

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ *i*-Ge В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Малютенко В. К., Гуга К. Ю., Рыбак А. М.

Исследовано зона-зонное излучение полупроводника в условиях одновременного действия в определенном кристаллографическом направлении электрического поля и одноосного сжатия, вызывающих сильное отклонение концентрации электронно-дырочной плазмы от равновесного значения. Впервые получена отрицательная люминесценция полупроводника в таких условиях, описаны ее полевая и барическая зависимости. Эксперимент проведен на образцах чистого *i*-Ge с собственной проводимостью $n_i > N_{\text{пртм}} (N_A - N_D = 10^{12} \text{ см}^{-3})$ при температуре 343 К.

Люминесценция полупроводников при безбарьерной магнитной «инжекции» и «эксклюзии» носителей тока в условиях магнитоцентрационного эффекта (МКЭ) хорошо изучена (см. библиографию в [1]). Сущность эффекта заключается в возможности изменения полной и локальной по сечению кристалла концентрации носителей заряда по сравнению с равновесным значением. При возрастании полного числа носителей заряда интенсивность излучения полупроводника в области зона-зонных переходов ($E_g \leq \hbar\omega < \infty$) становится выше равновесной W_0 (тепловой), наблюдается положительная люминесценция. При уменьшении их концентрации интенсивность излучения становится ниже равновесной, возникает отрицательная люминесценция (ОЛ). Явление ОЛ впервые было предсказано для квантовых систем с дискретным энергетическим спектром [2]. Однако экспериментальное подтверждение существования ОЛ было получено в системе с квазинепрерывным энергетическим спектром (в полупроводнике с собственной проводимостью в условиях МКЭ) [3, 4].

В настоящей работе впервые приводятся результаты исследования нового способа стимулирования ОЛ, основанного на одноосном сжатии полупроводника. Для возбуждения ОЛ использовано явление возникновения в полупроводниках под действием одноосного сжатия анизотропной проводимости, приводящей к неоднородному распределению концентрации электронно-дырочных (ЭД) пар по сечению кристалла. Явление анизотропной проводимости одноосно сжатого Ge было исследовано в [5]. Изучалось также влияние анизотропии на рекомбинационное излучение Ge, стимулированное фотовозбуждением кристаллов сильнопоглощаемым излучением большой плотности [6].

Приведенные здесь результаты отличаются тем, что исследовалось влияние анизотропии на зона-зонное излучение Ge без возбуждения его светом, что позволило реализовать режим отрицательной люминесценции.

Эксперименты проводились на образцах чистого германия с собственной проводимостью (*i*-Ge) при $T=343 \text{ К}$ ($n_i=2.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_A - N_D = 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Образцы вырезались в виде пластин, ориентированных своей плоскостью под углом 29° к кристаллографической оси $[111]$. Это обеспечивало достижение максимальной анизотропии проводимости, показатель которой может быть представлен как разность относительных анизотропий тензоров подвижности электронов и дырок:

$$a = \frac{U_{nxy}}{U_{nyy}} - \frac{U_{pxy}}{U_{pyy}}. \quad (1)$$

Противоположные широкие грани пластин обрабатывались так, чтобы они характеризовались большой ($S_{\max} \geq 10^3$ см/с) и малой ($S_{\min} \leq 10^2$ см/с) скоростями поверхностной рекомбинации. К образцам, снабженным омиче-

