

ДАЛЬНЕЕ ИК ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК ГЕРМАНИЯ ПРИ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ОДНООСНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В.М.Бондар, Л.Е.Воробьев*, А.Т.Далакян, В.Н.Тулупенко⁺¹⁾, Д.А.Фирсов*

Институт физики НАН Украины
252650 Киев, Украина

* Санкт-Петербургский государственный университет
195251 Санкт-Петербург, Россия

+ Донбасская государственная машиностроительная академия
343913 Краматорск, Украина

Поступила в редакцию 14 июля 1999 г.

Обосновываются преимущества скрещенных направлений электрического поля и одноосного давления по сравнению с их совпадающими направлениями для получения лазерного эффекта ($\lambda \cong 100$ мкм) в дырочном германии. Представлены результаты первых экспериментов по исследованию дальнего ИК излучения при взаимно перпендикулярных направлениях поля и давления. Зависимости интенсивности излучения от величины давления в различных электрических полях объясняются различной заселенностью дырками состояний примесного центра, расщепленных одноосным давлением.

PACS: 42.55.Px

О возможности создания германиевого лазера для дальнего ИК диапазона при $T = 77$ К. В 80-е годы разработан ряд активных приборов дальнего ИК (ДИК) диапазона на основе дырочного германия [1]. Наиболее мощным из них является лазер на межподзонных переходах дырок в скрещенных электрическом, E , и магнитном, B , полях [2]. К сожалению, все эти приборы могут эффективно работать только при гелиевых и водородных температурах, что ограничивает сферу их применения. Поэтому создание генераторов ДИК диапазона, работающих при температуре жидкого азота и выше, является актуальной задачей физики полупроводников. Некоторые надежды на ее решение дает обнаруженная в работе [3] генерация излучения ($\lambda \approx 100$ мкм), которая возникает в дырочном германии (!) при совпадающих направлениях электрического поля (ЭП, $E = 1.5 : 3$ кВ/см) и одноосного давления (ОД, $X \approx 7 : 8$ кбар для $E \parallel X \parallel [111]$). Такой вывод может быть сделан на основании сравнения длин оптического пути в активной среде за один проход, необходимых для компенсации потерь и начала генерации в резонаторе, основанном на полном внутреннем отражении, для лазера на межподзонных переходах в скрещенных электрическом и магнитном полях (l_{EB}) и для лазера при одноосном сжатии [3] (l_{EX}). В первом случае $l_{EB} \geq 80 : 100$ мм [1], в то время как во втором $l_{EX} \leq 4$ мм [3].

Если считать, что основные потери связаны с дифракционным излучением, то при указанных выше величинах l_{EB} и l_{EX} коэффициент усиления активной среды в случае генерации [3], по меньшей мере, на порядок выше, чем для лазера на межподзонных переходах. Вместе с тем, следует отметить, что геометрия совпадающих

¹⁾ e-mail: tvn@laser.donetsk.ua

направлений ЭП и ОД не является оптимальной с точки зрения приборных приложений и проигрывает в этом плане геометрии скрещенных направлений в силу ряда причин. Во-первых, на условия возникновения стимулированного излучения отрицательное влияние оказывает статический домен сильного ЭП [4, 5], наличие которого приводит к высоким величинам пороговых давлений. Домен возникает вследствие изменения массы дырок в точке перегиба дисперсионной кривой $\epsilon(k)$ при $E \parallel X$ [6]. Отметим отсутствие такой особенности при $E \perp X$ – см. рис.1. Во-вторых, длина оптического пути за один проход в активной среде при совпадающих направлениях E и X в несколько раз меньше по сравнению со случаем скрещенных направлений. И, наконец, в последнем случае могут быть использованы внешние зеркала в качестве резонаторов, что технически трудно осуществимо для совпадающих направлений.

