

КОНДЕНСАЦИЯ СПЕКТРА ВБЛИЗИ ЛИНИИ ПРИМЕСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛАЗЕРЕ НА ГОРЯЧИХ ДЫРКАХ ГЕРМАНИЯ

А.В.Муравьев, С.Г.Павлов, Е.Е.Орлова, В.Н.Шастин, Б.А.Андреев*

Институт физики микроструктур РАН
603600 Нижний Новгород, Россия

*Институт химии высококочистых веществ РАН
603600 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 27 декабря 1994

На основе проведенных измерений спектров излучения лазера длинноволнового инфракрасного диапазона на межподзонных переходах горячих дырок в p -Ge и спектра примесного поглощения в активном образце делается вывод об эффекте "конденсации спектра" излучения p -Ge-лазера вблизи линии поглощения на переходе с основного состояния мелкого акцептора в первое возбужденное.

Характерной особенностью лазера длинноволнового инфракрасного излучения на межподзонных переходах горячих дырок в p -Ge в скрещенных электрических и магнитных полях является необычно широкий спектр стимулированного излучения [1], имеющий линейчатую структуру, подобную структуре спектра поглощения легирующего акцептора. Последнее отмечалось в работах [2-5], в которых в качестве акцепторной примеси использовался галлий (энергия ионизации основного состояния $E_{Ga} = 11,07$ мэВ), и недавно было подтверждено измерением спектров излучения на германии, легированном таллием [6] ($E_{Tl} = 13,10$ мэВ). В работе [5] было показано, что рекомбинация на спонтанно излучаемых оптических фононах при фотоионизации основного состояния (g.s.) акцептора излучением, развивающимся на межподзонных ($l \rightarrow h$) переходах, может приводить к инверсной населенности возбужденных состояний (ex.s.) и соответствующему усилению на ex.s. \rightarrow g.s. оптических переходах. Это позволяет объяснить присутствие в спектрах стимулированного излучения так называемых E - и C -линий [4,5], но, учитывая экспериментальные данные (ср. [2,3]), не объясняет генерацию вблизи G линии поглощения (g.s. \rightarrow l^{*} ex.s.). Согласно альтернативной точке зрения, предложенной в работе [6], дискретный характер наблюдаемых спектров излучения p -Ge лазера формируется исключительно окнами прозрачности в спектре примесного поглощения в активном образце.

С целью прояснения механизма появления G -области генерации нами проведены детальные измерения спектра излучения Ge:Ga-лазера с улучшенным разрешением (до $0,3$ см $^{-1}$). Проведено сопоставление спектров стимулированного излучения со спектром примесного поглощения на исходном монокристалле Ge:Ga.

Активные образцы Ge:Ga-лазера (N_1 , N_2) изготавливались в форме прямоугольного параллелепипеда размером $5 \times 7 \times 50$ мм 3 из монокристалла Ge с концентрацией Ga центров $N_A = 7 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Магнитное поле $3 \div 20$ кЭ ориентировалось вдоль длинной оси образца в кристаллографическом направлении [110]. Импульсы электрического поля длительностью 4 мкс прикладывались через омические контакты, напыленные на боковые грани образца 5×50 мм 2 , так что приложенное поле $E \parallel [-110]$ ($E \perp H$). Торцы образца были оптически

обработаны со степенью взаимной плоскопараллельности 30". Стимулированное излучение развивалось на аксиальных модах резонатора Фабри-Перо, образованного приложенными к торцам образца через 20 мкм тефлоновую пленку плоскими медными зеркалами ($\varnothing 7$ и $\varnothing 4$ мм). Вывод излучения происходил за счет дифракции на меньшем зеркале. Излучение лазера пропусклось через решеточный монохроматор и принималось широкополосным охлаждаемым *n*-GaAs фотоприемником.

Спектр излучения лазера на активном образце Ge:Ga приведен на рис.1 (внизу) для таких значений приложенных *E* и *H* полей, где развиваются как низкочастотная, так и высокочастотная $\lambda < 140$ мкм генерация. Разрешающая способность спектрометра составляла $\sim 0,3 \text{ см}^{-1}$.

