

**АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЕ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ И СТИМУЛИРОВАННОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В ГЕРМАНИИ
В ОБЛАСТИ ЦИКЛОТРОННЫХ ПЕРЕХОДОВ**

*Ю.А.Митягин, В.Н.Мурзин, С.А.Стоклицкий,
И.Е.Трофимов*

Рассчитан энергетический спектр валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях. Обнаружен эффект взаимодействия и расталкивания уровней Ландау легких и тяжелых дырок с одинаковой полной энергией. Этот эффект привлекается для объяснения обнаруженного в данной работе в *p*-Ge в сильных магнитных полях 35 – 45 кЭ субмиллиметрового стимулированного излучения в диапазоне $\nu = 70 - 90 \text{ см}^{-1}$.

В настоящее время известны два типа генерации стимулированного излучения в системе горячих носителей заряда в сильных скрещенных *E* и *H* полях, наблюдающиеся в кристаллах *p*-Ge. Это – лазерная генерация на межподзонных дырочных переходах, проявляющаяся в ле

гированных образцах ($N_{\text{пр}} = 5 \cdot 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$)^{1,4} и генерация чистых кристаллах ($N_{\text{пр}} < 10^{13} \text{ см}^{-3}$), объясняемая переходами в подзоне, легких дырок между уровнями Ландау в условиях образования инверсии их заселенности^{2,3,5}.

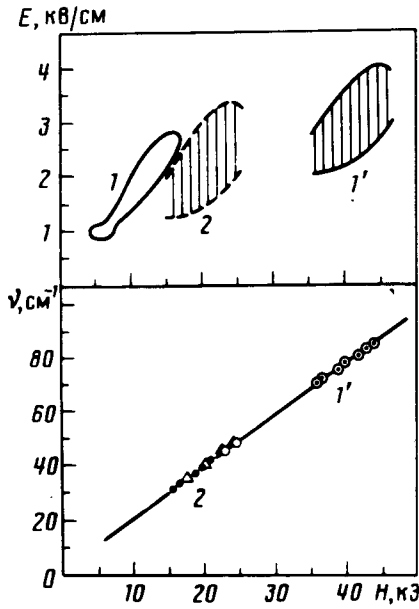


Рис. 1

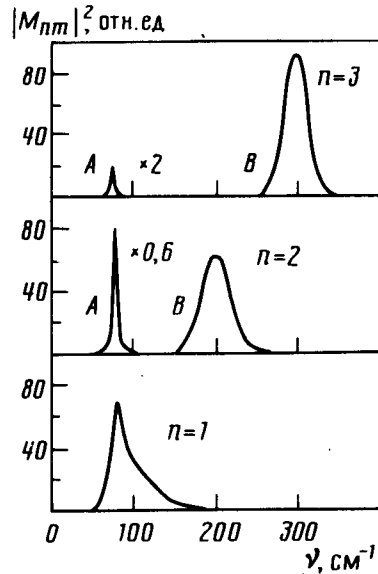


Рис. 3

Рис. 1. Области генерации стимулированного излучения *p*-Ge на межподзонных дырочных переходах (область *I*) и на переходах циклотронного типа (области *I'* и *2*), измеренные на образцах с концентрацией примесей: *I* и *I'* – $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, *2* – $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Ниже – частотная зависимость $\nu(H)$ линии излучения циклотронного типа в тех же образцах, экспериментальные точки: ● – 1,6 кВ/см, △ – 1,9 кВ/см, ○ – 2,4 кВ/см, ⊙ – 3,0 ÷ 3,2 кВ/см

Рис. 3. Данные теоретического расчета матричных элементов $|M_{nm}|^2$ оптических дипольных переходов с уровней Ландау $n=1, 2, 3$ (серия с $M_j = -3/2, +1/2$) на соответствующие уровни Ландау m подзоны тяжелых дырок. Расчет выполнен для условий $H=40$ кЭ и $E=3,2$ кВ/см

