

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА НАКОПЛЕНИЯ ЛЕГКИХ ДЫРОК В p -Ge В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ В ДАЛЕКОЙ ИК ОБЛАСТИ

В.И.Гавриленко, В.Н.Мурзин, С.А.Стоклицкий

А.П.Чеботарев

В сильных электрических полях обнаружено возникновение длинноволнового ИК поглощения и излучения в p -Ge. Прямыми оптическими измерениями ($\lambda = 80 - 130$ мкм) показано, что оба явления обусловлены переходами между верхними ветвями валентной зоны Ge. В скрещенных $E \perp H$ полях наблюдался эффект накопления легких дырок, исследована динамика явления.

Согласно теоретическим расчетам функция распределения носителей в p -Ge в сильных $E \perp H$ полях может претерпевать значительные изменения вплоть до образования инверсной населенности дырок в определенной области квазимпульсного пространства [1 – 2]. Эффект увеличения концентрации легких дырок в p -Ge наблюдался в экспериментах по изучению гальваномагнитных характеристик [3, 4] и оптического поглощения образцов в ближней ИК области [5].

В данной работе выполнены прямые оптические исследования p -Ge в наиболее интересном, с точки зрения усиления и генерации, длинноволновом ИК диапазоне ($\lambda = 80 - 130$ мкм). В электрических полях, выше примесных пробойных, обнаружено возникновение неравновесного поглощения и излучения p -Ge в указанном диапазоне. Экспериментально установлено, что оба явления имеют одну природу и обусловлены дырочными 1 – 2 переходами между верхними ветвями валентной зоны Ge.

В скрещенных $E \perp H$ полях наблюдалось увеличение интенсивности дырочного излучения, свидетельствующее о накоплении легких дырок. Изучены динамика и другие особенности этого явления.

Исследовались кристаллы Ge (Ga) ($N_A - N_D = 5 \cdot 10^{13}$ и $4 \cdot 10^{14}$ см⁻³) при $T = 1,5 \div 4,2$ К в скрещенных $E \perp H$ полях $E = 0 \div 1500$ В/см и $H = 0 \div 10$ кЭ. Оптические измерения пропускания и излучения p -Ge проводились с помощью длинноволнового ИК спектрометра (ДИКС) в гелиевом световодном криостате [6] с фотоприемником из Ge (Sb). Спектральный интервал измерений ($\lambda = 80 - 130$ мкм) определялся красной границей фотоприемника и филь-

рами в криостате. Модуляционная импульсная методика позволила устранить побочные эффекты, обусловленные фоновым излучением и пр.

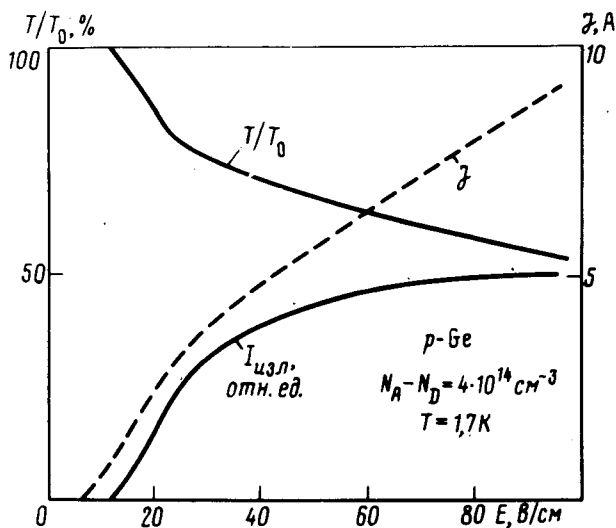


Рис. 1. Интенсивность длинноволнового ИК излучения и изменение пропускания p -Ge, индуцированные электрическим полем, в сопоставлении с вольт-амперной зависимостью

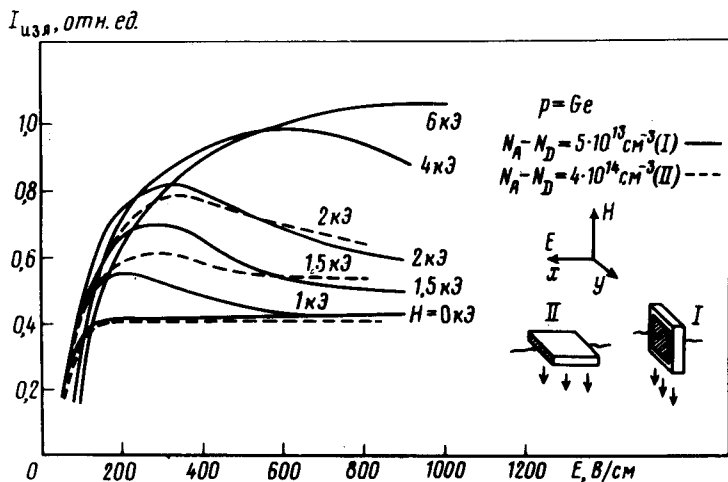


Рис. 2. Динамика изменения интенсивности излучения в скрещенных $E \perp H$ полях. Измерения $I_{изл}$ на разных образцах приведены к одному значению при $H = 0$

