

## СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА НА ЦИКЛОТРОННЫХ ПЕРЕХОДАХ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В ГЕРМАНИИ

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

*Впервые измерены спектры стимулированного излучения лазера на циклотронных переходах горячих дырок в германии. Излучение наблюдается в виде монохроматической линии  $\delta\nu \leq 0,1 \text{ см}^{-1}$ , частота которой линейно и монотонно перестраивается в диапазоне  $30 - 50 \text{ см}^{-1}$ . Обнаружен эффект осцилляций интенсивности. При обсуждении результатов привлекается новый механизм генерации.*

Интерес к горячей плазме носителей заряда в полупроводниках, проявляемый в последние годы, обусловлен перспективами, связанными с созданием нового типа квантовых генераторов — полупроводниковых лазеров и мазеров на горячих носителях [1,2]. В работах [3-5] было зарегистрировано и исследовалось методами субмиллиметровой фурье-спектроскопии стимулированное излучение, обусловленное межподзонами дырочными переходами в p-Ge. Одним из важных результатов этих исследований явилось обнаружение проявления квантования Ландау дырок в сильных  $E \perp H$  электрическом и магнитном полях. Лазерная генерация наблюдалась в виде отдельных узких линий излучения, расположенных внутри полос, обусловленных квантованием легких дырок, в диапазоне частот от 50-60 до 120-140  $\text{см}^{-1}$  (в кристаллах с разной степенью легирования).

В настоящей работе впервые приводятся спектры стимулированного излучения системы горячих носителей на циклотронных переходах. Исследования проводились на весьма чистых кристаллах p-Ge ( $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Обнаруженное лазерное излучение по своим спектральным характеристикам оказалось резко отличным от излучения на межподзонных дырочных переходах и по зависимости частоты от напряженности поля  $H$  близким к описанному в [6].

Далее приводятся результаты исследований излучения, обнаруженного в образцах p-Ge ( $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

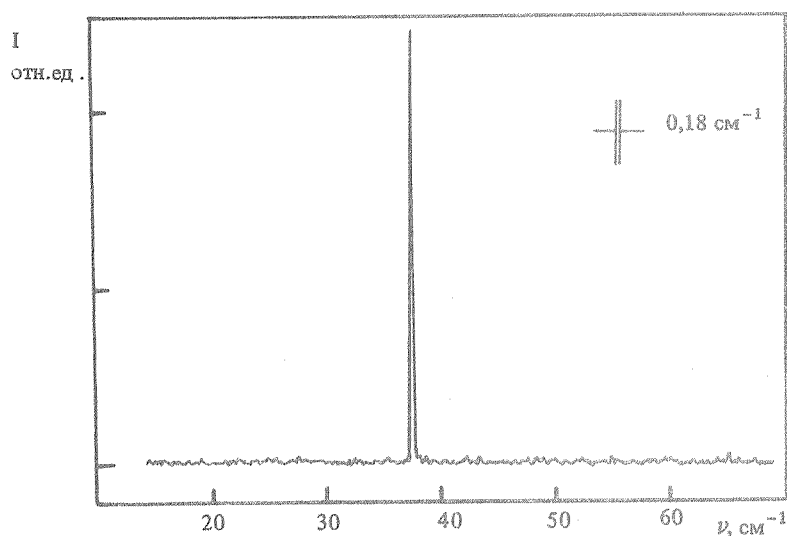


Рис. 1. Спектр стимулированного излучения на циклотронных переходах легких дырок в германии ( $H = 18,7 \text{ кЭ}$ ,  $E = 1,9 \text{ кВ/см}$ ,  $T = 4,2 \text{ К}$ ).