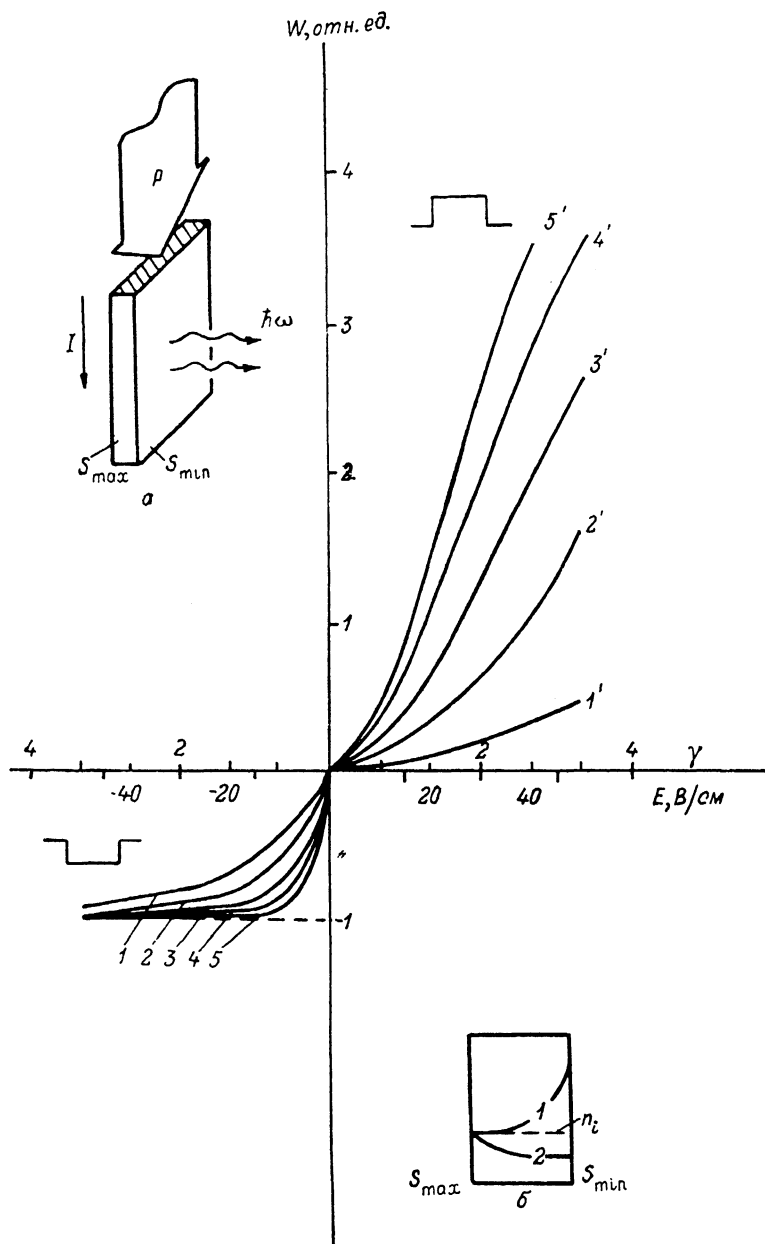


Рис. 1. Расчетные полевые зависимости интенсивности отрицательной (1—5) и положительной (1'—5') люминесценции.

1, 1'—4, 4' — зависимость от величины электрического поля E_x (верхний масштаб по оси абсцисс) при различных значениях одноосного сжатия; $P, T/\text{см}^2$: 1, 1' — 0.5; 2, 2' — 1; 3, 3' — 1.5; 4, 4' — 2; 5, 5' — зависимость от безразмерного поля γ (нижний масштаб по оси ординат). а — схема эксперимента, б — пространственное распределение носителей заряда в образце; штриховая линия — равновесное распределение собственной концентрации n_i ; 1 — обогащение, 2 — истощение в условиях одноосного сжатия.

скими контактами, прикладывались импульсы электрического поля E длительностью $t=300$ мкс и одноосное сжатие P (схема эксперимента показана на рис. 1, а). Исследовались вольт-амперные характеристики и излучение образца со стороны грани S_{\min} . При приложении одноосного сжатия к образцу Ge возникающая в нем анизотропия подвижности приводит совместно с действием электрического поля E к выносу ЭД пар к грани с S_{\max} или S_{\min} . Направление

выноса задается направлением электрического поля $\pm E$. При выносе ЭД пара к грань с S_{\max} полное их число в кристалле падает из-за интенсивной рекомбинации на этой грани. Объем кристалла истощается: уровень концентрации в нем становится ниже равновесного значения (режим истощения; рис. 1, б).