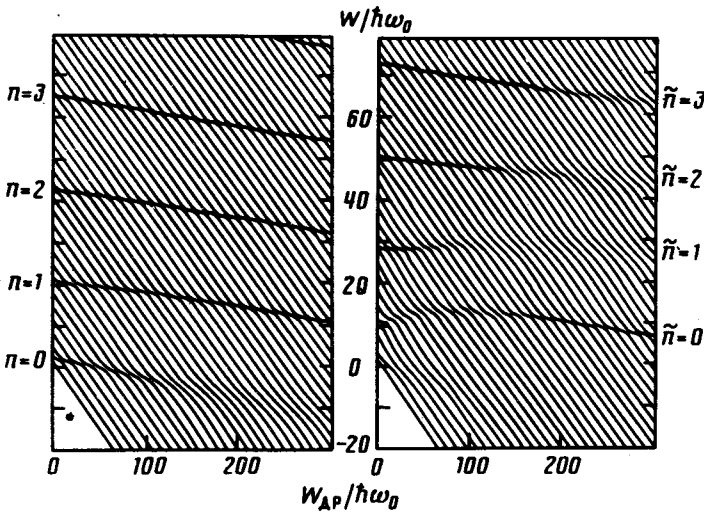


Рис. 2. Рассчитанные энергии W уровней Ландау легких (кривые с малым наклоном) и тяжелых (кривые с большим наклоном) дырок в зависимости от E и H полей в относительных единицах $\hbar\omega_0^C = \hbar eH/m_0 c$, где m_0 – масса свободного электрона. Здесь $W_{\text{ДР}} = (m_0/2)(cE/H)^2$. Слева – данные для серии с значениями квантового числа $M_j = -3/2, +1/2$, справа с $M_j = +3/2, -1/2$. n, \tilde{n} – номера уровней Ландау легких дырок

В настоящей работе излагаются результаты по обнаружению обоих типов генерации в одних и тех же образцах слаболегированного германия (с концентрацией примеси $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Проводится сопоставление спектров излучения, которые оказываются существенно различными, и обсуждается модель генерации стимулированного излучения циклотронного типа, основанная на межподзонных переходах при учете взаимодействия уровней Ландау легких и тяжелых дырок в областях их пересечения.

На рис. 1 показаны интервалы электрических и магнитных полей, в которых зарегистрирована лазерная генерация излучения в кристаллах $p\text{-Ge}$ ($2 \times 5 \times 50 \text{ мм}^3$, $N_{\text{пр}} = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\mathbf{H} \parallel [111]$). Образцы помещались в жидком гелии внутри сверхпроводящего соленоида. Электрическое поле $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ подавалось к образцу в виде импульсов $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ с частотой $1 \div 10 \text{ Гц}$. Спектры излучения измерялись на фурье-спектрометре с использованием быстродействующих охлаждаемых фотоприемников Ge (Ga) и $n\text{-GaAs}$ ^{1, 4}. Как видно из рис. 1, имеются две области E и H полей, в которых наблюдается стимулированное излучение. Область (I), отвечающая хорошо изученному излучению на межподзонных дырочных переходах (переходах между подзонами легких и тяжелых дырок)^{1, 4}, и область (I'), в которой обнаружено излучение нового типа. Согласно выполненным спектральным исследованиям обнаруженное в полях 35 – 45 кЭ излучение, в отличие от излучения на межподзонных дырочных переходах (характеризующегося широкими полосами с тонкой модовой структурой^{1, 4}), представлено в спектре одной узкой линией, ширина которой не превышает ширины аппаратной функции спектрометра $\delta\nu \leq 0,1 \div 0,2 \text{ см}^{-1}$. Частота линии стимулированного излучения растет линейно с увеличением напряженности магнитного поля, примерно по тому же закону, который зарегистрирован для излучения в области 30 – 50 см^{-1} в чистых кристаллах $p\text{-Ge}$ ($N_{\text{пр}} < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в работах^{3, 5}. Все экспериментальные точки хорошо ложатся на одну прямую с наклоном, которой отвечает циклотронной массе $m_2^* = 0,046 m_0$ легких дырок в германии.

