

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ФОТОТОКА В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ АБСОЛЮТНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ В КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*А.С.Александров, Е.А.Быковский, В.Ф.Елесин
Е.А.Протасов, А.Г.Родионов*

1. Ранее [1] одним из авторов было показано, что в полупроводнике, освещаемом монохроматическим светом, при наличии квантующего магнитного поля возможен эффект абсолютной отрицательной проводимости (АОП).

Было отмечено, что условия осуществления АОП

$$\tau_e < \tau_{\sigma k}, \tau_{ee}, \tau_{eh} \tag{1}$$

выполняются в чистом антимониде индия р-типа (здесь τ_e — время жизни электрона в зоне проводимости; τ_{ee} , τ_{eh} , $\tau_{\sigma k}$ — времена релаксации энергии при столкновении с электронами, дырками и акустическими фононами). В этих условиях фотоэлектроны локализованы по энергии вблизи энергии ω , с которой они родились в зоне проводимости. Величина АОП периодически меняется с ω , и достигает максимума каждый раз, когда энергия фотоэлектронов совпадает с уровнем Ландау. Если энергия фотоэлектрона становится больше энергии оптического фонона ω_0 , то происходит быстрый сброс фотоэлектрона с испусканием оптического фонона и серия повторяется. Число максимумов в серии равно

$$N_s = \begin{cases} \left[\frac{\omega_0}{\Omega} \right] + \left[\frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{g}{2} \frac{m}{m_0} \right] + 2, & \omega_0 > \frac{g}{2} \frac{m}{m_0} \Omega \\ 1, & \omega_0 \leq \frac{g}{2} \frac{m}{m_0} \Omega \end{cases} \tag{2}$$

Условия максимумов величины АОП, с учетом спинового расщепления уровней Ландау, имеет вид

$$\omega - \left[\frac{\omega - (1/2 - gm/4m_0) \Omega}{\omega_0} \right] \omega_0 = \Omega \left(N + \frac{1}{2} \pm \frac{g}{4} \frac{m}{m_0} \right),$$

$$0 \leq N \leq [\omega_0/\Omega],$$

g — фактор спинового расщепления, m_0 — масса свободного электрона, $[x]$ — целая часть числа, $\Omega = eH/mc$.

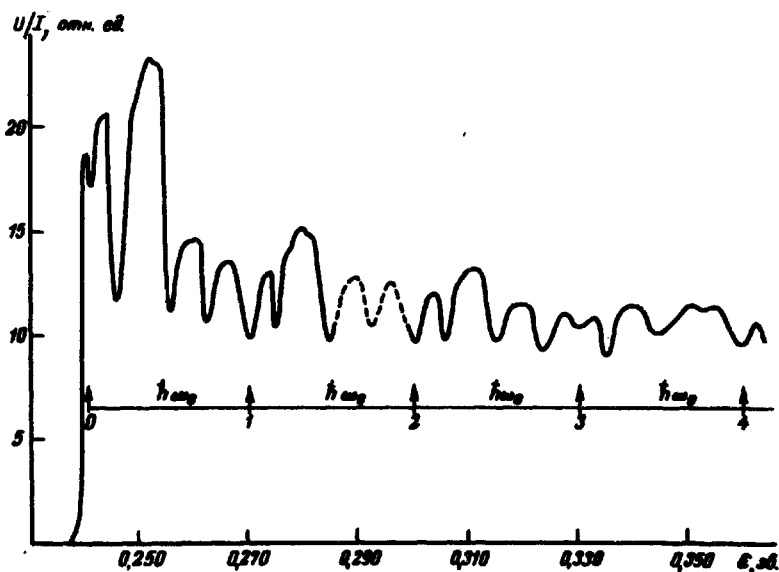


Рис. 1. Спектральная зависимость фототока для образца №1 ($T = 4,2^\circ\text{K}$, $H = 15 \text{ кэ}$). По оси ординат отложен сигнал ФП рассчитанный на единицу потока фотонов, по оси абсцисс — энергия фотонов в электронвольтах

2. В настоящей работе экспериментально исследовался спектр фототока в сильном магнитном поле при гелиевых температурах в чистом p -InSb, где условия АОП (1) для электронов выполнены. Образцы с концентрациями дырок $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (№1), $1,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (№2) и $9,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (№3) размерами $10 \cdot 0,5 \cdot 2 \text{ мм}^3$ травилась в СР-4 и помещались непосредственно в жидкий гелий. Магнитное поле, создаваемое сверхпроводящим магнитом, было приложено перпендикулярно току и падающему излучению. В качестве источника монохроматического излучения использовался ИКС-21. Измерения проводились в режиме постоянного электрического поля напряженностью $0,1 \text{ в/см}$. Сигнал фотопроводимости измерялся узкополосным резонансным усилителем с синхронным детектором и записывался на самописец.

