

СДВИГОВЫЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ТОК В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

В.Г.Лазарев, В.М.Фридкин, А.Л.Шленский

Впервые экспериментально обнаружена сдвиговая составляющая объемного фотовольтаического тока путем измерения его холловской компоненты в магнитном поле. Измерена температурная и спектральная зависимость подвижности нетермализованных электронов в пьезоэлектрическом полупроводнике $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Объемный фотовольтаический (фотогальванический) ток ¹, наблюдающийся при равномерном освещении однородного кристалла без центра симметрии имеет вид ^{2,3}:

$$J_i = \alpha_{ijk} E_j E_k^* + i\gamma_{ij} (\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)_j. \quad (1)$$

Здесь E_j, E_k – компоненты электрического поля световой волны, $i(\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)_j$ определяет степень циркулярной поляризации света σ согласно соотношению:

$$i(\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)_j = \sigma \frac{q}{|q|} I, \quad (2)$$

где q – волновой вектор фотона, I – интенсивность света. Первый член в правой части (1) описывает объемный фотовольтаический ток для линейно-поляризованного света (линейный объемный фотовольтаический ток (ОФТ) J_i^l), второй член – циркулярный ОФТ J_i^c . Тензоры α_{ijk} и γ_{ij} отличны от нуля соответственно для пьезоэлектрических и оптически активных кристаллов. В магнитном поле \mathbf{B} линейный и циркулярный ОФТ выражается соответственно через тензоры S_{ijk} и Q_{ijk} :

$$J_i^B = S_{ijk} B_j E_k E_l^* + iQ_{ijk} B_j (\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)_k. \quad (3)$$

В пьезоэлектрических кристаллах германата висмута (группа симметрии 23) отличны от нуля следующие компоненты тензоров линейного и циркулярного ОФТ: $\alpha_{14}; \gamma_{33}; S_{331} = -S_{332} = S_1, S_{313} = -S_{332} = S_2; Q_{312} = Q_{321} = Q$. Поэтому уравнения (1) и (3) для $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

имеют вид

$$J_z = \frac{1}{2} \alpha_{14} I \sin 2\beta + \gamma_{33} I \sigma, \quad (1')$$

$$J_x^{By} = \frac{1}{2} S_2 I B_y \sin 2\beta + Q I B_y \sigma. \quad (3')$$

Оси z , x и y совпадают с осями 2 , z — направление освещения кристалла, β — угол между плоскостью поляризации света и осью x , B_y — напряженность магнитного поля, направленного по оси y . В пренебрежении магнитоиндуцированными эффектами ток J_x^{By} является холловской компонентой тока J_z^I , причем из (1) и (3) может быть определена подвижность нетермализованных носителей

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{J_x^{By}}{J_z}. \quad (4)$$

Определенная таким образом подвижность (4) принципиально отличается от обычной (термализованной) холловской подвижности, так как вклад в ОФТ дают только нетермализованные носители.

В основе линейного ОФТ в нецентросимметричном кристалле лежат два микроскопических механизма. Первый, баллистический, связан с асимметрией распределения нетермализованных электронов в зоне по импульсу^{2, 3}. Второй, сдвиговый, связан со сдвигом центра тяжести волнового пакета электронов при их фотовозбуждении⁷⁻¹⁰. При собственном возбуждении эти механизмы дают близкие значения тока, и линейный ОФТ является суммой баллистического и сдвигового ОФТ. Для разделения сдвиговой и баллистической составляющих ОФТ могут быть использованы следующие их особенности. Во-первых, циркулярный ОФТ является чисто баллистическим¹⁰. Во-вторых, сдвиговый ток в магнитном поле не дает вклада в холловскую компоненту (в пренебрежении магнитоиндуцированными эффектами). В-третьих, есть основания предполагать, что примесный ОФТ является преимущественно баллистическим¹⁰.

