

© 1993

ЛИНЕЙНЫЙ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В p -GaSb В ИК И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

*Е. В. Берегулин, С. Д. Ганичев, К. Ю. Глух,
Ю. Б. Лянда-Геллер, И. Д. Ярощцкий*

Излагаются результаты экспериментального исследования линейного фотогальванического эффекта в кристаллах p -GaSb.

Линейный фотогальванический эффект (ЛФГЭ) возникает в однородных кристаллах при равномерном освещении и обусловлен анизотропией процессов фотовозбуждения, рассеяния и рекомбинации в кристаллах без центра инверсии. В полупроводниках этот эффект широко изучался в инфракрасном (ИК) [1] и субмиллиметровом диапазоне [2-4]. Настоящая работа посвящена обнаружению и исследованию этого эффекта в кристаллах p -GaSb при возбуждении светом в широком диапазоне частот (9—400 мкм). Результаты исследований позволяют сделать выводы об общих закономерностях ЛФГЭ в субмиллиметровом диапазоне в кристаллах A_3B_5 .

Методика эксперимента и результаты

Эксперименты проводились на кристаллах p -GaSb с концентрацией носителей $p = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне температур 78—300 К. В качестве источника излучения использовался импульсный CO_2 лазер и NH_3 лазер с оптической накачкой. Длина волны линейно-поляризованного света составляла 9.2, 90.5, 152 и 385 мкм. Изучалась зависимость фотоэдс и коэффициента поглощения от температуры и длины волны излучения. Свет падал на образец, который представлял собой плоскопараллельную пластинку, вырезанную вдоль кристаллографического направления [111]. На торцах образца были расположены два электрических омических контакта. Фототок измерялся вдоль направления [112].

Обнаруженный при возбуждении светом всех длин волн сигнал эдс повторял форму лазерного импульса с длительностью 40 нс. При повороте плоскости поляризации излучения вокруг направления [111] наблюдаемая эдс зависела от угла θ между вектором поляризации и направлением [112] как $\cos 2\theta$ (рис. 1). Поворот образца вокруг [112] на 180° при неизменном направлении распространения излучения не приводит к изменению полярности сигнала.

Такое поведение эдс полностью соответствует феноменологическому выражению для фотогальванического тока в кристаллах симметрии T_d [1], к которым относится GaSb

$$j_a = K |\delta_{\alpha\beta}| e_\beta e_\gamma, \quad (1)$$

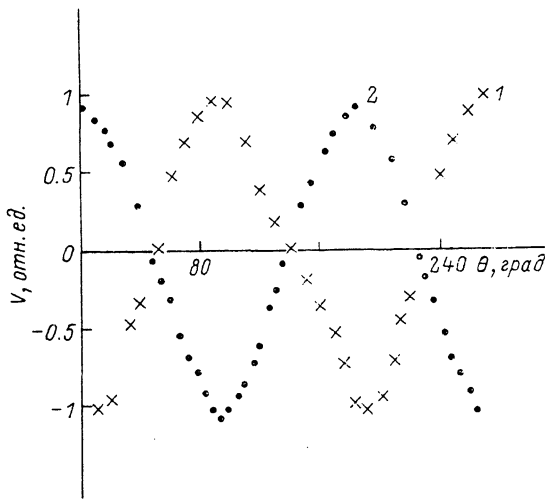


Рис. 1. Зависимость фототока от угла θ между вектором поляризации света и направлением $[11\bar{2}]$ в p -GaAs при $p = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $T = 300$ (1) и 78 К (2).

где j — плотность тока, I — интенсивность световой волны, e — вектор поляризации, $\delta_{ab\gamma}$ — единичный антисимметричный тензор, χ — единственная линейно-независимая компонента тензора ЛФГЭ.

Выражение для фототока в направлении $[11\bar{2}]$ при падении излучения вдоль кристаллографического направления $[111]$ имеет вид

$$j_{[11\bar{2}]} = I \frac{\chi}{\sqrt{6}} \cos 2\theta. \quad (2)$$

Эксперименты показали, что величина константы χ при $T = 300$ К практически не зависит от длины волны в диапазоне длин волн 90—400 мкм и уменьшается при меньших длинах волн (рис. 2). Наблюдаемая эдс зависела от температуры и при увеличении температуры изменяла знак (рис. 3). Аналогичное поведение эффекта наблюдалось нами в p -GaAs [2, 3].

Экспериментально определенный коэффициент поглощения света в p -GaSb для $p = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300$ К на длине волны 9.2 мкм составил $\sim 170 \text{ см}^{-1}$, а в области длин волн более 90 мкм был равен $\sim 240 \text{ см}^{-1}$ и не зависел от длины волны.

Обсуждение результатов

Механизм формирования ЛФГЭ и поглощения излучения в полупроводниках A_3B_5 p -типа в ИК и субмиллиметровом диапазонах при температуре, когда примеси ионизованы, может определяться как прямыми оптическими переходами между ветвями тяжелых и легких дырок вырожденной валентной зоны, так и непрямыми оптическими переходами.

В ИК диапазоне ($\lambda \sim 9$ мкм), где величина поглощения при прямых переходах существенно (на два порядка) больше поглощения при не прямых переходах, фототок связан с прямыми оптическими переходами между подзоной тяжелых и легких дырок.

