

УСИЛЕНИЕ ЗВУКА В n -InSb В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.Л.Дричко, И.В.Ильинский, В.А.Кудинов

Коэффициент поглощения звука носителями заряда, движущимися под действием внешнего электрического поля в пьезоэлектрическом полупроводнике, определяется, согласно линейной теории [1, 2], следующим выражением (одномерный случай):

$$\alpha_{\text{ЭЛ}} = \alpha_0 \frac{\gamma \omega r_M}{(1 + \omega^2 r_L^2)^2 + \gamma^2 \omega^2 r_M^2}, \quad (1)$$

где

$$\alpha_0 = 4,34 \frac{4\pi\beta^2}{\epsilon\rho v_{\text{ЗВ}}^2} \frac{\omega}{v_{\text{ЗВ}}} = 8,68 \frac{k^2}{2} \frac{\omega}{v_{\text{ЗВ}}} (\text{дБ/см}),$$

β – эффективный пьезоэлектрический коэффициент в направлении распространения, ϵ – диэлектрическая постоянная, $r_M = \epsilon/4\pi\sigma$ – максвелловское время релаксации, σ – проводимость, ρ – плотность, $r_L = R_3/v_{\text{ЗВ}}$, R_3 – радиус экранирования, $v_{\text{ЗВ}}$ – скорость звука, ω – частота звука, $\gamma = 1 - (v_{\text{др}}/v_{\text{ЗВ}})$, $v_{\text{др}}$ – дрейфовая скорость, K – коэффициент электромеханической связи.

Из (1) видно, что при $v_{\text{др}} > v_{\text{ЗВ}}$ поглощение звука сменяется усилением. В CdS, CdSe, GaAs и других материалах подвижность $\mu \sim 10^2 - 10 \text{ см}^2/\text{в.сек}$ и пороговое поле $E \sim 10^2 - 10^3 \text{ в/см}$. В n -InSb с концентрацией электронов $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu \approx 6 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в.сек}$ (при $T = 78^\circ\text{K}$), и поэтому уже в поле $E = 0,5 \text{ в/см}$ должно иметь место усиление звука. Однако из-за малой величины коэффициента электромеханической связи ($K^2/2 \sim 7 \cdot 10^{-4}$ у InSb по сравнению с $1,8 \cdot 10^{-2}$ у CdS) $\alpha_{\text{ЭЛ}}$ в n -InSb составляет малую долю решеточного поглощения звука $\alpha_{\text{реш.}}$ и не проявляется.

Помещение образца в поперечное магнитное поле изменяет соотношение $\alpha_{\text{ЭЛ}}$ и $\alpha_{\text{реш.}}$ [3, 4]. В сильном ($(vH/\text{с})^2 >> 1$) поперечном магнитном поле $\sigma \sim \sigma_0 / ((vH/\text{с})^2)$, поэтому величина r_M , а следовательно и $\alpha_{\text{ЭЛ}}$ резко возрастает. Несмотря на несомненный интерес, который представляет этот эффект, прямые экспериментальные наблюдения его нам неизвестны.

Нами исследовалась зависимость $\alpha_{\text{ЭЛ}}$ в n -InSb от электрического и магнитного полей. Для измерений использовалась пьезоэлектрически активная сдвиговая волна, распространяющаяся в направлении

