

ИНВЕРСИЯ ЗНАКА "ЛИНЕЙНОГО" ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО
ЭФФЕКТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.В. Андрианов, П.М. Валов, И.Д. Яроцкий

Обнаружена температурная и концентрационная инверсия знака фотогальванического эффекта (ФГЭ) в полупроводниках. Температурная инверсия связана со сменой механизма ФГЭ с внутризонного на примесный. Концентрационная инверсия обусловлена делокализацией примесных состояний.

В однородных кристаллах без центра инверсии при однородном возбуждении наблюдается ФГЭ обусловленный асимметрией в импульсном распределении фотовозбужденных носителей тока [1 – 8]. Величина и характер ФГЭ должны существенно зависеть от типа оптических переходов, приводящих к его образованию. Однако, в настоящее время теория не в состоянии однозначно ответить на вопрос о свойствах фотогальванического тензора D_{ike} для различных возможных механизмов образования ФГЭ. Экспериментальная же ситуация чрезвычайно запутана, поскольку в одном классе кристаллов, где наблюдается ФГЭ – сегнетоэлектриках, механизм его образования до сих пор недостаточно ясен, а объяснения "линейного" ФГЭ в полупроводниках [1, 3, 4], основанные на аналогии с dc -эффектом, являются не корректными. В этих условиях особое значение приобретают эксперименты, позволяющие наблюдать новые проявления ФГЭ, а также однозначно идентифицировать механизмы, обуславливающие образование ФГЭ в полупроводниках. В настоящей работе сообщается о первом наблюдении температурной и концентраци-

онной инверсии знака "линейного" ФГЭ в полупроводниках, в частности, в дырочном GaAs с примесью Zn ($E_v + 30$ мэВ). В экспериментах использовался импульсный CO₂-лазер ($\lambda = 10,6$ мкм и $\lambda = 9,5$ мкм) с мощностью ~ 6 кВт и длительностью импульса $\sim 1,5 \cdot 10^{-7}$ сек. Излучение падало на образец по направлению [110], а поле ФГЭ E наблюдалось в направлении [110]. В этом случае $E = ID \sin 2\theta$, где I - интенсивность света, D - значение тензора D_{ike} в кристалле GaAs, θ - угол между вектором поляризации световой волны и направлением [001]. Измеряемая фотоэдс линейным образом зависит от интенсивности света, полностью повторяет форму лазерного импульса и зависит от поляризации (рис.1) в соответствии с приведенным выше выражением. Исследование ФГЭ проводилось и при других ориентациях, как в продольной, так и в поперечной геометрии, и результаты измерений константы D совпали.

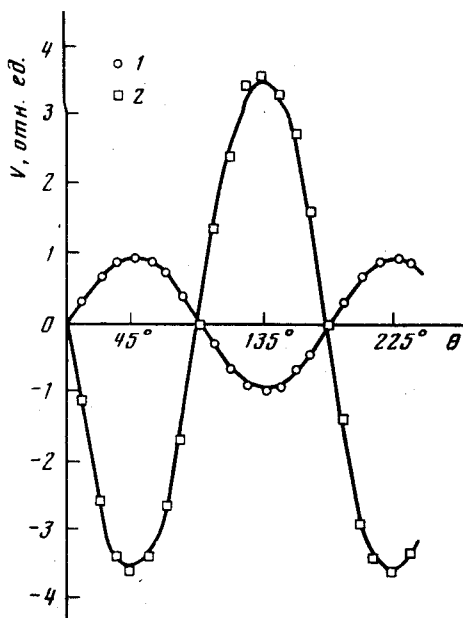


Рис.1. Зависимость ЭДС ФГЭ от угла θ : $\lambda = 10,6$ мкм, $p = 2,3 \cdot 10^{16}$ см⁻³:
1 - $T = 300$ К, 2 - $T = 77,3$ К

Обнаружено, что в p-GaAs (Zn) с концентрацией дырок $5,2 \cdot 10^{15}$ см⁻³ $\div 4,3 \cdot 10^{17}$ см⁻³ имеет место температурная инверсия знака "линейного" ФГЭ и возрастание его величины при изменении температуры от 300 до 77,3 К (рис.1). При концентрации дырок $p \geq 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³ ФГЭ не меняет своего знака при изменении температуры. Совместное измерение температурного хода коэффициента Холла, проводимости и фотогальванического эффекта показало, что ФГЭ меняет знак только в тех образцах, в которых при охлаждении происходит вымораживание носителей на примесный уровень цинка (рис.2). При комнатной температуре константа D практически не зависит от концентрации носителей тока (рис.3), тогда как константа $D^* = D\sigma$, где σ - проводимость образца, определяющая величину фотогальванического тока, линейно зависит от концентрации носителей. Этот факт свидетельствует о том, что при 300 К механизм ФГЭ не связан с асимметричным рассеянием фотовозбужденных свободных носителей на примесях. Действительно, если бы этот механизм имел место, то фотогальванический ток квадратично зависел бы от концентрации