Образцы Ge:V имели форму прямоугольных параллелепипедов ( $3 \times 8 \times 10 \text{ мм}^3$ ), грани которых полировались с высокой степенью плоскопараллельности (до  $10^{-6}$ ), поскольку оптическим резонатором, как и в работах [4,5], являлся сам исследуемый кристалл. Образцы помещались в скрещенные  $E \perp H$  электрическое и магнитное поля внутри сверхпроводящего соленоида в жидком гелии. Электрическое поле ( $1 \div 2,5 \text{ кВ/см}$ ) прикладывалось в виде импульсов длительностью  $0,5 \text{ мкс}$  с частотой следования  $1 - 10 \text{ Гц}$ . Спектры излучения измерялись на длинноволновом ИК фурье-спектрометре [4,5] с разрешением  $0,1 \div 0,2 \text{ см}^{-1}$ . Излучение от образца подводилось к входу спектрометра с помощью световода из полированной металлической трубы диаметром  $20 \text{ мм}$ . Система регистрации включала быстродействующие фотоприемники из Ge:Ga и n-GaAs, помещаемые внутри того же криостата, либо в отдельном криостате на выходе спектрометра, а также стробинтегратор и АЦП, с выхода которого данные поступали на ЭВМ.

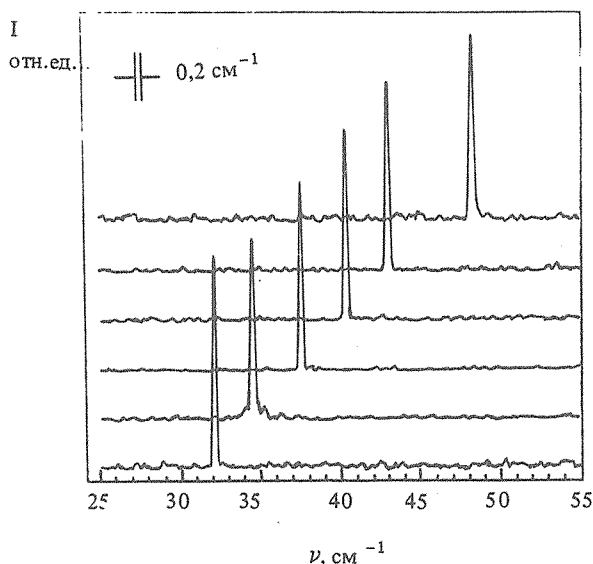
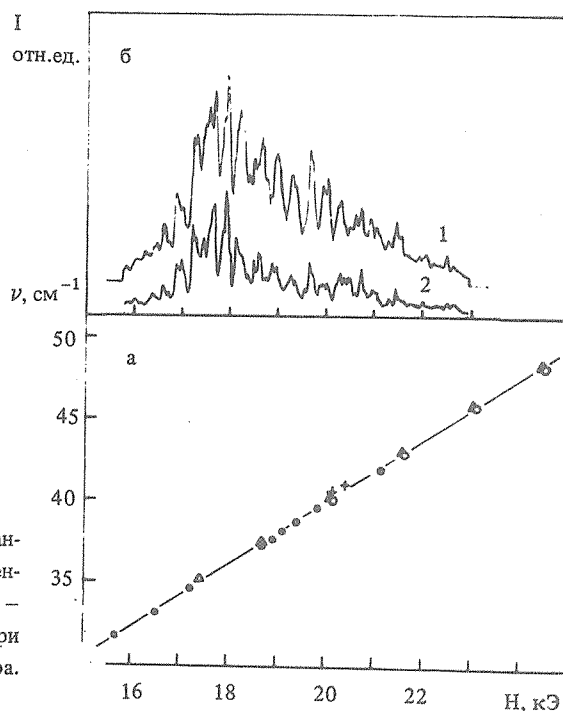


Рис. 3. Зависимости частоты (а) и интенсивности (б) стимулированного излучения от напряженности магнитного поля  $H$ . Экспериментальные точки соответствуют значениям  $E$ :  $\bullet$  —  $1,6 \text{ кВ/см}$ ,  $\Delta$  —  $1,9 \text{ кВ/см}$ ,  $+$  —  $2,1 \text{ кВ/см}$ ,  $o$  —  $2,4 \text{ кВ/см}$ . 1 — приемник внутри криостата с образцом, 2 — приемник на выходе спектрометра.

