

ПЕРЕСТРОЙКА СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА *p*-Ge ПРИ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Демиховский С. В., Муравьев А. В., Павлов С. Г., Шастин В. Н.

Проведены спектральные исследования длинноволнового ИК лазера на горячих дырках Ge в $E \perp H$ полях при одноосной деформации активного элемента в направлении $[110]$. Обнаружены эффект непрерывной перестройки от 54 до 74 см^{-1} и увеличение максимума спектральной интенсивности излучения лазера и его КПД в 1.5—2 раза. Авторы связывают наблюдаемые эффекты с уменьшением межподзонного примесного рассеяния и изменением спектров состояний дырок вблизи дна валентной зоны (включая примесные).

В последнее время можно говорить о возрастании интереса к спектральным исследованиям в области длинноволнового инфракрасного излучения [1]. В этом отношении представляется важным всестороннее исследование полупроводникового лазера на межподзонных переходах горячих дырок *p*-Ge в скрещенных электрическом E и магнитном H полях [2], что, в частности, будет способствовать созданию на его основе достаточно мощного перестраиваемого и источника в диапазоне длин волн 75—200 мкм.

Одним из факторов, способных значительно повлиять на параметры излучения лазера, является одноосная деформация активного элемента. Такая деформация, как известно [3], приводит к существенному изменению состояний вблизи дна валентной зоны, что должно отразиться на эффектах усиления на межподзонных переходах. В работе [4] отмечались значительное (в 100 раз) увеличение спектральной интенсивности излучения в диапазоне длин волн свыше 170 мкм и расширение спектрального диапазона стимулированного излучения при давлении $P \approx 500 \text{ кг/см}^2$ в направлении $[112]$, $E \parallel [110]$, $H \parallel [111]$. Это сопровождалось расширением области значений E и H полей, в которых наблюдается генерация, и появлением новых спектральных линий 151 и 164 мкм.

Целью настоящей работы было исследование влияния одноосной деформации на спектр излучения лазера на *p*-Ge в другой конфигурации полей и давления: $P \parallel H \parallel [110]$, $E \parallel [110]$. Исследования проводились на образцах с характерными размерами $2.5 \times 5.4 \times 50.0 \text{ мм}$, с концентрациями легирующей примеси (Ga) $N_a^- - N_d^+ = 7 \cdot 10^{13}$ и $9.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. На боковые грани $[110]$ наносились омические контакты. Давление прикладывалось параллельно H через зеркала внешнего резонатора, одно из которых имело 1%-й вывод излучения (рис. 1). В качестве изолятора между образцом и зеркалами использовался тефлон толщиной 20 мкм. Давление могло плавно изменяться в пределах 0—500 кг/см^2 . Для спектральных измерений использовался решетчатый монохроматор с разрешением 1 мкм. Излучение регистрировалось охлаждаемыми фотоприемниками *p*-Ge(Ga) и *n*-GaAs.

Недавно было обнаружено, что в лазере на недеформированном *p*-Ge наряду с высокочастотной ($\lambda = 75\text{—}140 \text{ мкм}$, область V) и низкочастотной ($\lambda = 175\text{—}195 \text{ мкм}$ — полоса G) областями генерации при некоторых условиях имеет место излучение в полосе длин волн 155—157 мкм (полоса E) [5]. Каждый из этих диапазонов имеет свою зону генерации на плоскости параметров E и H полей (рис. 1). Согласно этой работе, обозначения G , E и V выбраны в соответствии с корреляцией положения частот генерации линиям примесного поглощения

в p -Ge [6] (V соответствует переходам в континуум состояний валентной зоны). Оговоримся, что усиление на примесных переходах является не основным, а лишь дополнительным к усилению на межподзонных переходах дырок [5].

