

СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДЛИННОВОЛНОВОМ ИК ДИАПАЗОНЕ НА ГОРЯЧИХ ДЫРКАХ Ge В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

*А.А.Андронов, И.В.Зверев, В.А.Козлов,
Ю.Н.Ноздрин, С.А.Павлов, В.Н.Шагин*

Обнаружено стимулированное излучение мощностью $P \approx 10$ Вт в диапазоне $\lambda = 100 \div 300$ мкм длин волн на межподзонных переходах горячих дырок германия.

В полупроводниках p -типа при низких температурах в скрещенных электрическом E и магнитном H полях возможно ¹ возникновение инверсии населенностей прямых оптических переходов между подзонами легких и тяжелых дырок и соответствующего лазерного действия в длинноволновом ИК диапазоне (рис. 1). Инверсия возникает при динамическом разогреве тяжелых дырок и доминирующем рассеянии их на оптических фононах за счет накопления замагниченных легких дырок в области энергий $\epsilon \ll \hbar\omega_0$ ($\hbar\omega_0$ — энергия оптического фонона), где рассеяние относительно слабо ^{2, 3}. Оптимальные для инверсии условия возникают при определенном отношении E/H , когда скорость дрейфа

$$v_{др} = cE/H = (0,7 \div 1) v_{01}, \quad (1)$$

где $v_{01} = \sqrt{2\hbar\omega_0/m_1}$ — скорость тяжелых дырок с энергией $\epsilon = \hbar\omega_0$. В p -Ge по расчетам инверсия должна расти с увеличением полей E и H вплоть до $E \approx 3$ кВ/см ($H \approx 20$ кЭ). Проведенные в последние годы разнообразные численные и экспериментальные исследования (см., например, ⁴) подтвердили реальность создания инверсии населенностей дырок в p -Ge. Однако имеется всего лишь одно сообщение ⁵ о наблюдении лазерного действия (мощностью порядка милливатт) в p -Ge на переходах между подзонами легких и тяжелых дырок, причем достаточно подробного исследования наблюдавшегося

учения не проведено, и имеются определенные трудности в сопоставлении полученных данных с указанными выше представлениями.

В работе ⁶ было проведено исследование длинноволновой ИК люминесценции горячих дырок *p*-Ge в $E \perp H$ полях в полосе Ge : Ga фотоприемника на оптически толстых образцах. Наблюдались эффекты просветления образцов и усиления (с коэффициентом $\alpha \approx 0,05 \text{ см}^{-1}$) спонтанного излучения. В настоящей работе, продолжающей эти исследования, сообщается о наблюдении достаточно мощного стимулированного излучения из Ge в $E \perp H$ полях, хорошо согласующегося с механизмом, предложенным в работе ¹.

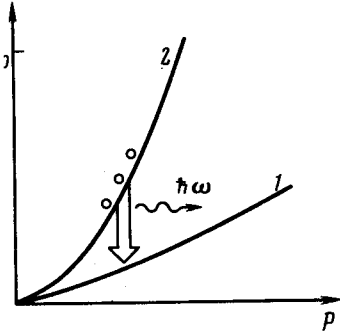


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая возможность усиления на переходах между подзонами легких 2 и тяжелых 1 дырок, $\hbar\omega_0$ — энергия оптического фотона

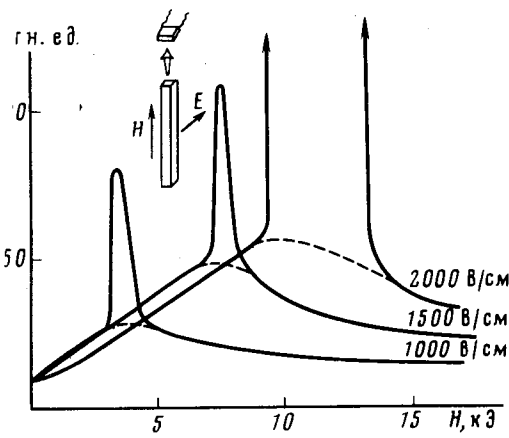


Рис. 2

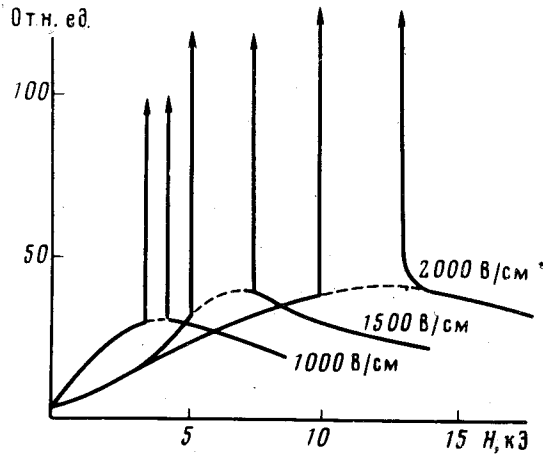


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости интенсивности ИК излучения, регистрируемого Ge : Ga фотоприемником, от магнитного поля $H \parallel [111]$ при указанных значениях приложенного электрического поля $E \parallel [110]$. Стрелками отмечены границы области порогового возрастания интенсивности ИК излучения от поля H

