

МОДОВЫЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛИННОВОЛНОВОГО ИК ЛАЗЕРА НА ГОРЯЧИХ ДЫРКАХ В ГЕРМАНИИ

Ю.А. Митягин, А.В. Муравьев*, В.Н. Мурзин, Ю.Н. Ноздрин*, С.А. Павлов*, С.А. Стоклицкий, И.Е. Трофимов,
А.П. Чеботарев, В.Н. Шастин*

Обнаружена тонкая структура длинноволновых ИК спектров стимулированного излучения лазеров на горячих дырках в германии. Показано, что лазерная генерация осуществляется на резонаторных модах кристалла в результате полного внутреннего отражения от торцевых и боковых граней.

Интерес к горячей плазме носителей тока в полупроводниках обусловлен перспективностью ее использования в качестве активной среды длинноволновых ИК лазеров. Ранее было установлено существование эффекта накопления носителей в р-Ge в $\vec{E} \perp \vec{H}$ полях и реализована лазерная генерация на прямых оптических переходах между подзонами легких и тяжелых дырок [1-4]. В настоящей работе проведены исследования спектрального состава стимулированного излучения р-Ge с высоким разрешением методами фурье-спектроскопии, обнаружена тонкая структура спектров и приведены соображения о природе этого явления.

Исследования выполнены на автоматизированном длинноволновом ИК фурье-спектрометре ФИАН, созданном на базе интерферометра МК-3 ("Grubb - Parsons", Англия). Спектрометр позволяет вести измерения импульсных сигналов и обеспечивает спектральное разрешение вплоть до $0,1 \text{ см}^{-1}$. Кристаллы р-Ge имели вид прямоугольных параллелепипедов с высокой степенью параллельности граней. Постоянное магнитное поле $H = 0 \div 30 \text{ кЭ}$ направлялось вдоль главной оси образца, а электрическое $E = 0 \div 3 \text{ кВ/см}$ в виде импульсов длительностью $\sim 10^{-6} \text{ с}$ прикладывалось к боковым граням. В качестве приемника излучения использовался Ge (Ga). Измерения проводились при температуре жидкого гелия.

В [3-6] было показано, что лазерная генерация в р-Ge осуществляется в виде полос излучения шириной $10-20 \text{ см}^{-1}$, которые перестраиваются по частоте с ростом магнитного поля и обусловлены переходами между уровнями Ландау подзоны легких дырок и подзоной тяжелых дырок. В настоящей работе обнаружено, что полосы излучения состоят из большого набора очень узких (порядка спектрального разрешения прибора $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$) линий (рис. 1). Положение линий, как следует из измерений, не зависит от напряженности магнитного и электрического полей. В то же время тонкая структура спектров оказывается различной в зависимости от размеров образцов (рис. 2). В целом структура спектров является сложной, однако в положении линий прослеживается определенная периодичность, период которой возрастает с уменьшением поперечного размера образца ($\Delta\nu = 1,1 \text{ см}^{-1}$; $2,0 \text{ см}^{-1}$; $7,0 \text{ см}^{-1}$ для образцов № 1, 2, 3 (табл. 1)).

Обнаруженная структура спектров очевидно не связана с особенностями частотной зависимости коэффициента усиления (не зависит от E и H), не может быть объяснена эффектами типа интерференции в окнах и других оптических элементах установки (добротность последних недостаточна для выделения столь узких линий) и обусловлена свойствами резонатора, которым в данном случае является сам исследуемый кристалл. Поскольку коэффициент усиления на горячих носителях в р-Ge мал ($a \sim 0,01-0,04 \text{ см}^{-1}$) /4,6,7/, генерация может идти только на модах, испытывающих полное внутреннее отражение от граней кристалла. Согласно теории [8], в прямоугольном резонаторе заданных размеров (табл. 1) плотность мод оказывается высокой (расстояние между модами $\sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$), т.е. резонатор должен быть практически неселективным.