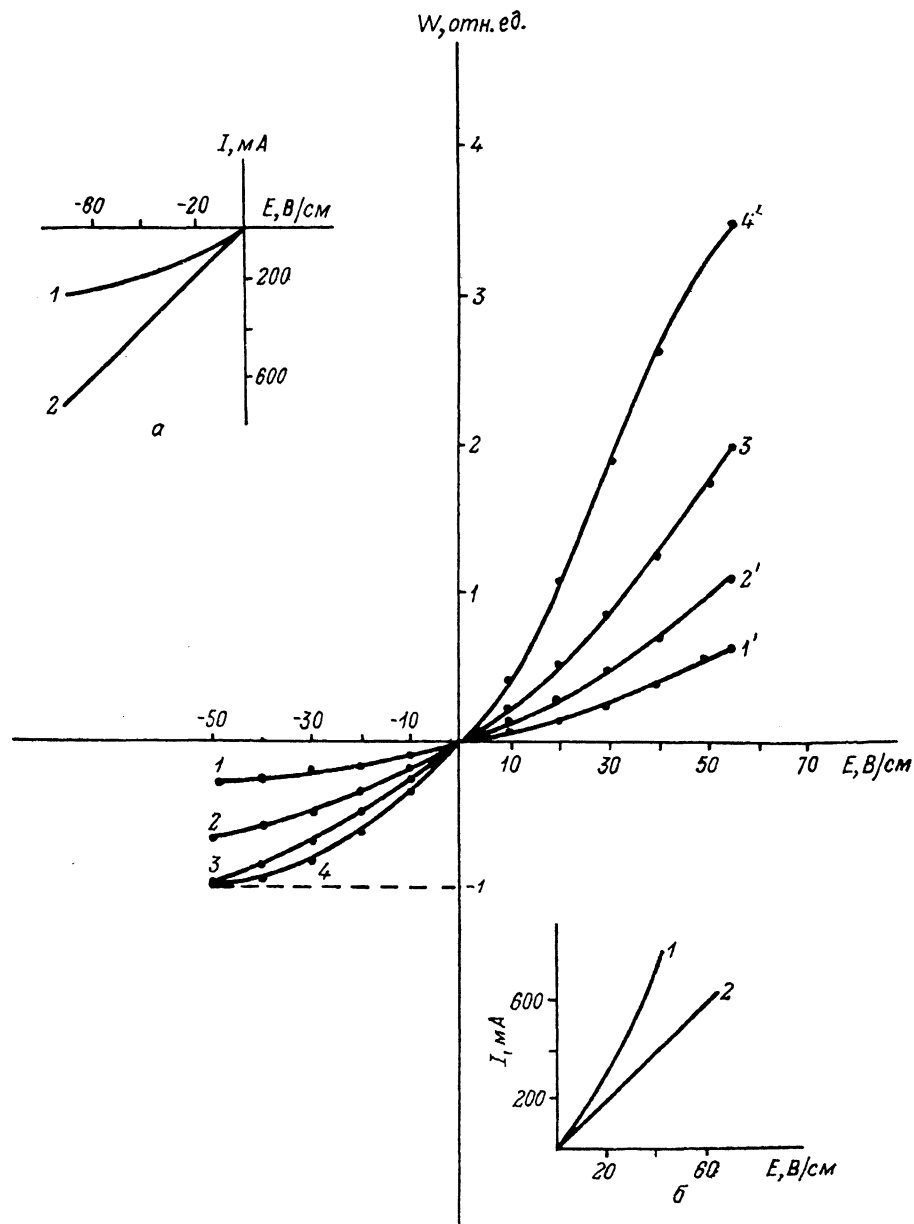


Рис. 2. Экспериментальные полевые зависимости ОЛ (1—4) и ПЛ (1'—4') при различных значениях величины одноосного сжатия.

$P, T/\text{см}^2$: 1, 1' — 0.5; 2, 2' — 1; 3, 3' — 1.5; 4, 4' — 2. а, б) вольт-амперные характеристики сжатого (1) и несжатого (2) кристаллов: а) 1 — режим истощения, б) 1 — режим обогащения.

При выносе ЭД пар к грани с S_{\min} они накапливаются у этой грани, а их полное число возрастает из-за интенсивной генерации на грани S_{\max} (режим обогащения; рис. 1, б). Таким образом, одновременное приложение P и E_x приводит к изменению полной и локальной по сечению кристалла концентрации ЭД пар. Прямым подтверждением изменения полного числа носителей заряда в кристалле является вид вольт-амперных характеристик. В режиме истощения сопротивление кристалла растет, ток становится ниже омического (рис. 2,

вставка a). В режиме обогащения сопротивление кристалла падает, ток становится выше омического (рис. 2, вставка б).

Изменение полной и локальной концентрации ЭД пар в кристалле естественно отражается на его излучательных характеристиках. В режиме обогащения, когда концентрация ЭД пар у грани S_{\min} становится выше равновесного значения, что равноценно увеличению числа излучающих осцилляторов, излучение полупроводникового образца в области зона-зонных переходов ($E_g \leq \leq \hbar\omega < \infty$) наблюдается в виде импульсов (импульсное E_x) положительной полярности. В режиме истощения, когда полное число носителей тока ниже равновесного и концентрация ЭД пар у грани S_{\min} существенно падает, излучение (в той же спектральной области) фиксируется в виде импульсов отрицательной полярности (отрицательная люминесценция). На рис. 1 и 2 показаны расчетные и экспериментальные полевые зависимости интенсивности люминесценции. Расчетные кривые приведены в виде зависимостей от E для различных значений P (кривые 1—4, 1'—4'), а также от безразмерного поля γ (кривые 5, 5'), которое учитывает совместное действие P и E_x . Как и в [5],

