

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВНУТРИЦЕНТРОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СИЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОМ p -Ge

© И.В.Алтухов, М.С.Каган, К.А.Королев, В.П.Синис, Е.Г.Чиркова

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия
(Получена 26 сентября 1995 г. Принята к печати 11 октября 1995 г.)

Приведены результаты спектральных исследований индуцированного дальнего инфракрасного излучения из одноосно деформированного p -Ge. Показано, что это излучение вызвано индуцированными излучательными переходами дырок между расщепленными давлением основными состояниями мелких акцепторов.

Ранее мы сообщали об обнаружении индуцированного дальнего инфракрасного (ИК) излучения в одноосно сжатом p -Ge в сильных электрических полях [1]. В работе [2] было показано, что возможной причиной неблюдавшегося индуцированного излучения является инверсная заселенность акцепторных состояний, расщепленных одноосным сжатием. В данном сообщении приводятся результаты спектральных исследований индуцированного излучения, выполненных с помощью решеточного монохроматора дальнего ИК диапазона. Полученные результаты показывают, что индуцированное излучение в одноосно сжатом p -Ge обусловлено излучательными переходами между расщепленными давлением примесными уровнями, когда один из них находится в непрерывном зонном спектре.

Одноосная деформация снимает вырождение валентной зоны германия при $k = 0$ и расщепляет ее на две подзоны, разделенные энергетическим зазором Δ , пропорциональным давлению P . Для кристаллографического направления [111] коэффициент пропорциональности составляет примерно 4 мэВ/кбар для $P \parallel [111]$ [3]. Вырожденное основное состояние акцептора в германии также расщепляется на два уровня с энергетическим зазором, зависящим от P . Разность энергий ϵ между ними, рассчитанная по формуле (27.18) книги [3], показана на рис. 1 в зависимости от P . При $\Delta \approx 16$ мэВ один из этих уровней оказывается в области энергий, соответствующих непрерывному спектру [3]. Естественно предположить, что, начиная с этого расщепления, заполнение двух основных акцепторных состояний может быть инвертированным,

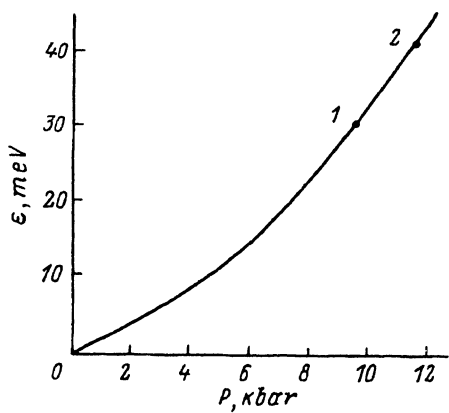


Рис. 1. Зависимость разности энергий ϵ между основными состояниями акцептора от давления (сплошная кривая) и энергия кванта вынужденного излучения (точки) при давлениях P , кбар: 1 — 9.5, 2 — 11.5.

так как уровень, расположенный в запрещенной зоне, опустошен ударной ионизацией в электрическом поле и, следовательно, заполнен слабее, чем уровень, находящийся в непрерывном энергетическом спектре. Действительно, минимальное давление, при котором в некоторых образцах удавалось наблюдать стимулированное излучение, как раз соответствовало расщеплению зон $\Delta \approx 16$ мэВ [1].

На рис. 2 представлен спектр индуцированного излучения в одноосно сжатом p -Ge, измеренный с помощью решеточного монохроматора, при двух величинах приложенного давления $P \approx 9.5$ кбар (рис. 2, *a*) и $P \approx 11.5$ кбар (рис. 2, *b*) и электрическом поле $E = 4$ кВ/см ($E \parallel P \parallel [111]$). Наблюдаемые в спектре пики соответствуют энергии 32 мэВ для 9.5 кбар (точка 1 на рис. 1) и 40 мэВ для 11.5 кбар (точка 2 на рис. 1). Видно, что энергия кванта наблюдаемого стимулированного излучения сильно зависит от давления и соответствует разности энергий между расщепленными сжатием примесными уровнями (см. рис. 1). Таким образом, наблюдаемое индуцированное излучение в одноосно деформированном p -Ge вызвано внутрицентровыми оптическими переходами между расщепленными акцепторными уровнями.