Для объяснения наблюдаемой структуры спектров следует предположить, что в данном случае имеет место селекция мод, обусловленная изменением коэффициента отражения от граней в зависимости от угла падения. Учитывая малую величину коэффициента усиления и несовершенство боковых граней (границы, на которые нанесены контакты, видимо вообще можно не учитывать из-за их более низкого качества), можно предположить, что предпочтительными для генерации будут моды, испытывающие наименьшее

* Институт прикладной физики АН СССР, г. Горький.

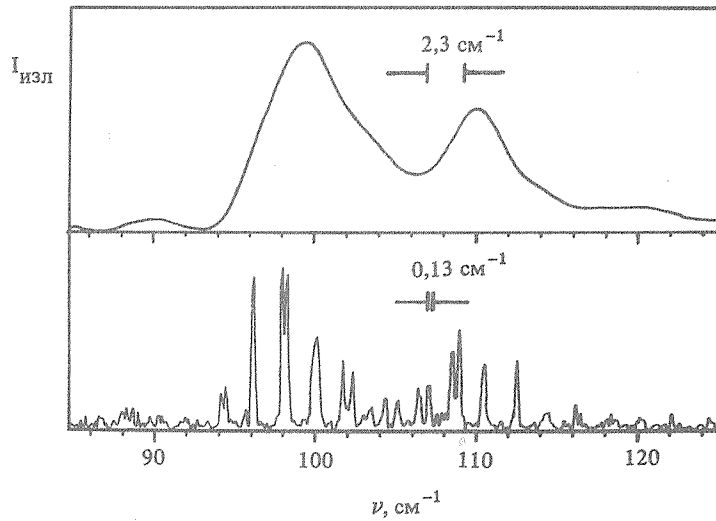


Рис. 1. Спектры стимулированного излучения p-Ge (образец № 2), измеренные с различным разрешением при $H = 13,0$ кЭ и $E = 2,0$ кВ/см.

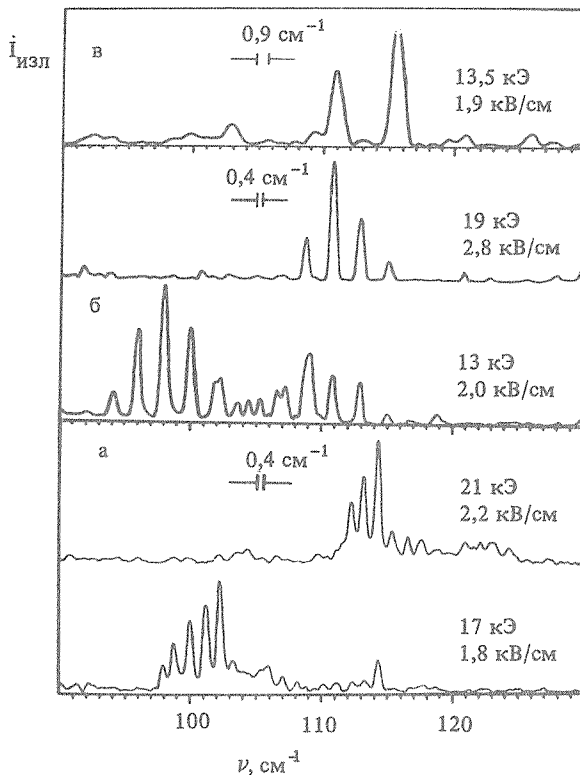


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения трех лазеров на p-Ge, отличающихся геометрическими размерами, при различных значениях E и H (а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3).