В электрических полях наблюдалось возникновение длинноволнового ИК поглощения и излучения p -Ge, обладающих сходными зависимостями от E . Оба эффекта появляются при $E > 2E_0$ (E_0 — поле пробоя примеси), интенсивность поглощения и излучения быстро растет, а затем при $E > 50$ В/см начинает выходить на насыщение (рис. 1). Обнаруженное уменьшение пропускания p -Ge в далекой ИК области не может быть объяснено примесным поглощением (примеси практически полностью ионизированы). Друдевское поглощение свободными носителями в области измерений также оказываются незначительным ($\sigma_{св} \approx 2 \cdot 10^{-16}$ см²)

для $\lambda = 100 \text{ мкм}$, $m_h = 0,33 m_0$). Решеточное поглощение, обусловленное нагреванием кристалла, лежит в стороне от выбранного спектрального диапазона измерений. Наиболее близкие к этой области фоновые спектры Ge являются разностными и поэтому не могут дать ощутимого вклада в поглощение. Прямые измерения показали, что при повышенной частоте следования импульсов, создающих перегрев образца ($T \approx 50 \div 60 \text{ К}$ по [7]), поглощение пропадает, а образцы становятся более прозрачными, чем исходные ($E = 0$). Данные исследований позволяют заключить, что наблюдаемое поглощение обусловлено дырочными 1 – 2 переходами в Ge. Оцененные из эксперимента сечения поглощения $\sigma_{12} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^2$ согласуются с известными в литературе [9] и оказываются заметно выше измеренных в Ge при 70 – 100 К [8]. Длинноволновое ИК излучение в условиях примесного пробоя, как известно, ранее наблюдалось в $n\text{-Ge}^1$, причем связывалось с излучательной рекомбинацией носителей на примесь [10]. Изучение спектрального состава обнаруженного здесь излучения, а также ряд других экспериментальных фактов, в частности, наблюдаемое увеличение интенсивности излучения $I_{\text{изл}} \sim N_{\text{прим}}$, приводят к выводу, что длинноволновое ИК излучение $p\text{-Ge}$ имеет ту же природу, что и поглощение, т.е. обусловлено 1 – 2 дырочными переходами.

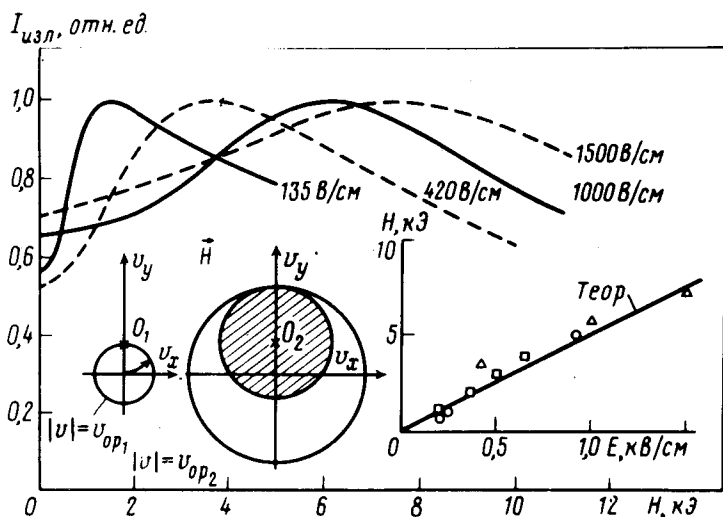


Рис.3. Изменение интенсивности излучения в зависимости от H при различных E . Кривые нормированы в максимуме к единице. Точки на вставке показаны экспериментальные данные о положении максимума $I_{\text{изл}}(E, H)$ (Δ и \circ – данные $I_{\text{изл}}(H)$ и $I_{\text{изл}}(E)$ для образца $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; \square – данные $I_{\text{изл}}(E)$ для образца $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

Зависимость интенсивности излучения $p\text{-Ge}$ от напряженности электрического поля показана на рис.2. В отсутствие магнитного поля $H = 0$ излучение возрастает с E и при $E > 100 \text{ В/см}$ выходит на насыщение, соответствующее отношению концентраций легких и тяжелых дырок $(n_2/n_1) \sim (m_2/m_1)^2$ [1, 2]. При наложении магнитного поля наблюдается возрастание 1–2 дырочного излучения, пропорциональное концентрации легких дырок в исследуемой области k -пространства (рис.2 и 3). На кривых $I_{\text{изл}}(E, H)$ появляется максимум смещающийся с увеличением E в сторону больших значений H , положение которого, как видно из вставки на

¹⁾ Длинноволновое ИК излучение наблюдалось также в более чистых образцах $p\text{-Ge}$ (Ю.Л.Иванов, частное сообщение).