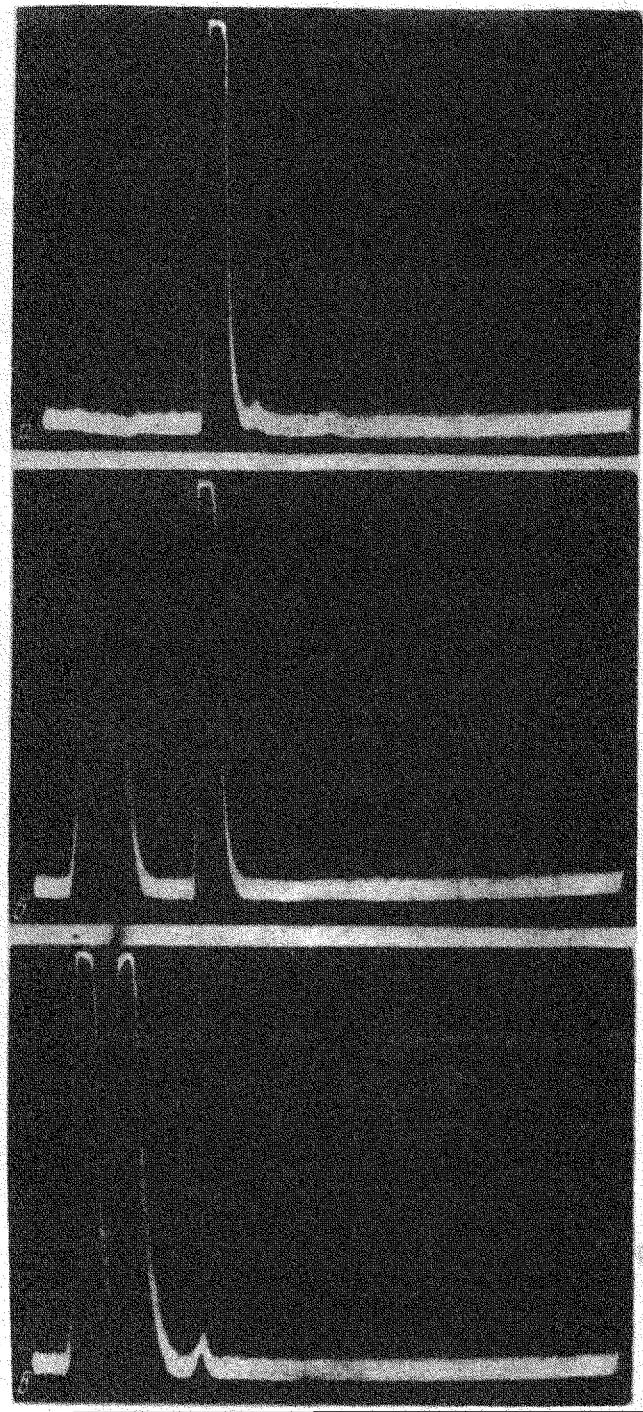


Рис. 1, а – импульсы звука и дрейфового поля ($V = 20 \text{ e}$) полностью разделены во времени, $H = 0$, ослабления звука и усиления шума нет; б – относительное положение импульсов то же, $H = H_{\text{опт}} = 4000 \text{ э}$ видно резкое ослабление импульсов звука и усиление шума в дрейфовом поле; в – $H = H_{\text{опт}} = 4000 \text{ э}$, оптимальное совмещение импульсов во времени. (Импульс постоянной величины, присутствующий на всех снимках – импульс наводки)

[110] с поляризацией вдоль [001] ($v_{3B} = 2,26 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$). Образцы соответствующей ориентации вырезались из монокристаллов n -InSb с $n = 1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $\nu = 6 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с.сек}$ ($T = 78^\circ\text{K}$) в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами $6 \times 6 \times 15 \text{ мм}$. К плоско-параллельным и оптически полированным основаниям образцов приклеивались пьезопреобразователи из ниобата лития. Для возбуждения звука на один из них подавались радиоимпульсы с частотой $f = 400 + 800 \text{ Мгц}$ длительностью около 2 мксек и частотой следования 250 Гц . Импульсы звука после прохождения через образец и обратного преобразования усиливались и детектировались супергетеродинным приемником и наблюдались на экране осциллографа.

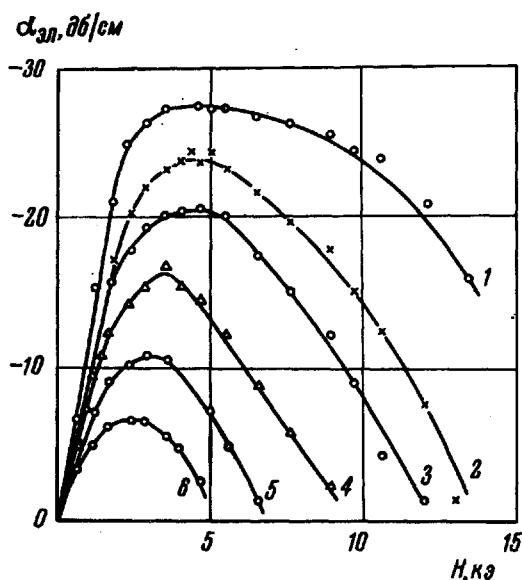


Рис. 2. Зависимость усиления α_{3L} от H при различных V : 1 – $V = 20 \text{ eV}$, 2 – $V = 15 \text{ eV}$, 3 – $V = 13 \text{ eV}$, 4 – $V = 10 \text{ eV}$, 5 – $V = 8 \text{ eV}$, 6 – $V = 6 \text{ eV}$