На рис. 1 приведена спектральная зависимость поперечного фототока для образца №1 в магнитном поле $H = 15 \text{ кэ}$. (Аналогичная зависимость получена для образца №2). Характерной особенностью является осциллирующий характер спектральной зависимости, причем видны серии с периодом, равным ω_0 .

Положение минимумов в 1-й серии совпадает с максимумами коэффициента поглощения [2]. На рис. 2 показана зависимость положений минимумов фототока от магнитного поля. Минимумы серии имеют различную скорость смещения с магнитным полем. Расстояние между минимумами разных серий близко к энергии оптического фонона.

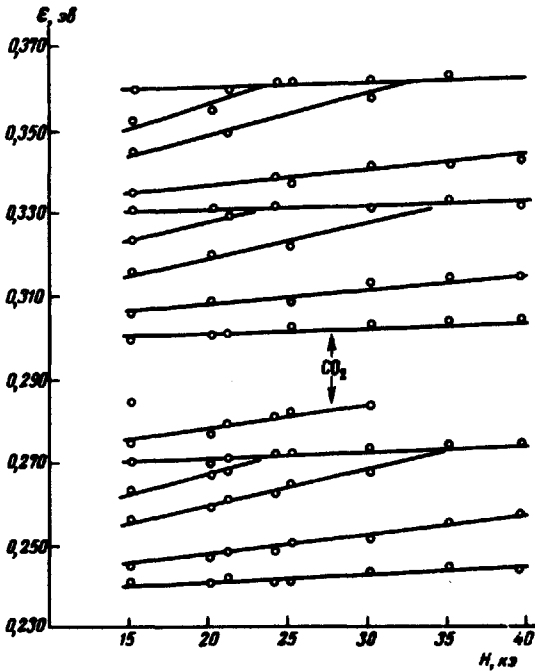


Рис. 2. Зависимость положений минимумов фототока от магнитного поля для образца №1

На образце №3 осцилляции фототока не наблюдались. Следует также отметить, что измерения проводились на толстых образцах, толщина которых значительно превосходила диффузионную длину и длину поглощения. Специальные измерения показали, что спектральный пик фотопроводимости, обусловленный поверхностной рекомбинацией [3], отсутствует. Поэтому можно считать, что осцилляции фототока не связаны с осцилляциями коэффициента поглощения.

3. Приведенная ниже аргументация показывает, что наблюдаемые осцилляции фототока, обусловлены, по-видимому, АОП электронов в зоне проводимости.

Прежде всего следует учесть, что полный фототок складывается из электронной и дырочной компоненты

$$I(\omega) = I_e(\omega) + I_h.$$

В p - InSb неравновесные дырки успевают термализоваться, так что обусловленный ими ток положителен и не зависит от ω . Если учесть, что время жизни дырок в p - InSb значительно превосходит τ_e [4], то ясно, что $I_h > |I_e(\omega)|$, и полный фототок положителен. В этой ситуации максимумы величины АОП электронов проявляются как минимумы полного фототока. Мы полагаем, что именно с этим связан осциллирующий характер спектральной зависимости фототока, (см. рис. 1), вполне согласующийся с теоретическими представлениями, изложенными в п. 1. Сравнение числа минимумов в периоде по формуле (2), а также скорости смещения минимумов по (3) с экспериментальными значениями обнаруживают хорошее совпадение.

Отсутствие осцилляций на более легированных образцах, по-видимому, связано с нарушением условия (1) и подтверждает нашу точку зрения.

4. Полученные результаты позволяют указать способ достижения полной АОП. Для этого следует использовать примесную фотопроводимость в p -InSb, чтобы избавиться от термализованных неравновесных дырок.

Авторы благодарят М.Ю.Лазарева за помощь в проведении ряда экспериментов.

Московский
инженерно-физический
институт

Поступила в редакцию
3 июня 1970 г.

Литература

- [1] Б.Ф.Елесин. Письма в ЖЭТФ, 7, 229, 1968; ЖЭТФ, 55, 792, 1968.
 - [2] S.Zwerdling, W.H.Kleiner, I.P.Theriault. J. Appl. Phys., 32, 10, 1961.
 - [3] Р.Смит. Полупроводники, ИИЛ, М., 1962.
 - [4] R.Laff. H.Y.Fan. Phys. Rev., 121, 53, 1961.
-