

МЕЖПОДЗОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В Ge В СИЛЬНЫХ $E \perp H$ ПОЛЯХ ПРИ ОДНООСНОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Мусаев А. М.

Методом диагностики спонтанного дальнего ИК излучения исследуются эффекты динамического разогрева дырок германия в сильных $E \perp H$ полях при ОУД, когда направление холловского дрейфа дырок ориентировано вдоль и поперек направления деформации. Обнаружено существенное влияние межподзонного туннелирования дырок при ОУД и других факторов на инверсию населенностей подзон.

Активные полупроводниковые приборы субмиллиметрового и дальнего инфракрасного диапазонов, разработанные в последние годы, основаны на горячих носителях заряда в p -Ge, неразрывно связанных с вырождением валентной зоны в точке $p=0$, а также с выраженной анизотропией эффективной массы тяжелых дырок. Экспериментальное исследование влияния вышеупомянутых факторов на инверсное распределение дырок в Ge создает предпосылки для обоснования физических моделей, лежащих в основе работы этих активных приборов, и способствует улучшению их параметров.

Эффективным способом воздействия на эти факторы является одноосная упругая деформация (ОУД).

Недавние экспериментальные и теоретические исследования [1-6] влияния ОУД на индуцированное и спонтанное излучение показывают, что одноосное давление существенным образом влияет на инверсию населенностей валентных подзон 1, 2.

В связи с этим представляется важным экспериментальное изучение эффектов динамического разогрева дырок в сильных $E \perp H$ полях методом диагностики спонтанного дальнего ИК излучения (СДИКИ) при ОУД кристалла.

Образцы p -Ge (Ga) с разностной концентрацией примесей $N_A - N_D \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и размерами $2 \times 2 \times 12$, $1,25 \times 2$, 2×13 мм исследовались при $T=4.2 \text{ K}$ в конфигурациях полей, когда направление холловского дрейфа дырок было ориентировано вдоль или поперек направления деформации $P \parallel [H \cdot E]$, $P \perp [H \cdot E]$. Излучение из образца после прохождения системы фильтров (фторопласт, черный полиэтилен) регистрировалось фотоприемником из Ge(Ga).

На образец подавались импульсы напряжения с длительностью 10 мкс и частотой 3 Гц. Давление до 1100 кг/см^2 прикладывалось вдоль его наибольшей стороны.

| Направление тока | При ОУД | | Без давления | |
|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | m_{\perp}/m_0 | m_{\parallel}/m_0 | m_{\perp}/m_0 | m_{\parallel}/m_0 |
| I [001] P | 0.216 | 0.046 | 0.042 | 0.21 |
| I [010] \perp P | 0.057 | 0.111 | 0.042 | 0.21 |
| I [111] P | 0.42 | 0.041 | 0.042 | 0.48 |
| I [110] \perp P | 0.053 | 0.13 | 0.042 | 0.38 |

Воздействие механических напряжений на кристалл p -Ge приводит к деформации энергетического спектра дырок, при этом снимается вырождение в точке экстремума, изменяется форма изоэнергетических поверхностей. Когда $\mathbf{P} \parallel [001]$ или $\mathbf{P} \parallel [111]$, расщепление подзон в области $p=0$ пропорционально давлению и при $P=10^8$ кг/см² составляет ~ 6 и ~ 4 мэВ соответственно. Изменение энергетического спектра подзон 1, 2 при ОУД, когда $\mathbf{P} \parallel [001]$ и $P=10^8$ кг/см², показано на рис. 1. В области малых кинетических энергий, когда $\epsilon_{1,2}^{\text{кин}} \ll (A+B) \Delta\epsilon/2B$, поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения. Продольные и поперечные эффективные массы дырок 1, 2 при ОУД для энергий $\epsilon_{1,2}^{\text{кин}} \ll \Delta\epsilon$ приведены в таблице.