Характерные спектры излучения лазера на p -Ge с $N_a - N_d = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ приведены на рис. 2 для значений приложенных полей $E = 880 \text{ В/см}$, $H = 8.3 \text{ кЭ}$, в которых имеет место генерация во всех трех частотных диапазонах. Заметим, что, изменяя приложенные поля, можно выбрать режим генерации в одном из этих частотных диапазонов (рис. 1). Как видно из рис. 2, увеличение деформации кристалла Ge приводит к непрерывной перестройке спектра стимулированного излучения полосы G в высокочастотную область; при этом изменение спектра в полосе частот E , а тем более области V выражено значительно слабее. Перестройка спектра сопровождалась некоторым увеличением максимальной спектральной интенсивности излучения лазера, за исключением области

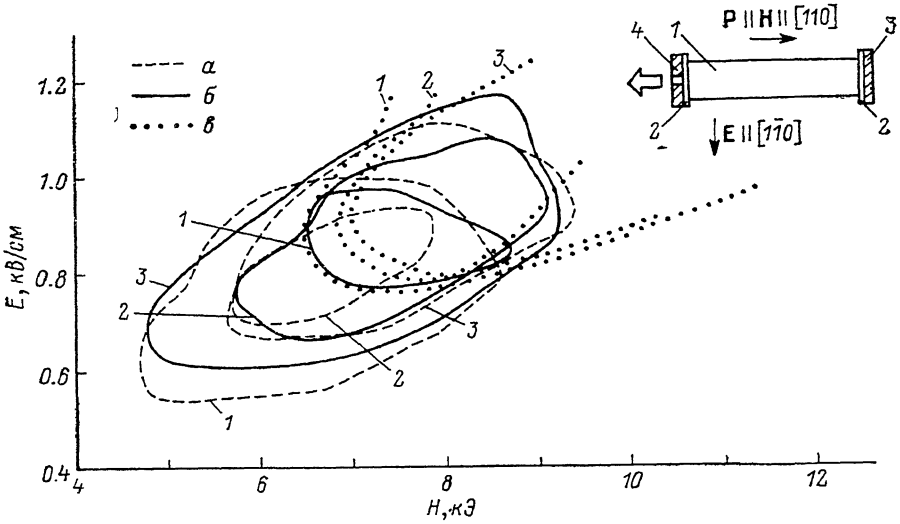


Рис. 1. Изменение зон генерации от давления для трех частотных диапазонов $G(a)$, $E(b)$, $V(g)$.

P , кг/см^2 : 1 — 0, 2 — 300, 3 — 500. На вставке приведена конструкция лазера: 1 — кристалл p -Ge, 2 — тефлоновая пленка, 3 — глухое зеркало, 4 — выходное зеркало.

$P \approx 100 \text{ кг/см}^2$, где интенсивность излучения имеет явно выраженный минимум, особенно в полосе G (ср. [7]). Зона генерации по электрическому и магнитному полям полосы E расширяется с увеличением давления в области меньших полей; зона генерации полосы G при давлении $\sim 100 \text{ кг/см}^2$ заметно уменьшается, а затем с ростом давления расширяется, смещаясь в более сильные поля.

Задержка появления генерации относительно начала импульса возбуждения в спектральной полосе E (без давления — самая большая по сравнению с G и областью V) уменьшается с ростом давления и, начиная с $P \geq 480 \text{ кг/см}^2$, сравнивается с задержкой появления генерации в полосе G . В образцах с концентрацией примеси $N_a - N_d = 9.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ генерация в полосе E появлялась лишь при $P \geq 300 \text{ кг/см}^2$. При $P \geq 500 \text{ кг/см}^2$ спектры излучения полос G , E и области V практически перекрывались.

Таким образом, обнаружен эффект непрерывной частотной перестройки полосы G в высокочастотную область от 185 до 135 мкм при изменении давления от 0 до 500 кг/см^2 . Перестройка спектра излучения сопровождалась увеличением максимума спектральной интенсивности в 1.5–2 раза с ростом P до 500 кг/см^2 . Существенно, что значительного роста спектральной интенсивности в области длин волн $> 170 \text{ мкм}$, на что указывалось в [4], не обнаружено. Заметим, что при использовании фотоприемника Ge с мелкой примесью появление полосы E и смещение полосы G в коротковолновую часть спектра (где спектральная чувствительность фотоприемника Ge существенно возрастает) приводит к увеличению сигнала на 1.5–2 порядка.