рис.3 хорошо ложится на теоретическую прямую $c \cdot E/H = \sqrt{2\hbar \omega_{\text{опт}}/m_1}$, соответствующую теоретическим условиям оптимального накопления легких дырок [2]. Отвечающая этим условиям картина в пространстве скоростей показана на том же рисунке. Согласно грубой оценке по данным измерений накопление легких дырок достигает $n_2(H) / n_2(H=0) \approx 2$. Общий характер зависимостей $I_{\text{изл}}(E, H)$ в образцах $N_A - N_D = 5 \cdot 10^{13}$ и $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, примерно, одинаков, в то же время интенсивность излучения образца с большим содержанием примеси, как уже отмечалось, существенно выше.

Как видно из рис.2, интенсивность излучения, измеренная в максимуме кривых $I_{\text{изл}}(E, H)$, увеличивается с возрастанием E и H , однако этот рост существенно замедляется при $E > 800 \text{ В/см}$. Данный факт противоречит теории [2], предсказывающей увеличение накопления легких дырок вплоть до полей $E \sim 4 \text{ кВ/см}$. Эффект замедления роста может быть обусловлен рядом причин, в том числе, адиабатическим перегревом образцов. Однако, ясно, что существенную роль в этом эффекте должны играть возможная неперпендикулярность полей E и H . При больших напряженностях E наличие продольной компоненты $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$, как показывают оценки, может "вытягивать" значительную часть легких дырок из области накопления.

Согласно теории средняя энергия дырок в p -Ge в полях $E \geq 20 \div 30 \text{ В/см}$ соответствует температурам, порядка 100 К [1]. Определенная в настоящих экспериментах величина $\sigma_{12} \approx 2 \times 10^{-14} \text{ см}^2$ почти на порядок выше значений, измеренных в p -Ge при $T = 70 - 100 \text{ К}$ [8]. Учитывая теоретические данные о зависимости σ_{12} от температуры [9], можно предположить, что в условиях эксперимента при $E \approx 50 - 100 \text{ В/см}$ ($N_A - N_D \approx 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) существенную роль играет рассеяние дырок на заряженных примесях, приводящее к снижению средней энергии носителей и увеличению относительного содержания малоэнергетических дырок. Именно эта часть носителей ($c T_{\text{эфф}} \approx 10 - 20 \text{ К}$), видимо, дает основной вклад в $1 - 2$ дырочное поглощение в "допролетных" электрических полях ($E \lesssim 50 \div 100 \text{ В/см}$). Сказанное подтверждают измерения на нагретых электрическим полем образцах ($T \approx 50 - 60 \text{ К}$), в которых индуцированное поглощение почти полностью пропадало.

Авторы благодарят А.А.Андропова за интерес к работе и плодотворные дискуссии, Н.А.Пенина, В.А.Чуенкова, З.Ф.Красильника, В.А.Козлова и В.Н.Шастина за полезные обсуждения.

Литература

1. Maeda H., Kurosawa T. Proc. XI Intern. Conf. Phys. Semicond, Warszawa, 1972, p.602; J. Phys. Soc. Jap., 1971, 31, 668.
2. Андронов А.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Шастина В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 585; Sol. St. Comm., 1980, 36, 603.
3. Валов В.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Нефедов И.М. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 608.
4. Kotiyama S., Spies R. Proc. 3 Intern. Conf. Hot Carriers Semicond, Montpellier, 1981; Phys. Rev., 1981, B23, 6839.
5. Воробьев Л.Е., Осокин Ф.И., Стафеев В.И., Тулупенко В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 125.
6. Буздин В.В., Демешина А.И., Мурзин В.Н. ПТЭ, 1969, №1, 235.
7. Заварицкая Э.И. ФТТ, 1960, 2, 3009.
8. Keiser W., Collins R.J., Fan H.Y. Phys. Rev., 1953, 91, 1380.
9. Kahn A.H. Phys. Rev., 1955, 97, 1647; Мурзин В.Н. ФТП, 1973, 7, 1610.
10. Salomon S.N., Fan H.Y. Phys. Rev., 1970, B1, 662.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 декабря 1981 г.