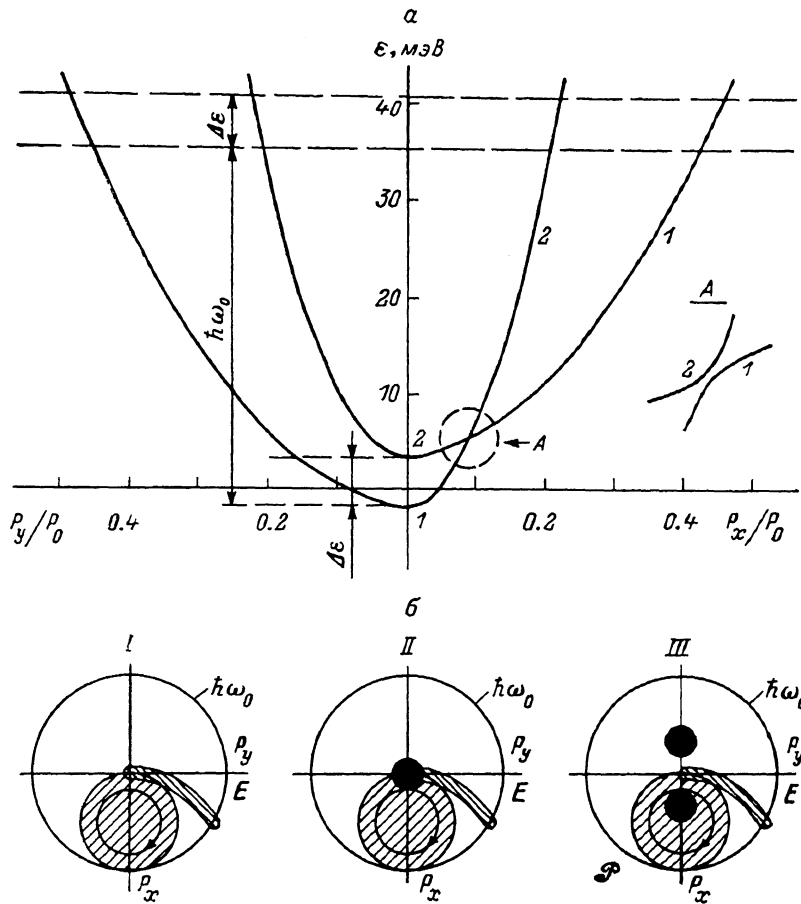


Рис. 1.

α — энергетический спектр валентных подзон (1, 2) при ОУД ($\mathbf{P} \parallel [001]$, $P=1.1 \cdot 10^8$ кг/см²); β — структура дырок (заштрихованные области) и расположение окрестностей точек вырождения (сплошные области) при ОУД в импульсном пространстве $\mathbf{H} \parallel [001]$, $\mathbf{E} \parallel [010]$. I — $\mathbf{P} \parallel [001]$, II — $\mathbf{P}=0$, III — $\mathbf{P} \parallel [100]$.

Типичные ВАХ при ОУД (сжатие) кристалла в магнитном поле приведены на рис. 2.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности спонтанного излучения при ОУД образца от электрического поля в конфигурации $\mathbf{P} \perp [\mathbf{H} \cdot \mathbf{E}]$, когда $\mathbf{E} \parallel [010]$, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{P} \parallel [001]$ для различных значений магнитного поля.

В отсутствие магнитного поля с ростом давления интенсивность излучения падает, что объясняется уменьшением концентрации дырок в подзоне 2 вследствие расщепления подзон, а также смещением уровня постоянной разности энергий — $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 12.4$ мэВ [пик чувствительности фотоприемника Ge(Ga) в направлении быстрого спада функции распределения дырок в подзоне 2]. Наложение магнитного поля $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ приводит к существенному изменению характера зависимости $I_{\text{сп}}(E)$. В магнитном поле при $E \geq 50$ В/см с ростом

давления увеличивается интенсивность СДИКИ. При этом наибольшая разность величин излучения с давлением и без него расположена в области максимума возгорания СДИКИ. Качественно аналогичный характер имеет и зависи-

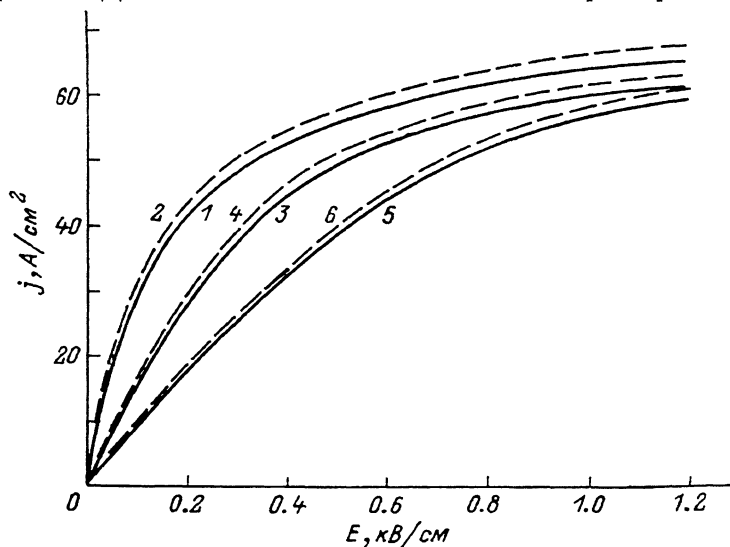


Рис. 2. ВАХ образца при ОУД ($P \parallel H [001]$, $E \parallel [010]$).