На рис.1 (вверху) приведены спектр поглощения пластинки германия Ge:Ga толщиной 2,5 мм, вырезанной из того же монокристалла, что и активный образец лазера. Спектр поглощения получен на фурье-спектрометре с разрешением 0,02 мкм при температуре жидкого гелия в отсутствие внешних полей. Все линии поглощения (обозначения от *A'* до *G* по работе [7]) относятся к Ga акцептору, а слабое расщепление линий, по-видимому, связано с наличием внутренних напряжений в пластинке Ge. Линии других мелких акцепторов в спектре не обнаружены. Заметим, что прямое измерение спектра поглощения на мелких примесных центрах в присутствии *E* \perp *H* полей затруднено по причине ударной ионизации последних, а теоретический анализ локализованных состояний в таких сильных *E* \perp *H* полях не проводился.

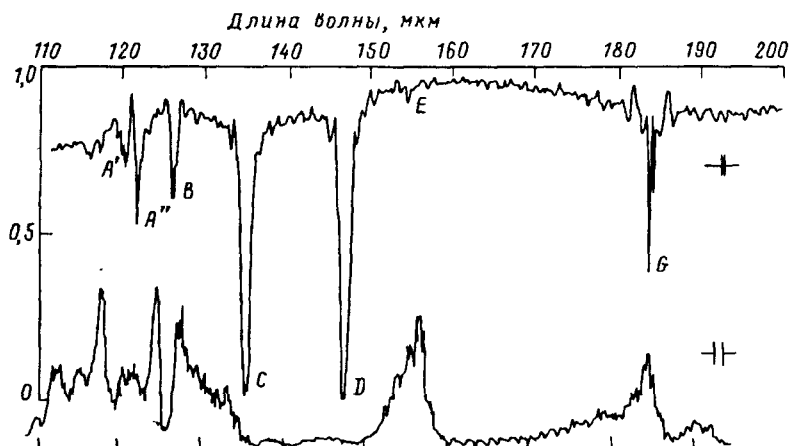


Рис.1. Внизу: спектр излучения лазера на Ge:Ga в полях: *E* = 750 В/см, *H* = 6,3 кЭ, образец N1. Вверху: спектр поглощения Ge : Ga

Корреляция спектров поглощения и стимулированного излучения очевидна. Пик в спектре излучения на длине волны 133 мкм с "синей" стороны от линии поглощения *C* соответствует линии излучения "C", обнаруженной в работе [4], а широкая линия на 155 мкм – линии *E* [2]. В области линии поглощения *G* на всех исследованных образцах наблюдается узкий спектральный пик излучения на 183,5 мкм и провал на 186,5 мкм, которые практически не перестраиваются при изменении приложенных полей. На рис.2 приведены спектры излучения лазера вблизи линии поглощения *G* в полях, для которых

отсутствует излучение на более высоких частотах. В этом случае генерация излучения в области линии G не подавлена конкуренцией со стороны высокочастотной части спектра [2, 3], и указанные спектральные особенности более выражены. Разрешение спектрометра удалось улучшить до $0,2 \text{ см}^{-1}$ (рис.2а).

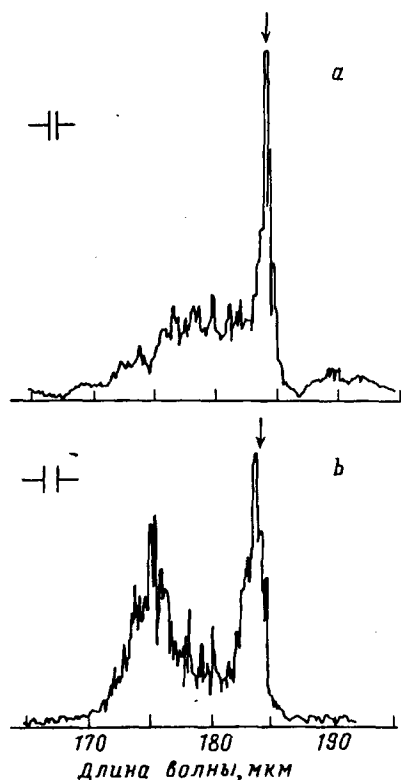


Рис.2. а - Спектр излучения лазера на Ge:Ga в полях: $E = 660 \text{ В/см}$, $H = 5,9 \text{ кЭ}$, образец N1; б - $E = 620 \text{ В/см}$, $H = 5,7 \text{ кЭ}$, образец N2. Стрелкой отмечено положение линии поглощения G

Общая спектральная ширина полосы излучения в области линии G в целом индивидуальна для каждого образца (см рис.2), зависит от значений приложенных полей и составляет $15\text{-}25 \text{ мкм}$ ($5\text{-}10 \text{ см}^{-1}$). Провал в излучении на $186,5 \text{ мкм}$, по-видимому соответствует положению линии поглощения G в присутствии полей, как было предположено в работе [6]. Однако только примесным поглощением невозможно объяснить общую структуру наблюдаемых спектров излучения $p\text{-Ge}$ лазера.