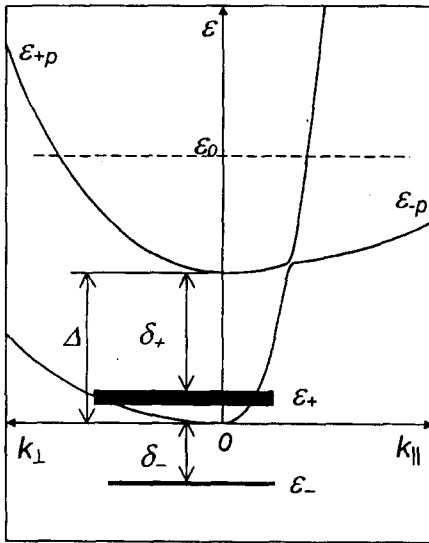


Рис.1. Схематичное представление структуры валентной зоны одноосно деформированного Ge (схематично) для давлений $X > X_{res}$, когда появляется резонансное состояние ϵ_+

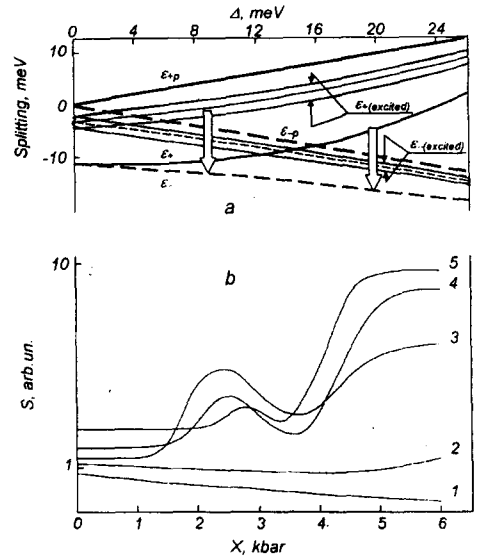


Рис.2. а) Зависимости расщепления валентных подзон и основного и возбужденных состояний примесных уровней от давления (ϵ_{+p} и ϵ_{-p} – значения энергии на дне соответствующих зон). Широкими стрелками показаны переходы, соответствующие максимуму спектральной чувствительности фотоприемника Ge(Ga) ($\lambda \approx 100$ мкм). б) Зависимости интенсивности излучения от величины ОД: $N_A - N_D \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T = 4.2 \text{ К}$, $X \parallel [111]$, E , кВ/см: 1 – 0.5; 2 – 1.0; 3 – 1.4; 4 – 1.7; 5 – 1.8

Физической причиной возникновения стимулированного излучения является инверсия в распределении дырок по расщепленным ОД примесным состояниям [7]. Известно, что ОД снимает вырождение как дырочных подзон при $k = 0$, так и примесных состояний [8], причем при изменении давления каждый из расщепленных примесных уровней следует за своей подзоной. При $X > X_{res}$ ($X_{res} \approx 2.8$ кбар для $X \parallel [100]$ и $X_{res} \approx 4$ кбар для $X \parallel [111]$) верхний расщепленный уровень ϵ_+ (основное состояние) попадает в непрерывный спектр нижней подзоны ϵ_- и становится резо-

нансным. Вследствие эффективного резонансного рассеяния (захвата) дырок [9] он оказывается частично заполненным. В то же время, нижний примесный уровень ϵ_- в запрещенной зоне опустошается вследствие пробоя в сильном ЭП. Благоприятным для возникновения инверсии оказывается также то обстоятельство, что глубина залегания δ_+ верхнего примесного уровня относительно своей подзоны ϵ_{+p} существенно больше соответствующей величины δ_- .

В работе [10] были представлены результаты влияния резонансных состояний на протекание электрического тока при $E \perp X$ для образцов Ge, вырезанных в различных кристаллографических направлениях, так что $X \parallel [111]$ и $X \parallel [100]$. В настоящей работе приводятся результаты исследований излучения в диапазоне $\lambda \approx 100$ мкм (максимум спектральной чувствительности фотоприемника Ge:Ga с фильтрами из кварца и черного полиэтилена) для аналогичных прямоугольных образцов при ортогональных направлениях ЭП и ОД при $R = 4.2$ К. Оптический сигнал записывался самописцем при развертке по давлению в условиях постоянной амплитуды импульсов электрического поля. Частота следования импульсов была около 70 Гц, длительность – 0,4 мкс.