Приведенные данные спектральных исследований свидетельствуют об единой природе явления стимулированного излучения в чистых и слаболегированных кристаллах $p\text{-Ge}$ на частоте ЦР легких дырок и, в принципе, не противоречат представлениям^{2, 3, 6, 7} о внутризонной лазерной генерации на переходах между уровнями Ландау легких дырок в условиях образования их инверсной заселенности за счет опустошения нижних уровней из-за примесного рассеяния и туннелирования легких дырок в тяжелую подзону при импульсах, близких к $p=0$ ^{6, 7}. Однако, картина явления, видимо, сложнее. Наблюдение генерации в сильных магнитных полях ($\sim 40 \text{ кЭ}$), при которых согласно оценкам, под энергией оптического фонона остаются только два уровня Ландау легких дырок, траектории которых в импульсном пространстве проходят далеко от области $p=0$, очевидно, затрудняет интерпретацию, основанную на эффектах опустошения. В этой ситуации нам представляется весьма вероятным другой механизм генерации, обусловленный межподзонными дырочными переходами с учетом взаимодействия уровней Ландау легких и тяжелых дырок в областях пересечения и гибридизации их волновых функций в этих состояниях. Эта модель основывается на данных численного расчета энергетического спектра и матричных элементов между подзонами легких и тяжелых дырок в кристаллах, типа германия с вырожденной валентной зоной, в $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ полях⁸. Как видно из рис. 2, изначальное вырождение верхних ветвей валентной зоны Ge в этих условиях не снимается полностью, что и приводит к взаимодействию и расталкиванию (антипересечению) уровней легких и тяжелых дырок в состояниях с одинаковой полной энергией. Эффект взаимодействия и перемешивания волновых функций, как видно из рисунка, оказывается различным для серий с $M_j = -3/2$ и $+3/2$ (в первой серии взаимодействие менее выражено) и заметно увеличивается в некоторой области значений E и H полей, которая, однако, оказывается различной для разных уровней Ландау. Следствием этого взаимодействия и перемешивания волновых функций является возникновение резкой особенности (полоса A) в величине матричного элемента межподзонных дырочных переходов в районе частоты ЦР легких дырок в стороне от максимума, обусловленного обычными межподзонными дырочными переходами (полоса B) (рис. 3). В отличие от обычных межподзонных переходов, имеющих известный классический аналог

(максимум $|M_{nm}|^2$ соответствует частоте $\hbar\omega_{21} \cong (m_2/2)(v_{c2} + cE/H)^2$ ⁹), межподзонные дырочные переходы в области ЦР частоты легких дырок (циклотронные переходы внутри подзоны легких дырок в расчетах не рассматривались) имеют чисто квантовую природу.

В заключение следует отметить, что описанный эффект по своей природе близок к эффектам туннелирования, рассматриваемым в работах ^{3,7}, и вполне может быть привлечен для объяснения генерации стимулированного излучения циклотронного типа также в чистых кристаллах *p*-Ge (в области частот $\nu = 30 - 50 \text{ см}^{-1}$) ^{3,5}. При этом для обеспечения лазерной генерации не требуется создания инверсной заселенности уровней Ландау внутри подзоны легких дырок, а достаточно наличия инвертированного распределения носителей между подзонами легких и тяжелых дырок, реализующегося в эксперименте ^{1,4,8}.

Литература

1. Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках. Сб. статей, Горький, ИПФ АН СССР, 1987 г.
2. Полупроводниковые лазеры на циклотронном резонансе. Сб. статей, Горький, ИПФ АН СССР, 1986 г.
3. Васильев Ю.Б., Иванов Ю.Л. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 949, в Сб. статей Полупроводниковые лазеры на циклотронном резонансе, Горький, ИПФ АН СССР, 1987 г., с. 102.
4. Митягин Ю.А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, 1986, №12, 30; ЖТФ, 1987, 57, 1847.
5. Митягин Ю.А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, 1987, №8 (в печати).
6. Козлов В.А., Мазов Л.С., Нефедов И.М., Заболотских М.Р. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 142.
7. Дьяконов А.И., Перель В.И. ЖЭТФ, 1987, 92, 350.
8. Стоклицкий С.А. Краткие сообщения по физике ФИАН, 1987, №7 (в печати).
9. Муравьев А.В., Ноздрин Ю.Н., Шагин В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 348.