Рис. 2. Спектры стимулированного излучения p-Ge ( $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) в полях  $E \perp H$ , измеренные при значениях полей  $H$  (и  $E$ ):  $15,8$  (1,4);  $17,3$  (1,6);  $18,7$  (1,9);  $20,2$  (1,9);  $21,6$  (1,9);  $24,5 \text{ кЭ}$  ( $2,5 \text{ кВ/см}$ ) (слева направо).



В образцах p-Ge ( $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) при определенных напряженностях полей  $E$  и  $H$  ( $E = 1,5 - 2,5 \text{ кВ/см}$ ,  $H = 15 - 25 \text{ кЭ}$ ) в полосе чувствительности приемника n-GaAs зарегистрирована генерация стимулированного излучения, проявляющаяся в резком (на 2–3 порядка) возрастании мощности излучения по сравнению со спонтанным. Спектр обнаруженного стимулированного излучения, как следует из проведенных измерений (рис. 1), представлен узкой линией излучения, ширина которой не превышает ширины аппаратной функции спектрометра  $\delta \nu \leq 0,1 \text{ см}^{-1}$ . Излучение наблюдается в диапазоне  $\nu = 30 - 50 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 200 - 350 \text{ мкм}$ ). Частота линии излучения, как видно из рис. 2, 3, непрерывно и линейно увеличивается с ростом напряженности магнитного поля.

В отличие от зависимости  $\nu(H)$ , которая является монотонной во всем исследованном интервале полей, интенсивность излучения, как видно из рис. 3, обнаруживает немонотонные изменения — осциллирует при изменении магнитного поля (с периодом  $\sim 0,3 - 0,4 \text{ кЭ}$ ). Сопоставление этих изменений, зарегистрированных внутри криостата с образцом (кривая 1) и на выходе спектрометра (кривая 2), обнаруживает их полное соответствие, что позволяет исключить влияние интерференционных эффектов в оптическом тракте.

Полученные данные, в том числе измеренные спектры стимулированного излучения, которые представлены узкой линией, свидетельствуют об отличии природы явления от обычных межподзонных дырочных переходов и не противоречат выводам /6/ о циклотронной природе стимулированного излучения в слаболегированных кристаллах р-Ge. В отличие от межподзонных дырочных переходов обычного типа, характеризующихся широкими спектральными полосами усиления /4,5/, в данном случае области усиления, очевидно, существенно уже. Это обуславливает высокую монохроматичность излучения и отсутствие в спектре проявлений модовой структуры (модовая структура выходит за пределы спектральной области усиления). В амплитудных характеристиках, т.е. в зависимости интенсивности излучения от магнитного поля, эта структура, напротив, вполне может проявиться, что и наблюдается при достаточно медленном изменении  $H$  (рис. 3). Говоря о природе обнаруженного излучения, следует заметить, что это явление, видимо, выходит за рамки интерпретации /6/. Как следует из расчетов /7/, не исключено, что здесь существенную роль могут играть не только эффекты, связанные с опустошением нижних уровней Ландау легких дырок /6/, но также особенности в величине матричного элемента  $|M_{nm}|^2$  переходов между подзонами легких и тяжелых дырок в р-Ge, возникающие на частотах, близких к частоте циклотронного резонанса легких дырок, из-за вырождения и перемешивания волновых функций легких и тяжелых дырок в этих состояниях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе. Сб. статей под ред. А.А.Андропова, Горький, ИПФ АН СССР, 1986.
2. Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках. Сб. статей, Горький, ИПФ АН СССР, 1987.
3. Мурзин В. Н., Чеботарев А. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 17 (1986).
4. Митягин Ю. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 30 (1986).
5. Андронов А. А. и др. Квантовая электроника, 14, 702 (1987).
6. Васильев Ю. Б., Иванов Ю. Л. Письма в ЖТФ, 9 вып. 10, 613 (1983); 10 вып. 15, 949 (1984); Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе. В сб. статей под ред. А.А.Андропова, Горький, ИПФ АН СССР, 1986, с. 102.
7. Стоклик С. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 36 (1987).

Поступила в редакцию 17 апреля 1987 г.