Результаты экспериментов. На рис.2 представлены рассчитанные зависимости положений валентных подзон Ge [8] и уровней основного и возбужденных состояний мелкой примеси Ga (о построении этих кривых см. ниже) от величины расщепления между подзонами Δ и экспериментально определенные зависимости интенсивности спонтанного излучения от давления для одного из исследованных образцов ($X \parallel [111]$). Отметим соответствие между осями абсцисс: $\Delta = \alpha X$, $\alpha \cong 4$ мэВ/кбар.

Обращает на себя внимание немонотонный ход зависимостей интенсивности излучения. Увеличение оптического сигнала в районе 2.5 кбар мы связываем с оптическими переходами из группы первых возбужденных состояний $\epsilon_{+excited}$ (которые становятся резонансными при $X > 1$ кбар) в основное состояние уровня ϵ_- . Последующее уменьшение сигнала с ростом давления связано, по-видимому, с уширением этих состояний и с уменьшением глубины их залегания под дном верхней подзоны, что приводит к их опустошению в сильном ЭП. Максимум в районе 5 кбар может быть обусловлен переходами между основными состояниями ϵ_+ и ϵ_- . Отметим, что в этом случае запрет по четности состояний снимается наличием сильного ЭП. Аналогичные переходы наблюдались при совпадающих направлениях ЭП и ОД [3]. На рисунке широкими стрелками показаны соответствующие оптические переходы с одинаковой энергией кванта, соответствующей максимуму чувствительности фотоприемника.

Зависимости положения уровня ϵ_+ от давления получены соединением гладкой кривой трех точек. Первая – эта глубина залегания уровня Ga в недеформированном Ge (11.3 мэВ). Вторая соответствует появлению резонансного уровня (примерно 16 мэВ) и третья, для случая больших давлений $\Delta \geq 40$ мэВ (эта точка находится за пределами рисунка), взята из работы [11]. Первые 3 возбужденных состояния [11] с учетом их уширения показаны одной широкой полосой $\epsilon_{+excited}$ и построены подобным образом. Для обеспечения одинаковости подхода зависимости ϵ_- и $\epsilon_{-excited}$ находились аналогично, хотя положения этих уровней в зависимости от давления хорошо известны как из эксперимента [12], так и из расчетов [13] и хорошо совпадают со значениями, полученными указанным методом.

Качественно взаимное положение кривых на первом максимуме (рис.2b) мы объясняем следующим образом. Для возникновения заметного спонтанного излучения необходимо, чтобы заселенность нижних состояний не превышала заселенность верхних. При относительно слабых ЭП (кривые 1, 2) уровень ϵ_- еще остается заселенным (неполной опустошенностью основного состояния примеси, примерно в таких же полях, объясняется провал области генерации в диапазоне 120...160 мкм для лазера на межподзонных переходах дырок в Ge в скрещенных полях E и B [14]). С ростом ЭП населенность уровня ϵ_- дырками уменьшается, и возникает заметное спонтанное излучение – кривая 3. Дальнейший рост ЭП приводит к опустошению и возбужденных состояний $\epsilon_{+excited}$, по-видимому, вследствие пробоя и перехода дырок в "свою" подзону ϵ_{+p} . В результате интенсивность спонтанного излучения уменьшается – кривые 4 и 5.

Вывод о переходе дырок в свою подзону подтверждается тем, что во втором максимуме не происходит чередования кривых с ростом ЭП. В этом случае не происходит опустошения уровня ϵ_+ (основного состояния) вследствие большой глубины его залегания под дном своей подзоны δ_+ . В то же время, поскольку δ_- уменьшается с ростом давления, то в одинаковых электрических полях населенность уровня ϵ_- будет меньше при 5 кбар, чем при 2.5 кбар. Это находит отражение в том, что прирост интенсивности излучения и сами величины максимумов больше при 5 кбар, чем при 2.5 кбар.