По мнению авторов пик на $183,5 \text{ мкм}$ (для Ge:Ga-лазера), измеренная спектральная ширина которого ($\Delta\lambda \approx 0,7 - 1 \text{ мкм}$) определялась фактически разрешением спектрометра, а спектральная интенсивность в 2-4 раза превышает общий уровень, возникает благодаря "конденсации спектра" вблизи линии примесного поглощения G . Эффект конденсации спектра хорошо известен в лазерах на красителях и может быть вызван целым рядом причин [8, 9], связанных с особенностями нелинейной динамики развития стимулированного излучения.

Важно отметить, что исследованный в работе [6] спектр излучения Ge:Tl-лазера в соответствующих полях подобен спектру излучения Ge:Ga-лазера с тем лишь отличием, что он сдвинут в соответствии с положением линий поглощения таллия: пик вблизи линии G находится на частоте 72 см^{-1} , провал

– 71 см^{-1} (значение для G -перехода [7] $71,8 \text{ см}^{-1}$); а области излучения вблизи E -линии соответствует интервал $78,4 - 81,3 \text{ см}^{-1}$ ($79,5 \text{ см}^{-1}$). При этом вся низкочастотная часть спектра генерации также сместилась в коротковолновую часть вслед за смещением линии G .

Так как спектр усиления на межподзонных переходах в p -Ge-лазере определяется суперпозицией однородно уширенных ($\Delta\nu \simeq 10 \text{ см}^{-1}$) линий, соответствующих разным значениям продольного импульса для нижнего населенного уровня Ландау легких дырок [10], наличие относительно узкой ($\delta\nu \simeq 1 \text{ см}^{-1}$) линии поглощения должно приводить к увеличению параметра насыщения и соответствующего коэффициента усиления в нелинейном режиме на соседних частотах в полосе однородного уширения. Это, по нашему мнению, объясняет "конденсацию" низкочастотной области генерации лазера вблизи поглощающего $g.s. \rightarrow 1^{st}ex.s.$ перехода. Подобный механизм обсуждается в отношении эффекта "конденсации спектра" в лазерах на красителях [11].

Узкий спектральный пик излучения в коротковолновом крыле линии поглощения G может быть также объяснен периодической пространственной модуляцией примесного поглощения (связанной с распределением поля излучения в резонаторе), и, как следствие, селективным усилением излучения. Невыраженность эффекта с длинноволновой стороны от линии поглощения обусловлена дополнительным поглощением на переходах в валентную зону ($1^{st}ex.s. \rightarrow cont.s.$), сказывающемся преимущественно на низких частотах. Последнее зависит от ширины линии поглощения и степени синхронизации мод лазера и требует дополнительных исследований.

Авторы выражают благодарность Вл.В. и В.В. Кочаровским и Р.А.Ахмеджанову за полезное обсуждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93-02-14661 и 94-03-09791).

1. Optical and Quantum Electronics, **23**(2), S111-S321 (1991). (Special issue on far-infrared semiconductor lasers).
2. А.В.Муравьев, С.Г.Павлов, В.Н.Шастин, Письма в ЖЭТФ **52**, 959 (1990).
3. S.V.Demihovsky, A.V.Murav'ev, S.G.Pavlov and V.N.Shastin, Semicond. Sci. Technol **7**, B622 (1992).
4. Yu.A.Mityagin, V.N.Murzin, O.N.Stepanov and S.A.Stoklitsky, Semicond. Sci. Technol **7**, B641 (1992).
5. А.В.Муравьев, Е.Е.Орлова, С.Г.Павлов, В.Н.Шастин, Письма в ЖЭТФ **59**, 86 (1994).
6. W.Heiss, K.Unterrainer, E.Gornik et al., Semicond. Sci. Technol. **9**, 638 (1994).
7. R.L.Jones and P.Fisher, J. Phys. Chem. Solids **26**, 1125 (1965).
8. Я.І.Khanin et al., Opt. Comms. **32**(3), 456 (1980).
9. В.В.Васильев, В.С.Егоров, А.Н.Федоров, И.А.Чехонин, Оптика и спектроскопия **76**, 146 (1994).
10. А.В.Муравьев, Ю.Н.Ноздрин, В.Н.Шастин, Письма в ЖЭТФ **43**, 348 (1986).
11. Р.А. Ахмеджанов и др., готовится к печати.