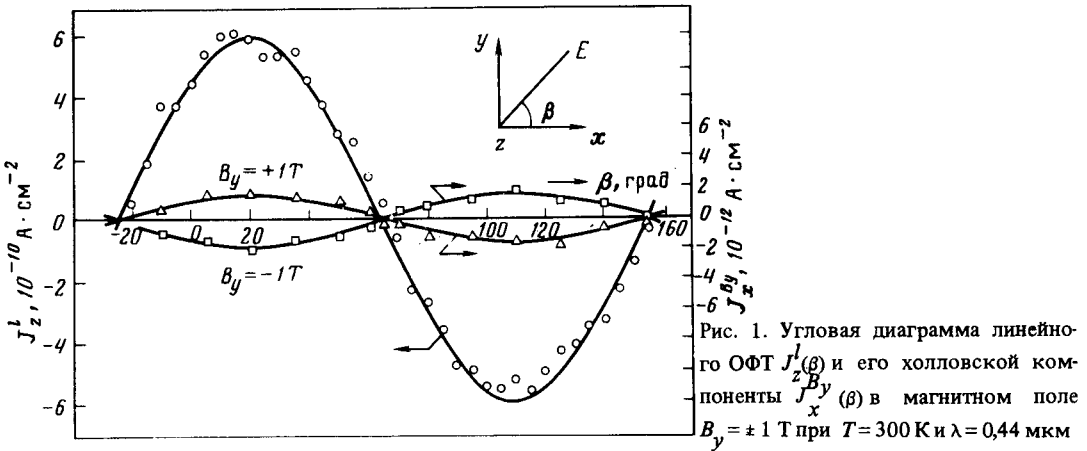


Рис. 1. Угловая диаграмма линейного ОФТ $J_z^I(\beta)$ и его холловской компоненты $J_x^{By}(\beta)$ в магнитном поле $B_y = \pm 1$ Т при $T = 300$ К и $\lambda = 0,44$ мкм

В настоящей работе была предпринята попытка разделения баллистического и сдвигового механизмов ОФТ в пьезоэлектрических кристаллах германата висмута. С этой целью измерялись линейный J_z^I и циркулярный J_z^c ОФТ и их холловская компонента в магнитном поле в области собственного и примесного поглощения. Применялась модуляционная методика измерения ОФТ и его холловской компоненты в магнитном поле $B_y \lesssim 1$ Т⁶. В качестве источников света использовались He — Cd-лазер ($\lambda = 0,44$ мкм) и линии Ag-лазера.

На рис. 1 представлены угловые диаграммы линейного ОФТ J_z^I и его холловской компоненты J_x^{By} , снятые при $T = 300$ К и $\lambda = 0,44$ мкм и согласующиеся с (1) и (3) для $\alpha_{14} =$

$= 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{см} \cdot (\text{Вт})^{-1}$. Из измерений циркулярного ОФТ J_z^l в тех же условиях определена компонента $\gamma_{33} = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{см} \cdot (\text{Вт})^{-1}$. Значения α_{14} и γ_{33} согласуются с ранее выполненными измерениями¹¹.

На рис. 2 представлены температурные зависимости линейного J_z^l и циркулярного J_z^c ОФТ, а также подвижностей μ_l и μ_c , вычисленных согласно (4) соответственно для линейного и циркулярного ОФТ. Из рис. 2 видно, что J_z^c и μ_c слабо изменяются с температурой. Напротив, линейный ОФТ J_z^l и μ_l сильно зависят от температуры, причем μ_l и μ_c имеют противоположные знаки во всем интервале температур, а J_z^l изменяет знак при азотной температуре. Носителями ОФТ J_z^c являются электроны, что согласуется с данными фототранзитных измерений в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

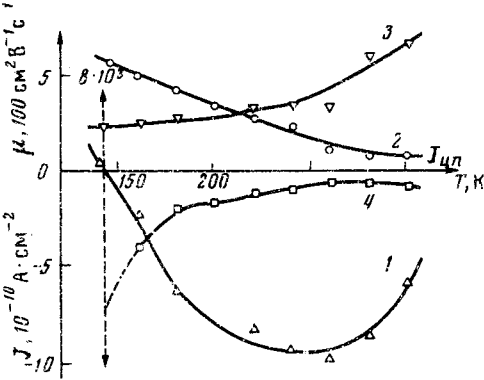


Рис. 2

Рис. 2. Температурные зависимости линейного J_z^l (1) и циркулярного J_z^c (2) ОФТ, а также подвижностей μ_c (3) и μ_l (4); $\lambda = 0,44 \text{ мкм}$