С увеличением длины волны коэффициент поглощения света при прямых переходах значительно падает, а коэффициент поглощения на не прямых переходах растет. Эксперименты по температурной и

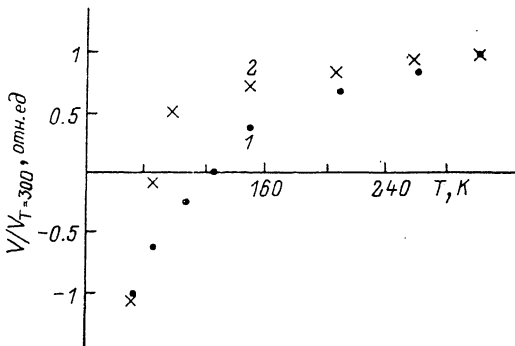
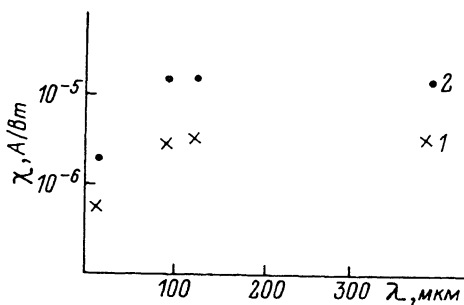


Рис. 2. Зависимость фототока p -GaAs при $p = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ от температуры для длин волн $\lambda = 9$ (1) и 90.5 мкм (2).

Рис. 3. Зависимость константы χ ($T = 300$ К, $p = 1.2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$) от длины волны в p -GaAs (1) и p -GaSb (2).



частотной зависимости показывают, что в p -GaSb при $T = 300$ К, как и в p -GaAs [2, 3], при длине волны 90 мкм и более поглощение связано в основном с прямыми переходами с участием полярных оптических фононов и не зависит от длины волны. Отсутствие зависимости от длины волны коэффициента поглощения соответствует классической формуле Друде при реализуемом в эксперименте условии $\hbar\omega \ll kT$, $\omega\tau \ll 1$, где τ — время релаксации импульса. При этом соотношение между абсолютными значениями величин поглощения в GaSb и в GaAs для $\lambda > 90$ мкм удовлетворительно описывается формулой для непрямых переходов с участием оптических фононов ($\hbar\omega_L = 29$ мэВ для GaSb и $\hbar\omega_L = 36$ мэВ для GaAs) в пределах подзоны тяжелых дырок [2].

Наблюдаемое в эксперименте отсутствие спектральной зависимости при $\lambda > 90$ мкм как коэффициента поглощения, так и константы χ позволяет сделать вывод, что непрямые переходы играют основную роль в формировании ЛФГЭ.

Таким образом, в p -GaSb, как и в p -GaAs [2-4], ответственными за величину ФГЭ являются те же оптические переходы, которые определяют коэффициент поглощения света. Подробное рассмотрение механизмов образования фототока для такого случая было проведено ранее в ИК области в [1], а в субмиллиметровой области спектра — в [2-4].

Наблюдаемый в эксперименте рост χ при переходе от $\lambda \sim 9$ мкм к $\lambda > 90$ мкм при близких величинах коэффициента поглощения обусловлен увеличением роли асимметричного рассеяния на ионизованных примесях в связи с понижением энергии ϵ_i состояний, участвующих в образовании фототока, и исчезновением процессов испускания оптических фононов ($\epsilon_i < \hbar\omega_0$).

Температурная зависимость как в GaSb (рис. 2), так и в GaAs [2, 3] указывает на смену механизма ЛФГЭ при переходе от $T = 300$ К к $T = 77$ К. Изменение величины эффекта при $T \ll 300$ К связано с температурной зависимостью числа фононов, которое определяет в значительной степени механизмы как фотовозбуждения, так и релаксации фотоносителей. С понижением температуры происходит вымораживание носителей на примесь и становятся существенными переходы с примесного уровня в зону. Это приводит к фототоку, связанному с этими переходами, и соответственно к смене направления полного тока.

В заключение отметим, что наблюдаемые в p -GaSb в сравнении с p -GaAs существенно большие величины константы χ (рис. 2) позволяют использовать этот материал в быстродействующих измерителях поляризации ИК—СБММ излучения [5] с целью повышения чувствительности.

Один из авторов (С. Д. Г.) благодарит фонд А. фон Гумбольдта за поддержку в работе.

Список литературы

- [1] Андрианов А. В., Ивченко Е. Л., Пикус Г. Е., Расулов Р. Я., Ярошецкий И. Д. // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. С. 2080.
- [2] Берегулин Е. В., Ганичев С. Д., Глух К. Ю., Лянда-Геллер Ю. Б., Ярошецкий И. Д. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 2. С. 730.

- [3] Beregulin E. V., Ganichev S. D., Glookh K. Yu., Lyanda-Geller Yu. B., Yaroshetskii I. D. // Crystal Properties Preparation. 1989. V. 19. P. 327.
- [4] Берегулин Е. В., Ганичев С. Д., Глух К. Ю., Лянда-Геллер Ю. Б., Ярошецкий И. Д. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 1. С. 115.
- [5] Андрианов А. В., Берегулин Е. В., Ганичев С. Д., Глух К. Ю., Ярошецкий И. Д. // Письма в ЖТФ. 1988. С. 1326.

Поступило в Редакцию
29 сентября 1992 г.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург