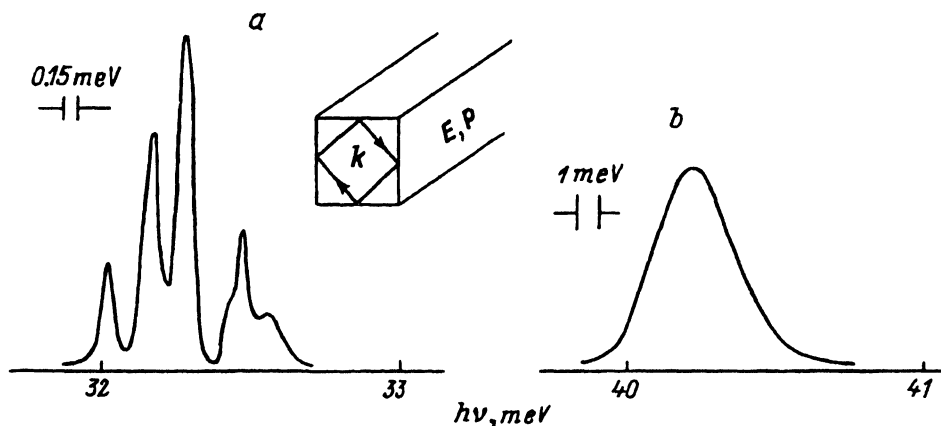


Рис. 2. Спектр индуцированного излучения из одноосно сжатого p -Ge при давлениях P , кбар: *a* — 9.5, *b* — 11.5.

На вставке показан оптический путь в образце при резонансе за счет полного внутреннего отражения, k — волновой вектор излучения.

Спектр индуцированного излучения оказался довольно широким — около 0.5 мэВ. Это может быть связано с уширением примесного уровня, находящегося в непрерывном зонном спектре [4].

Представленные на рис. 2,а и 2,б спектры были получены с различным спектральным разрешением. При измерении с более высоким разрешением (0.15 мэВ) в спектре (рис. 2,а) проявляется модовая структура резонатора. В нашем случае, как и в работе [5], резонатором является сам образец, а резонанс происходит за счет полного внутреннего отражения от граней кристалла (см. вставку к рис. 2). Условие резонанса есть $N\lambda = nL$, где n — показатель преломления, L — оптическая длина пути, N — целое число. Для образца с поперечным сечением $0.8 \times 0.8 \text{ мм}^2$ это дает межмодовое расстояние, равное 0.15 мэВ. Наблюдаемая в спектре модовая структура является подтверждением лазерной природы излучения из деформированного p -Ge.

Отметим, что линии, соответствующие переходам между возбужденными и основным состояниями мелких акцепторов, наблюдались в работе [6] в спектре стимулированного излучения из недеформированного p -Ge в скрещенных электрическом и магнитном полях. Однако эти внутрицентровые переходы инициированы инверсной заселенностью подзон легких и тяжелых дырок в скрещенных полях, являющейся в этом случае первичной причиной стимулированного излучения. В одноосно деформированном p -Ge причиной стимулированного излучения, как видно из приведенных данных, является инверсная заселенность расщепленных сжатием акцепторных уровней, возникающая при появлении верхнего из них в непрерывном зонном спектре. Зависимость энергетического зазора между этими уровнями от давления дает возможность значительной перестройки частоты индуцированного излучения без существенного изменения его интенсивности.

Настоящая работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 94-02-03450-а) и Международным научным фондом (гранты № N7H000 и N7H300).

Список литературы

- [1] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.П. Синис. ЖЭТФ, **101**, 756 (1992); ЖЭТФ, **103**, 1829 (1993).
- [2] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.П. Синис. Письма ЖЭТФ, **59**, 455 (1994).
- [3] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [4] A.K. Ramdas, S. Rodrigues. Rep. Prog. Phys., **44**, 1297 (1981).
- [5] А.А. Андронов, И.В. Зверев, В.А. Козлов, Ю.Н. Ноздрин, С.А. Павлов, В.Н. Шастин. Письма ЖЭТФ, **40**, 804 (1984).
- [6] А.В. Муравьев, С.Г. Павлов, В.Н. Шастин. Письма ЖЭТФ, **52**, 959 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

Induced intracenter radiative transitions in a strongly deformed p -Ge

I.V.Altukhov, M.S.Kagan, K.A.Korolyev, V.P.Sinis, E.G.Chirkova

Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
103907 Moscow, Russia

Spectra of induced far-infrared radiation from uniaxially compressed p -Ge are presented. The induced radiative hole transitions between strain-split ground states of shallow acceptors are shown to be responsible for this radiation.