Рис. 3. Зависимости интенсивности ИК излучения на эпитаксиальном GaAs от магнитного поля $H \parallel [111]$ при приложенном поле $E \parallel [110]$

Образцы Ge : Ga с $N_A - N_D \approx 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_D/N_A \approx 0,3$ изготавливались в виде прямоугольного параллелепипеда $50 \times 5 \times 4 \text{ мм}^3$ с параллельностью противоположных граней не хуже $1'$, так что они могли служить резонаторами на внутреннем отражении. Ориентация полей и направление, в котором регистрировалось излучение, показаны на рис. 2. Образец охлаждался до $T \approx 4,2\text{К}$. В качестве приемников ИК излучения использовались охлаждаемые до 4,2К детекторы из Ge : Ga и эпитаксиального GaAs. Измерения проводились в режиме одиночных импульсов электрического поля длительностью 1,5 мкс. Результаты измерений Ge : Ga фотоприемником показаны на рис. 2. При определенном соотношении E и H полей имело место пороговое возрастание интенсивности излучения (в поле $E \approx 2 \text{ кВ/см}$ интенсивность излучения в области генерации на 3 – 4 порядка превышала ее значение в нулевом магнитном поле), причем ему предшествовал постепенный

рост интенсивности спонтанного излучения с увеличением поля H , связанный с накоплением дырок в легкой подзоне (ср. ⁴). Важно отметить, что области генерации приходятся на максимум "возгорания" спонтанного излучения (пунктирная линия) по полю H и удовлетворяют условию (1). Это убедительно показывает, что генерация связана с инверсией населенности перехода между подзонами легких и тяжелых дырок. На рис. 3 представлены соответствующие зависимости интенсивности ИК излучения, полученные на GaAs фотоприемнике. В отличие от результатов измерений на Ge : Ga фотоприемнике значительное (на 3 – 4 порядка) возрастание интенсивности длинноволнового ИК излучения имело место и в более слабых полях $E \approx 1$ кВ/см. Длительность импульса стимулированного излучения в обоих случаях была существенно меньше длительности импульса спонтанного излучения. Результаты измерений на обоих типах фотоприемников и постановка фильтров (InSb, плавленый кварц) позволяет заключить, что стимулированное излучение лежит в диапазоне длин волн $\lambda = 100 \div 300$ мкм. Подчеркнем, что механизм стимулированного излучения ¹ и неселективность резонатора допускают генерацию сразу в широком интервале длин волн, что, по-видимому, и имело место. Оценки выходной мощности стимулированного излучения по изменению сопротивления фотоприемников под действием излучения дают значение ее порядка 10 Вт.

В работе ⁷ в более чистых образцах p -Ge наблюдалось стимулированное излучение в полосе GaAs фотоприемника в $E \perp H$ полях, приходящееся на область по полю H за максимумом возгорания спонтанного излучения, соответствующую циклотронному резонансу легких дырок. Поэтому в отличие от настоящей работы оно связывалось со стимулированным циклотронным излучением, связанным с возможной ⁸ инверсией по уровням Ландау.

Таким образом, в настоящей работе наблюдалось достаточно мощное стимулированное излучение на межподзонных переходах горячих дырок Ge в скрещенных электрическом и магнитном полях. Можно надеяться, что лазеры на горячих дырках найдут в дальнейшем широкое применение.

Авторы пользуются возможностью поблагодарить Л.В.Берман за предоставление GaAs фотоприемника и А.М.Белянцева и С.В.Гапонова за поддержку.

Литература

1. Андронов А.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Шастин В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 585.
2. Восилюс И.И., Левинсон И.Б. ЖЭТФ, 1966, 50, 1660; Восилюс И.И. ФТТ, 1969, 11, 924.
3. Kurosawa T., Maeda H. J. Phys. Soc. Japan, 1972, 33, №2, 570.
4. Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках: Сб. научных трудов. Под. ред. А.А.Андропова и Ю.К.Пожелы. Горький, ИПФ АН СССР, 1983.
5. Воробьев Л.Е., Осокин Ф.И., Стафеев В.И., Тулупенко В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 300.
6. Ноздрин Ю.Н., Шастин В.Н., Федоренко Е.Ф. (Наблюдение спонтанного излучения в диапазоне 60 – 120 мкм из оптически толстых образцов p -Ge в $E \perp H$ полях. В сб.: Плазма и неустойчивости в полупроводниках: Тез. докл. V симпози. Вильнюс, 1983.
7. Иванов Ю.Л., Васильев Ю.Б. Письма в ЖЭТФ, 1983, 9, 613.
8. Козлов В.А., Мазов Л.С., Нефедов И.М., Заболоцких М.Р. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 142.