P , кг/см²: 1, 3, 5 — 0; 2, 4, 6 — $1.1 \cdot 10^2$. H , кЭ: 1, 2 — 0; 3, 4 — 6; 5, 6 — 12.

мость интенсивности излучения от электрического поля и для образца с ориентацией полей $E \parallel [110]$, $H \parallel P \parallel [111]$.

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности СДИКИ от электрического поля в конфигурации $P \parallel [H \cdot E]$, когда $E \parallel [010]$, $H \parallel [100]$,

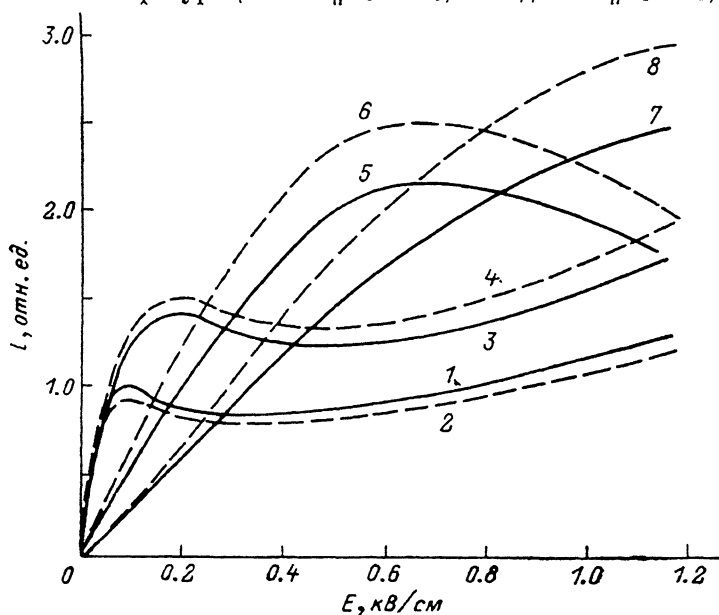


Рис. 3. Зависимость интенсивности СДИКИ от электрического поля при ОУД ($P \parallel H \parallel [001]$, $E \parallel [010]$).

P , кг/см²: 1, 3, 5, 7 — 0; 2, 4, 6, 8 — $1.1 \cdot 10^2$. H , кЭ: 1, 2 — 0; 3, 4 — 1; 5, 6 — 6; 7, 8 — 12.

$P \parallel [001]$ (для образца с ориентацией полей $E \parallel [110]$, $H \parallel [112]$, $P \parallel [111]$ зависимости качественно не различаются). Как видно из результатов эксперимента, приложение давления независимо от магнитного поля приводит к спаду интенсивности излучения. Эти результаты эксперимента можно объяснить факто-

рами, влияющими на изменение интенсивности излучения при ОУД, приведенными в работе [1]. Однако при этом необходимо учитывать и факторы, связанные с динамикой движения и квантованием спектра дырок в магнитном поле, а также фактор межподзонного туннелирования носителей.

Согласно работам [7-10], вероятность межподзонного туннелирования носителей при движении их по траекториям, проходящим через окрестность точек вырождения подзон, высокая. Точка вырождения подзон, находящаяся в центре зоны, при приложении ОУД вдоль направления [100] или [111] расщепляется на две симметричные точки, располагающиеся на осях [100], [111]. Удаление их от центра зоны пропорционально величине давления. На рис. 1 представлены расщепление точки вырождения подзон при ОУД (а), а также структура распределения дырок в импульсном пространстве в плоскости их холловского дрейфа. Когда направление холловского дрейфа дырок перпендикулярно