число отражений за проход, т.е. волновой вектор которых образует наименьший угол β с главной осью кристалла, в данном случае близкий к углу полного внутреннего отражения от торцевой грани. Поперечная компонента k_x и расстояние между модами при этом имеют вид:

$$k_x = \pi i/a \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad \Delta\nu = 1/2n \sin\beta = 1/2n_0 a, \quad (1)$$

где n и n_0 — показатели преломления германия и жидкого гелия, a — толщина кристалла (табл. 1). Получающиеся согласно (1) оценки $\Delta\nu = 1,7; 2,5$ и $7,1 \text{ см}^{-1}$ для $a = 0,3; 0,2$ и $0,07 \text{ см}$ (образцы № 1, 2, 3) примерно соответствуют данным эксперимента. Приведенные соображения объясняют основные закономерности явления, однако для описания обнаруженных спектров требуется специальное теоретическое рассмотрение.

Т а б л и ц а 1

Характеристики исследованных образцов

Образец №	Размеры, мм	Расстояние между контактами, мм	Концентрации примесей N_A , см^{-3}
1	3×6×30	6	10^{14}
2	2×5×50	5	$7 \cdot 10^{13}$
3	0,7×5×50	5	$7 \cdot 10^{13}$

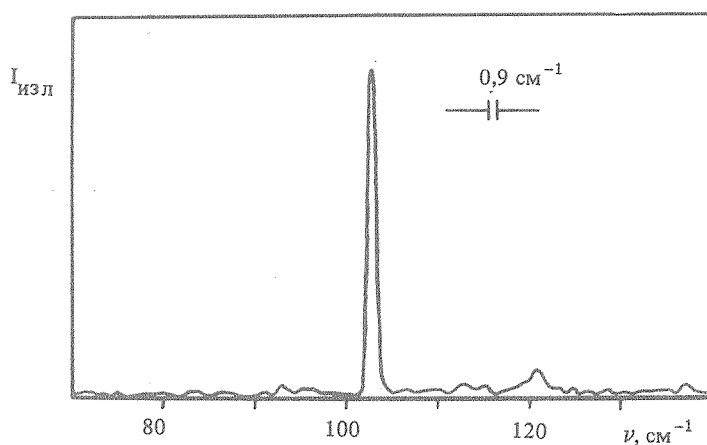


Рис. 3. Спектр одномодовой генерации лазера на р-Ge (образец № 3) при $N = 11,6 \text{ кЭ}$ и $E = 1,6 \text{ кВ/см}$.

С учетом полученных данных в настоящей работе реализован монохроматический режим генерации (рис. 3). При его осуществлении использовалось то обстоятельство, что расстояние между линиями генерации растет с уменьшением толщины a кристалла. Это позволило выбором размеров кристалла и напряженностей E и N полей создать ситуацию, при которой в полосу генерации попадает только одна линия. Монохроматическое лазерное излучение получено на образце с размерами $0,7 \times 5 \times 50 \text{ мм}^3$. Лазер работал на частоте 103 см^{-1} (97 мкм). Ширина линии излучения не превышает $0,1 \text{ см}^{-1}$, мощность излучения $0,05 - 0,1 \text{ Вт}$, частота следования импульсов $10 - 50 \text{ Гц}$.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что созданный новый тип твердотельного лазера на горячих носителях обладает достаточно хорошими характеристиками и может эффективно использоваться в длинноволновой ИК спектроскопии высокого разрешения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Л. Е. и др. Письма ЖЭТФ, 35, 360 (1982).
2. Андронов А. А. и др. Письма ЖЭТФ, 40, 69 (1984).
3. Komijama S., Izuка N., Akasaka Y. Appl. Phys. Lett., 47, 958 (1985).
4. Мурзин В. Н., Чеботарев А. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 17 (1986).
5. Муравьев А. В., Ноздрин Ю. Н., Шасти́н В. Н. Письма ЖЭТФ, 43, 348 (1986).
6. Komijama S., Kigoda S. Solid State Commun., 59, 167 (1986).
7. Андронов А. А., Ноздрин Ю. Н., Шасти́н В. Н. Изв. АН СССР, сер. физ., 50, 1103 (1986).
8. Демтрёдер В. Лазерная спектроскопия. М., Наука, 1985.

Поступила в редакцию 30 июля 1986 г.