$$\gamma = aeLE_x/4kT, \quad (2)$$

где a — параметр анизотропии, задаваемый одноосным сжатием; e — заряд электрона; L — диффузионная длина; E_x — электрическое поле вдоль оси сжатия X ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Давление P входит в γ через параметр a , который наряду с (1) можно представить как

$$a = (\Pi_{xy, xx}^p - \Pi_{xy, xx}^n) P, \quad (3)$$

где $\Pi_{xy, xx}^p$, $\Pi_{xy, xx}^n$ — компоненты тензора пьезосопротивления. Таким образом, величина эффекта определяется параметром a , что позволяет, исходя из (3), оценивать эффективность одноосного сжатия для реализации в конкретном полупроводниковом материале анизотропной проводимости и стимуляции отрицательной люминесценции. Для Ge параметр анизотропии равен $a = 0.67 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кг} \cdot P$.

Сверхлинейная зависимость положительной люминесценции от поля E_x (при $P = \text{const}$) свидетельствует о линейной рекомбинации носителей тока, характерной для слабого обогащения ($\Delta p = \Delta n < p_0 = N_A - N_D$). Амплитуда сигнала ОЛ имеет тенденцию к насыщению с ростом E_x и γ . Указанные особенности хорошо просматриваются на расчетных и экспериментальных характеристиках люминесценции. Расчет проводился в предположении того, что W_0 определяется температурой и шириной запрещенной зоны материала, и в сущности это интеграл формулы распределения Планка для черного тела (с учетом отражения) в спектральном диапазоне зона-зонных переходов ($E_g \leq \leq \hbar\omega < \infty$).¹ Насыщение полевой зависимости отрицательной люминесценции, как известно [1], свидетельствует о том, что мощность модулированного сигнала достигает мощности равновесного излучения $\Delta W = -W_0$. Это связано с полным «запиранием» зона-зонного излучения (биполярная компонента тока ушла от излучающей грани в глубь кристалла). Равенство $\Delta W = -W_0$ позволяет произвести оценку мощности максимального сигнала ОЛ. При $T = 343 \text{ К}$ мощность ОЛ оказалась $\Delta W = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$. В настоящее время известны только три метода возбуждения ОЛ: магнитоконцентрационный эффект [1], эксклюзия носителей тока в полупроводниках [8], оптическое возбуждение в газах [9]. Представленные результаты свидетельствуют о новой возможности наблюдения ОЛ в системах с квазинепрерывным спектром.

Подобные исследования ОЛ могут оказаться полезными при исследовании рекомбинационных параметров полупроводников, состояния их поверхности, а также при разработке новых типов приборов для оптической обработки информации.

¹ Процедура вычисления W_0 и ΔW подробно описана в [7].

Список литературы

- [1] Berdahl P., Maluytenko V., Morimoto T. // *Infr. Phys.* 1989. V. 29. N 2-4. P. 667—672.
- [2] Антонов-Романовский В. В., Степанов Б. И., Фок М. В., Хапалюк А. П. // *ДАН СССР.* 1955. Т. 105. В. 1. С. 50—53.
- [3] Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т., Смирнов В. А. // *ДАН СССР.* 1965. Т. 161. В. 6. С. 1308—1309.
- [4] Малютенко В. К., Болгов С. С., Пипа В. И. // *Письма ЖТФ.* 1979. Т. 5. В. 23. С. 1444—1447.
- [5] Бойко И. И., Жадько А. П., Рашба Э. И., Романов В. А. // *ФТТ.* 1965. Т. 7. В. 7. С. 2239—2242.
- [6] Жадько А. П., Романов В. А. // *ФТП.* 1967. Т. 1. В. 12. С. 1873—1875.
- [7] Болгов С. С., Малютенко В. К., Пипа В. И. // *ФТП.* 1983. Т. 17. В. 2. С. 208—212.
- [8] Малютенко В. К., Рыбак А. М., Коллюх А. Г. // *ЖПС.* 1987. Т. 47. В. 2. С. 299—301.
- [9] Huddleston R. K., Weitz F. // *Chem. Phys. Lett.* 1981. V. 83. N 1. P. 174—179.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 2.04.1990
Принята к печати 19.04.1990