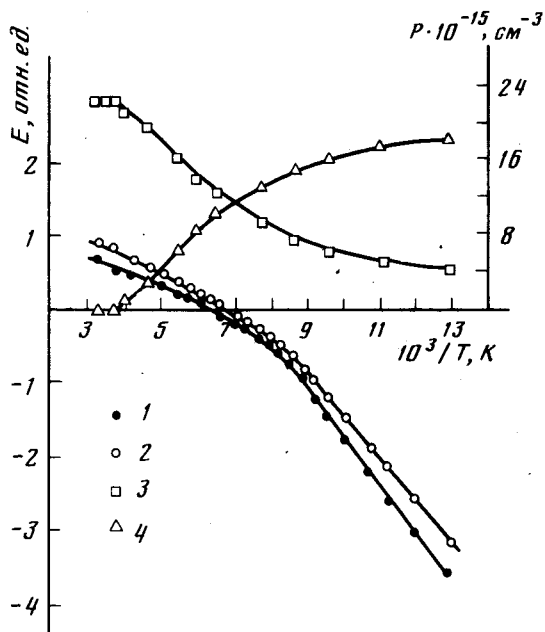


Рис.2. Температурная зависимость поля ФГЭ и концентрации носителей тока. 2, 1 – поле ФГЭ соответственно при $\lambda = 10,6$ мкм и $\lambda = 9,5$ мкм, 3, 4 – концентрации носителей соответственно в зоне и на примесях

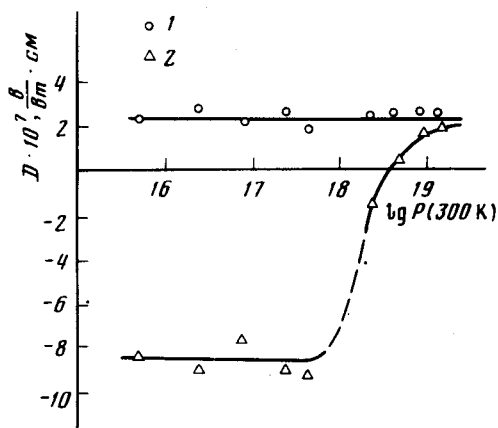


Рис.3. Концентрационная зависимость константы D : 1 – $T = 300$ К, 2 – $77,3$ К

носителей. Причиной ФГЭ в рассматриваемом случае, с учетом наблюдавшегося температурного хода в области высоких температур, является прямой оптический переход между подзонами тяжелых и легких дырок с асимметричным рассеянием на колебаниях решетки. Смена знака ФГЭ при уменьшении температуры связана со сменой механизма эффекта. При низких температурах ФГЭ обусловлен фотоионизацией локальных примесных состояний. В пользу этого свидетельствует корреляция знака эффекта с изменением концентрации носителей тока при переходе от 300 к 77,3 К, а так же наличие при 77,3 К положительной фотопроводимости $\frac{1}{l} \frac{\Delta \sigma}{\sigma} \sim 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{кВт}$. При 77,3 К в широком интервале концентраций константа D остается постоянной (рис.3), потом сравнительно резко уменьшается, а затем, что особенно интересно, меняет знак. Смена знака связана с исчезновением ФГЭ, обусловленного оптическими переходами из локализованных примесных состояний в валентную зону. Причиной этого является делокализация примесных состояний,

происходящая при высокой концентрации примесей [9]. Об этом свидетельствуют результаты исследования температурной зависимости проводимости и коэффициента Холла, показавшие, что переход металл – изолятор в p -GaAs (Zn) наступает при концентрациях $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, т.е. как раз в области сильного падения величины $\Phi_{ГЭ}$. В соответствии с теорией [10], при $p \geq 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в p -GaAs (Zn) происходит перекрытие примесной и валентной зон, что, по-видимому, и обуславливает слабое изменение величины $\Phi_{ГЭ}$ при переходе от 300 к 77,3 К в этой области концентраций. Приведенные выше результаты позволяют заключить, что примесный $\Phi_{ГЭ}$ связан не только с искажением волновой функции конечного состояния поля примесного центра [5, 6, 8], но в большей степени определяется анизотропией волновой функции начального состояния.

В заключение отметим, что нами наблюдался $\Phi_{ГЭ}$ в n -GaAs. При 300 К и концентрации электронов $\sim 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ константа D составляет $\sim 5 \cdot 10^{-9} \text{ В} \cdot \text{см/ВТ}$. При понижении температуры до 77,3 К эффект меняет знак и падает в два раза.

Авторы выражают благодарность Е.Л.Ивченко, Г.Е.Пикусу, А.Г.Забродскому за полезное обсуждение.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 марта 1980 г.

Литература

- [1] К.Н.Hermann, R.Vogel. Proc. XI Int. Conf. on Phys. of Semicond. 870, Warsaw, 1972.
- [2] A.M.Glass, at all. Appl. Phys. Lett., 25, 233, 1974:
- [3] J.M.Doviak, S.Kothari. Proc. XII Int. Conf. on Phys. of Semicond. 1257. Stuttgart, 1974.
- [4] A.F.Gibson, at all. J. Phys. C., 10, 905, 1977.
- [5] В.И.Белиничер и др. Автометрия, 4, 23, 1976.
- [6] Э.М.Баскин, Л.И.Магарилл, М.В.Энтин. ФТТ, 20, 2432, 1978.
- [7] Е.Л.Ивченко, Г.Е.Пикус. ФТП, 13, 992, 1979.
- [8] В.И.Белиничер, А.Н.Филонов. Автометрия, 1, 46, 1978.
- [9] Н.Ф.Мотт. Переходы металл – изолятор. М., изд. Наука, 1979.
- [10] H.Fakuyama, at all. J. Phys. Soc. Japan, 28, 342, 1970.