когда  $\lambda_z < L_D$ . Выбирая для  $n_0$  даже не очень большое значение  $\sim 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , мы имеем  $L_D \sim 10^{-4} \div 10^{-5} \text{ см}$ . Учитывая затем, что  $v_{s0} \sim 10^5 \text{ см/с}$ , мы находим, что  $q_0 L_D \sim 1$  при частоте  $\omega \sim 10^9 \div 10^{10} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, вплоть до очень высоких частот влиянием диффузии можно пренебречь.

Если бы мы учли еще и прилипание электронов, считая фактор прилипания  $f$  вещественным и постоянным («быстрые» ловушки), то мы получили бы прежние формулы (4.27) или, соответственно, (4.30), однако, в выражении для  $\eta$  (4.19) под  $v_d$  следовало бы понимать  $-f\mu \epsilon_0$ , а длину Дебая  $L_D$  нужно было бы заменить на  $fL_D$  [3, 4].

### § 5. Электронное поглощение и усиление ультразвуковых волн

Остановимся теперь на экспериментах по электронному поглощению и усилению упругих волн. При звуковых частотах эти эффекты очень малы. Однако так как  $\gamma_{\text{max}}$  увеличивается с частотой (ср. (4.29)), то при частотах  $\omega/2\pi \gtrsim 1 \div 10 \text{ МГц}$  (ультразвуковые волны) они становятся легко измеримыми.

Чтобы оценить порядок ожидаемых величин, рассмотрим конкретный пример сильного пьезополупроводника — сульфида кадмия (CdS). Его пьезоэлектрические свойства таковы, что если волна распространяется в направлении гексагональной оси  $C$ , то только продольные колебания оказываются пьезоэлектрически активными. Напротив, при распространении волны перпендикулярно оси  $C$  активной является только поперечная волна, в которой смещение параллельно  $C$ . Интересующие нас константы при 300 К имеют следующие значения:

CdS	Продольная волна	Поперечная волна
$K^2$	0,08	0,036
$v_{s0}, \text{ см/с}$	$4,3 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$

Положим, далее,  $\sigma = 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , что для CdS соответствует  $\tau_M = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ . Тогда при частоте  $\omega/2\pi = 30 \text{ МГц}$  (при которой можно еще пренебречь влиянием диффузии) для продольной волны по формуле (4.29) мы находим

$$|\gamma_{\max}| \approx 18 \text{ см}^{-1}.$$

Укажем для сравнения, что в CdS на этой же частоте  $\gamma_{\text{реш}} = 0,07 \text{ см}^{-1}$ , т. е. пренебрежимо мало по сравнению с  $\gamma^*$ ). Тогда при длине пластинки 0,5 см интенсивность волны должна усиливаться в  $\exp(0,5 \cdot 18) \approx 10^4$  раз. Это максимальное усиление

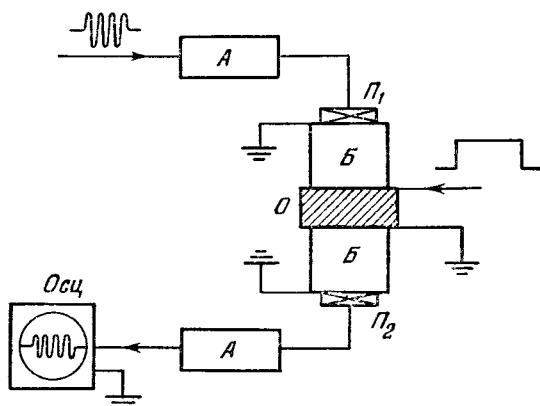


Рис. 15.5. Измерение электронного поглощения и усиления упругих волн в полупроводниках. А — аттенюаторы, Осц — осциллограф.

будет при  $\eta = -1/\omega\tau_M = -0,44$ , что соответствует  $v_d/v_s = 1 - \eta = 1,5$ . При подвижности электронов  $\mu = 200 \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{В}$  для создания такой дрейфовой скорости необходимо электрическое поле  $\mathcal{E}_0 = 3,2 \text{ кВ/см}$ . При больших частотах ожидаемое усиление (поглощение) будет еще больше.

Схема типичного опыта для исследования электронного поглощения и усиления ультразвука показана на рис. 15.5. Здесь  $P_1$  и  $P_2$  — электромеханические преобразователи для генерации и регистрации ультразвуковых волн. В простейшем случае это пьезоэлектрические пластинки (например, из кристаллического кварца), ориентированные должным образом, грани которых металлизированы. При подаче на эти грани переменного напряжения с частотой, совпадающей с одной из собственных частот пластинки, в ней возникают механические колебания вследствие обратного

\* ) Однако следует иметь в виду, что  $\gamma_{\text{реш}} \sim \omega^2$ , и поэтому при более высоких частотах решеточное поглощение может стать заметным.

пьезоэлектрического эффекта, и она становится источником ультразвуковых волн. И наоборот, при прохождении волны через преобразователь на обкладках появляется переменное электрическое напряжение в результате прямого пьезоэлектрического эффекта, пропорциональное амплитуде деформации в волне.  $O$  — исследуемая пластинка пьезополупроводника, грани которой также металлизированы. К ним прикладывают постоянное электрическое напряжение, создающее тянущее поле  $\mathcal{E}_0$ . Для уменьшения нагрева кристалла это поле создают обычно в виде коротких импульсов ( $1 \div 10$  микросекунд). Между преобразователями и образцом  $O$  часто вводят еще диэлектрические звуководы — буферы  $B$ , вызывающие контролируемое запаздывание звуковой волны. Это позволяет отделить во времени импульс, создаваемый в приемном преобразователе звуковой волной, от возможной радиопомехи, наводимой напряжением на излучающем преобразователе. В подобных опытах особенно удобно исследовать фотопроводящие пьезоэлектрические кристаллы. Тогда, меняя интенсивность освещения, можно изменять в широких пределах электропроводность кристалла и исследовать влияние электропроводности ( $\tau_M$ ) на поглощение и усиление волн.

Такие опыты показывают, что вследствие взаимодействия с электронами интенсивность волн может изменяться во много тысяч и даже десятков тысяч раз. Так, например, высокоомные фоточувствительные кристаллы  $CdS$ , которые при частотах порядка  $10 \div 100$  МГц практически не поглощают волн, при освещении становятся совершенно непрозрачными для ультразвука. При наложении на кристалл постоянного напряжения, большего чем критическое, сильное поглощение сменяется большим усилением. Наблюдаемые значения  $\gamma$  в широком интервале изменения интенсивности хорошо согласуются с формулой (4.30).

Однако это, конечно, не значит, что, увеличивая длину кристалла, можно усилить волну в любой степени. Когда интенсивность волны становится очень большой, возникают различные нелинейные эффекты (не учтенные в приведенной выше линейной теории), которые ограничивают максимальное усиление. Один из таких эффектов заключается в том, что концентрация электронов в сгустках  $\tilde{n}$  становится сравнимой с первоначальной концентрацией  $n_0$  и в конце концов все электроны переходят в сгустки. После этого поле  $\tilde{\mathcal{E}}$  уже не вызывает токов  $\tilde{j}$ , и при дальнейшем распространении волны она перестает усиливаться.

## § 6. Акусто-электрический эффект

При поглощении упругих волн на электронах проводимости в кристалле возникает электродвижущая сила и между разомкнутыми гранями кристалла появляется разность потенциалов