Стимулированное излучение лазера на p -Ge определяется инверсией населенностей между состояниями легких и тяжелых дырок. Перезаселенность состояний легких дырок в свою очередь зависит от процессов рассеяния легких дырок на примесях, акустических фононах, а также от межподзонного туннелирования. С одной стороны, одноосная деформация кристалла, снимающая вырожденные подзон легких и тяжелых дырок вблизи дна валентной зоны, уменьшает межподзонное примесное рассеяние, что увеличивает времена жизни легких дырок и таким образом приводит к росту спектральной интенсивности излучения [4]. С другой стороны, гибридизация состояний легких и тяжелых дырок в $E \perp H$ полях также существенно меняется при деформации, изменяя как время туннелирования легких дырок в тяжелые, так и матричные элементы оптических

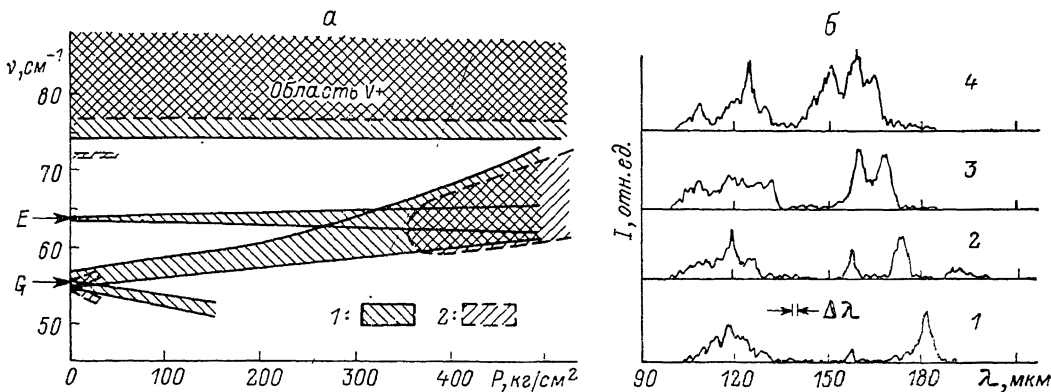


Рис. 2. Изменение спектрального состава излучения лазера от давления для двух концентраций легирующей примеси p -Ge(Ga) (а); зависимость спектра излучения лазера на p -Ge от давления [фотоприемник n -GaAs (б)].

а) $N_a - N_d$, см^{-3} : 1 — $7 \cdot 10^{13}$, 2 — $9.2 \cdot 10^{13}$; б) P , кг/см^2 : 1 — 0, 2 — 150, 3 — 310, 4 — 480.

переходов. Последнее особенно важно в связи с дополнительным усилением на переходах между уровнями Ландау легких дырок на циклотронном резонансе [8] и его гармониках [9]. Следует заметить, что межподзонное туннелирование в $E \perp H$ полях в условиях квантования Ландау состояний дырок носит довольно сложный характер и не локализовано на дне валентной зоны [8, 9]. По-видимому, вероятность туннелирования с ростом давления может меняться немонотонно, чем объясняется немонотонный характер изменения интенсивности в полосе G .

Частотная перестройка может объясняться, по мнению авторов, расщеплением подзон легких и тяжелых дырок, а также примесных состояний под давлением. Более детальное обсуждение этого вопроса требует дополнительных исследований.

В заключение подчеркнем, что деформация активного элемента увеличивает коэффициент полезного действия и позволяет перекрыть частотный провал для данного типа лазеров в области $55\text{--}80 \text{ см}^{-1}$, что расширяет возможности их практического применения.

Список литературы

- [1] Proc. 14 Int. Conf. Inf. Millimeter Waves, Würzburg, FRG. 1989 // «Inf. Millimeter Waves». N. Y., 1990.
- [2] Авдронов А. А., Ноздрин Ю. Н., Шастин В. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. В. 6. С. 1103—1110.
- [3] Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1972. 584 с.
- [4] Komiyama S., Kuroda S. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 1274—1280.
- [5] Муравьев А. В., Павлов С. Г., Шастин В. Н. // Тр. XII Всес. конф. по физике полупроводников. Киев, 1990.
- [6] Jones R. L., Fisher P. // J. Phys. Chem. Sol. 1965. V. 26. N 7. P. 1125—1133.

- [7] Гавриленко В. И., Никоноров В. В. // Тез. докл. конф. молодых ученых «Горячие электроны и коллективные явления в полупроводниках». Вильнюс, 1990. С. 58—59.
- [8] Митягин Ю. А., Мурзин В. Н., Стоклицкий С. А., Трофимов И. Е. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 3. С. 116—119.
- [9] Муравьев А. В., Ноздрин Ю. Н., Шастина В. Н. // Письма ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 5. С. 241—244.

Институт прикладной
физики АН СССР
Нижний Новгород

Получена 17.07.1990
Принята к печати 17.08.1990