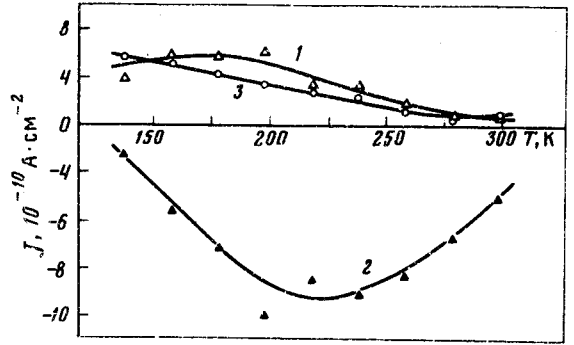


Рис. 3

Рис. 3. Температурные зависимости баллистической (1) и сдвиговой (2) составляющих линейного ОФТ, а также температурной зависимости циркулярного ОФТ (3); $\lambda = 0,44 \text{ мкм}$

Представленные на рис. 2 результаты позволяют разделить баллистическую и сдвиговую составляющие линейного ОФТ. Полагая циркулярный ток баллистическим $J_z^c \equiv J_{bal}^c$, линейный ток J_z^l суммой баллистической J_{bal}^l и сдвиговой J_{sh}^l составляющих и, имея в виду, что холловская компонента линейного ОФТ обусловлена его баллистической составляющей, запишем выражения для подвижностей μ_c и μ_l :

$$\mu_c = \frac{1}{B} \frac{J_{x,c}^{By}}{J_z^c} \equiv \frac{1}{B} \frac{J_{x,l}^{By}}{J_{z,bal}^l}, \quad (5)$$

$$\mu_l = \frac{1}{B} \frac{J_{x,l}^{By}}{J_z^l}, \quad (6)$$

$$J_z^l = J_{z,bal}^l + J_{z,sh}^l. \quad (7)$$

Отсюда получаем выражения для сдвиговой $J_{z,sh}^l$ и баллистической $J_{z,bal}^l$ составляющих линейного ОФТ:

$$J_{z,bal}^l = \frac{1}{B} \frac{J_{x,l}^{By}}{\mu_c}, \quad (8)$$

$$J_{z,sh}^l = J_z^l - \frac{1}{B} \frac{J_{x,l}^{By}}{\mu_c}, \quad (9)$$

Подставляя в (8) и (9) экспериментально измеренные значения J_z^I (кривая 1, рис. 2), холловской компоненты линейного ОФТ $J_{x,l}^{By}$ и подвижности μ_c (кривая 3, рис. 2) получаем баллистическую и сдвиговую составляющие линейного ОФТ. Их температурные зависимости представлены на рис. 3 (кривые 1 и 2). Во всем температурном интервале J_{bal}^I и J_{sh}^I имеют противоположное направление. Изменение знака линейного ОФТ (кривая 1, рис. 2) связано, таким образом, с преобладанием баллистической компоненты при низких температурах. Различие в знаке, величине и температурной зависимости μ_c и μ_l связано со сдвиговой компонентой линейного ОФТ и ее температурной зависимостью. При $T = 300$ К подвижность нетермализованных электронов $\mu \cong 600 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Заметим, что термализованная подвижность в германате висмута по данным фототранзитных измерений $\mu \ll 1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Спектральные измерения показали, что при переходе от собственного поглощения к примесному ($\lambda \cong 0,51 \text{ мкм}$) сдвиговая составляющая линейного ОФТ резко уменьшается. Соответственно в примесной полосе μ_c и μ_l совпадают по знаку и близки по величине.

Авторы благодарны Е.Л.Ивченко за обсуждение.

Литература

1. Фридкин В.М., Попов Б.Н. УФН, 1978, 126, 657.
2. Белиничер В.И., Стурман Б.И. УФН, 1980, 23, 199.
3. Ивченко Е.Л., Пикус Г.Е. Сб. Проблемы современной физики, М.: Наука, 1980, с. 275.
4. Фридкин В.М., Попов Б.Н. Докл. АН СССР, 1980, 256, 63.
5. Леванюк А.П., Погосян А.Р., Уюкин Е.М. Докл. АН СССР, 1980, 256, 60.
6. Фридкин В.М., Лазарев В.Г., Шленский А.Л. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 153.
7. Кристофель Н., Гулбис А. Изв. АН ЭССР, 1979, 28, 268.
8. Krant W., von Baltz R. Phys. Lett., 1980, A 79, 364.
9. Буршан Э.В., Гиришберг Я.Г., Трунов Н.Н. Изв. высш. уч. зав., серия физическая, 1981, 24, 94.
10. Белиничер В.И., Ивченко Е.Л., Стурман Б.И. ЖЭТФ, 1982, 83, 649.
11. Петров М.П., Грачев А.И. ФТТ, 1980, 22, 1671.