Результаты, аналогичные приведенным на рис.2, получены и в случае $X \parallel [100]$ ($\alpha \approx 6$ мэВ/кбар). Если строить зависимости интенсивности излучения не от величины давления X , а от величины расщепления Δ , то положения максимумов по шкале абсцисс для обоих направлений давления практически совпадают.

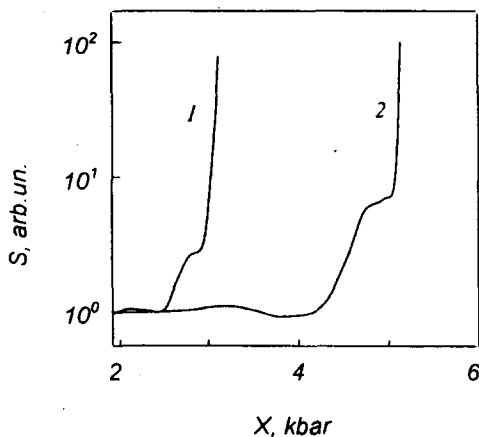


Рис.3. Зависимость интенсивности излучения от величины ОД при $T = 4.2$ К: 1 – $X \parallel [100]$, $N_A - N_D \approx 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, $E = 2.2$ кВ/см; 2 – $X \parallel [111]$, $N_A - N_D \approx 7 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, $E = 2.0$ кВ/см

Исходя из вышеизложенной картины, не вызывает удивления тот факт, что на некоторых образцах в максимуме спонтанного излучения был обнаружен скачок величины оптического сигнала на 2 порядка (см. рис.3). Прежде всего отметим, что величины давлений, соответствующих пороговому возрастанию сигнала, позволяют связать его возникновение с появлением резонансных состояний ϵ_+ . В таком случае можно сделать вывод, по аналогии с [3], что в сильных ЭП возникает генерация из-

лучения на модах полного внутреннего отражения, обусловленная внутрицентральной инверсией в распределении дырок.

Работа частично поддержана Украинским фондом фундаментальных исследований, (грант #2.4/970) и грантами МОПО Российской Федерации.

-
1. А.А.Андронов, *Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках*, Горький, ИПФ АН СССР, 1986.
 2. Л.Е.Воробьев, Ф.И.Осокин, В.И.Стафеев, В.Н.Тулупенко, Письма в ЖЭТФ **35**, 360 (1982).
 3. И.В.Алтухов, М.С.Каган, В.Н.Синис, Письма в ЖЭТФ **47**, 136 (1988).
 4. И.В.Алтухов, М.С.Каган, К.А.Королев, В.Н.Синис, ЖЭТФ **103**, 1829 (1993).
 5. В.Г.Белых, А.Т.Далакян, В.Н.Тулупенко, Д.А.Фирсов, ФТП **29**, 1764 (1995).
 6. В.К.Ridley and Т.В.Watkins, Proc. Phys. Soc. **78**, 293 (1961).
 7. И.В.Алтухов, М.Н.Каган, К.А.Королев и др., Письма в ЖЭТФ **59**, 455 (1994).
 8. Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус, *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*, М.: Наука, 1972.
 9. И.В.Алтухов, М.С.Каган, К.А.Королев и др., ЖЭТФ **115**, 89 (1999).
 10. В.М.Бондар, А.Т.Далакян, В.Н.Тулупенко, Д.А.Фирсов, Письма в ЖЭТФ **69**, 638 (1999).
 11. М.А.Одноблюдов, А.А.Пахомов, И.Н.Ясевич и др., ФТП **31**, 1180 (1997).
 12. Е.И.Воеводин, Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман и др., ФТП **8**, 1356 (1986).
 13. J.Brueckx and J.Vennik, Phys. Rev. **35**, B6165 (1987).
 14. С.Kremser, W.Heiss, and K.Unterrainer, Appl. Phys. Lett. **60**, 1785 (1992).