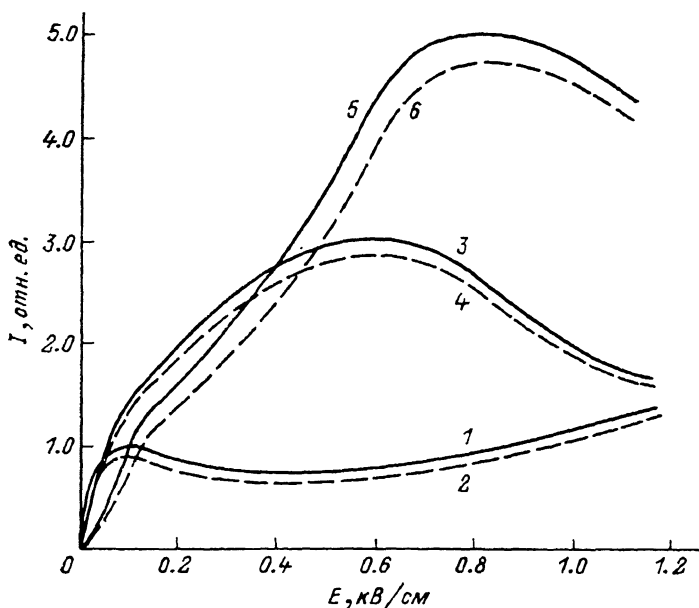


Рис. 4. Зависимость интенсивности СДИКИ от электрического поля при ОУД ($P \parallel [001]$, $E \parallel [010]$, $H \parallel [100]$).

P , кг/см²: 1, 3, 5 — 0; 2, 4, 6 — $1.1 \cdot 10^8$. H , кЭ: 1, 2 — 0; 3, 4 — 2; 5, 6 — 5.

направлению ОУД $P \perp [H \cdot E]$, точки вырождения подзон расположены в области накопления дырок в подзоне 2, а в случае параллельности $P \parallel [H \cdot E]$ точки вырождения подзон в области накопления дырок подзоны 2 отсутствуют. При динамическом разогреве дырок с ростом электрического поля $E > 30$ В/см увеличивается глубина проникновения носителей в активную область, вследствие чего растет число дырок с энергией $\hbar\omega \geq \hbar\omega_0 + \Delta\varepsilon$, способных после испускания оптических фононов заполнять область накопления подзоны 2. Так как интенсивность поступления дырок в подзону 2 также зависит и от плотности состояний подзон 1, 2 в окрестности $p=0$, то наблюдаемый рост интенсивности излучения при ОУД в конфигурации $P \perp [H \cdot E]$ (рис. 3) может быть объяснен этим явлением. Межподзонным туннелированием носителей для рассмотренной выше конфигурации можно пренебречь, так как с расщеплением подзон 1, 2 при ОУД уменьшается вероятность их туннелирования. Однако межподзонное туннелирование носителей вносит отрицательный вклад в зависимости интенсивности СДИКИ в конфигурации $P \parallel [H \cdot E]$. Как видно из результатов эксперимента (рис. 4), прохождение замкнутых траекторий дырок подзоны 2 через область вырождения подзон 1, 2 приводит к уменьшению интенсивности излучения. Одной из причин такой зависимости может быть и уменьшение относительной концентрации дырок подзоны 2 вследствие туннелирования их в подзону 1.

С ростом давления точки вырождения подзон 1, 2 смещаются в направлении расположения центра области накопления. Это обстоятельство также способствует увеличению вероятности туннелирования дырок подзону 2 в подзону 1.

Автор признателен Р. И. Баширову за обсуждение результатов работы и Н. М. Анапольскому за помощь в эксперименте.

Список литературы

- [1] Баширов Р. И., Гавриленко В. И., Красильник З. Ф., Мусаев А. М., Никоноров В. В., Потапенко С. Ю., Чернобровцева М. Д. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 3. С. 479—484.
- [2] Воробьев Л. Е., Давылов С. Н., Калинин В. А., Стафеев В. И. // Тез. докл. XI Всес. конф. по физике полупроводников. Кишинев, 1988. Т. 1. С. 125—127.
- [3] Алгухов И. В., Каган М. С., Синис В. П. // Письма ЖЭТФ. 1988. В. 3. С. 136—138.
- [4] Стариков Е. В., Шикторов П. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 8. С. 1462—1468.
- [5] Баширов Р. И., Мусаев А. М., Анапольский Н. М. // Тез. докл. VII Всес. симп. «Плазма и неустойчивости в полупроводниках». Паланга, 1989. Ч. II. С. 207—210.
- [6] Komiyama S. // Proc. XVIII Int. Conf. Phys. Semicond. Stockholm, 1986. P. 1641—1650.
- [7] Алешкин В. Я., Романов Ю. А. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. В. 5. С. 1857—1862.
- [8] Алешкин В. Я., Романов Ю. А. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 2. С. 281—286.
- [9] Dargys A., Rudolph A. F. // Phys. St. Sol. (b). 1986. V. 135. N 2. P. 437—444.
- [10] Стариков Е. В., Шикторов П. Н. // Тез. докл. VII Всес. симп. «Плазма и неустойчивости в полупроводниках». Паланга, 1989. Ч. II. С. 213—215.

Институт физики АН СССР
Дагестанский филиал
Махачкала

Получена 3.05.1990
Принята к печати 20.11.1990