Импульс дрейфового напряжения с амплитудой V до 20 eV , длительностью 10 мксек и частотой следования 250 Гц прикладывался к образцу в направлении [110].

Генератор радиоимпульсов запускался через цепь регулируемой задержки, так что запаздывание звукового импульса по отношению к дрейфовому могло изменяться.

Напряженность магнитного поля можно было плавно изменять от 600 до 13500 Гц .

Измерения зависимости a_{3d} от H производились в интервале температур 78 – 300°К, зависимость усиления звука от E и H исследовалась при 78°К.

На рис. 1 представлены осцилограммы звукового импульса ($f = 620 \text{ Гц}$), прошедшего через образец в различных условиях. При $H = 4000 \text{ э}$ и $V = 20 \text{ с}$ (рис. 1, а) наблюдается значительное усиление звука (40 дБ).

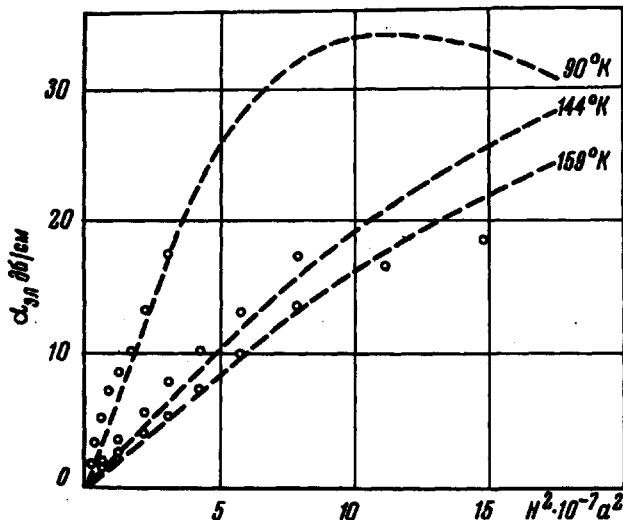


Рис. 3. Зависимость поглощения a_{3d} от H^2 при разных температурах

Результаты измерений зависимости усиления звука от H при различной величине внешнего напряжения приведены на рис. 2 (а измеряется в децибелах по отношению к исходному звуковому сигналу, $f = 620 \text{ Гц}$). Аналогичный вид имеют кривые для $f = 420$ и 520 Гц . Величина максимального усиления изменяется примерно пропорционально частоте.

Для сравнения с формулой (1) эти данные требуют пересчета с учетом зависимости v_{dr} от H .

При $H < 2500 \text{ э}$, когда усиление мало, такой пересчет приводит к удовлетворительному согласию с теорией. При больших H , когда усиление велико, появляются отклонения, причиной которых по-видимому, является обратное влияние усиливаемого сигнала звука на процесс усиления.

Поэтому лучшего согласия с формулой (1) следует ожидать при исследовании зависимости a_{3d} от H^2 в отсутствие дрейфового поля.

Кривые $\alpha_{3\text{л}}(H^2)$ для ряда температур, соответствующих области примесной проводимости, приведены на рис. 3. Видно, что пунктирные кривые, вычисленные с использованием значения $K^2 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ удовлетворительно согласуются с опытом.

Авторы благодарят А.М.Дьяконова за большую помощь в работе и В.Л.Гуревича за полезные обсуждения.

Институт полупроводников
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
26 июля 1968 г.

Литература

- [1] D. L. White. J. Appl. Phys., 33, 2547, 1962.
- [2] В.Л.Гуревич. ФТТ, 4, 909, 1962.
- [3] Р.Ф.Казаринов, В.Г.Скобов. ЖТФ, 43, 1496, 1962.
- [4] M. C. Steele. RCA Review, 28, № 1, 58, 1967.