

ВНУТРИЦЕНТРОВАЯ ИНВЕРСИЯ КАК ПРИЧИНА ИНДУЦИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОМ p -Ge

И.В.Алтухов, М.С.Каган, К.А.Королев, В.П.Синис

Институт радиотехники и электроники РАН

103907 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 февраля 1994 г.

Приведены экспериментальные данные, показывающие, что стимулированное излучение из одноосно сжатого p -Ge вызвано инверсией заполнения примесных уровней, образующихся из расщепленного деформацией основного состояния акцептора, когда один из них оказывается в непрерывном зонном спектре.

Вынужденное дальнейшее ИК излучение горячих дырок, обнаруженное нами в одноосно сжатом p -Ge в отсутствие магнитного поля [1], связывалось с инверсией заполнения валентных подзон, расщепленных деформацией. Была предложена модель [2], согласно которой межподзонная инверсия возникает из-за баллистического ускорения дырок нижней по энергии зоны до энергии, соответствующей краю верхней зоны, с последующим межподзонным переходом с участием акустических фононов. Численные расчеты методом Монте-Карло [3] показали, однако, что межподзонное перераспределение горячих дырок не приводит к инверсии. Поэтому вопрос о происхождении инверсии, приводящей к вынужденному излучению из деформированного германия [1,2,4,5], оставался открытым. В настоящем сообщении приведены экспериментальные данные, показывающие, что причиной вынужденного излучения, наблюдавшегося в одноосно деформированном p -Ge, является инверсная заселенность акцепторных состояний, расщепленных сжатием.

Одноосная деформация снимает вырождение валентной зоны при $k = 0$ и расщепляет ее на две подзоны, разделенные энергетическим зазором Δ , пропорциональным давлению P (с коэффициентом пропорциональности около 4 мЭВ/кбар для $P \parallel [111]$ и 6 мЭВ/кбар для $P \parallel [100]$ [6]). Вырожденное основное состояние акцептора в Ge также расщепляется на два уровня с энергетическим зазором, зависящим от P . Разность энергий между ними (1) и энергия ионизации нижнего уровня (2), рассчитанные по формулам (27.18) книги [6], показаны на рис.1а в зависимости от Δ . На рис.1б схематически представлена структура валентной зоны и положение примесных уровней для различных Δ . При $\Delta \geq 16$ мЭВ верхний из этих уровней оказывается в области энергий, соответствующих непрерывному спектру (точка пересечения кривых на рис.1а и зонная схема 2 рис.1б). Естественно предположить, что, начиная с этого расщепления, заполнение двух основных акцепторных состояний может быть инвертированным, так как нижний уровень, находящийся в запрещенной зоне, заполнен слабее из-за ударной ионизации электрическим полем, чем верхний, расположенный в валентной зоне. Действительно, минимальное давление, при котором в некоторых образцах удавалось наблюдать стимулированное излучение для $E \parallel P \parallel [111]$ составляло 4 кбар ($\Delta \approx 16$ мЭВ) [5].

В большинстве образцов для $P \parallel [111]$ стимулированное излучение возникало при $P \approx 9$ кбар. При этом разность энергий примесных уровней оказывается

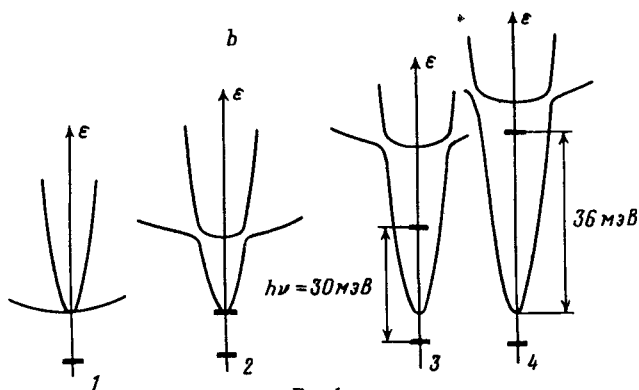
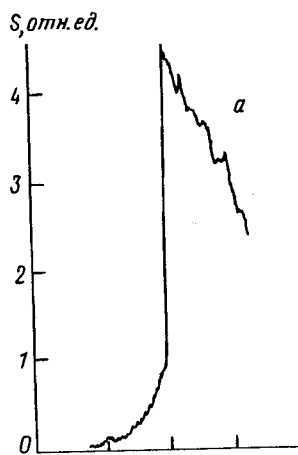
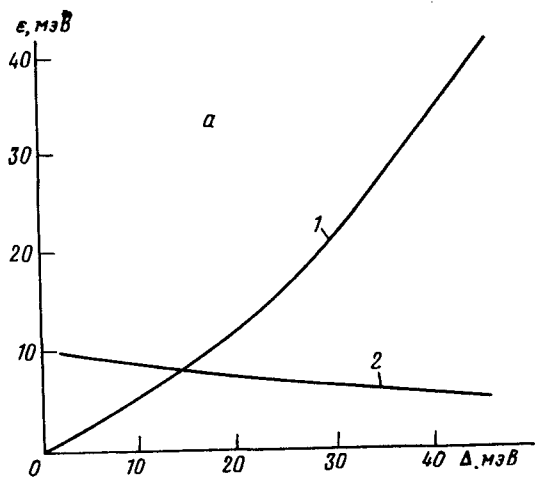


Рис.1

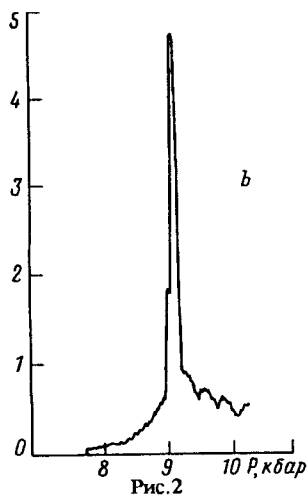


Рис.2

Рис.1. *a* – Зависимости разности энергий между основными состояниями акцептора (1) и энергии ионизации нижнего уровня (2) от энергетического зазора Δ между валентными подзонами. *b* – Структура валентной зоны и положение примесных уровней при разных Δ , мэВ: 1 - 0; 2 - 16; 3 - 36; 4 - 45

Рис.2. Зависимости интенсивности излучения S от давления P для $E \parallel P \parallel [111]$, регистрируемого фотоприемниками: *a* - $\text{Ge} < \text{Ga} >$, *b* - $\text{Ge} < \text{Zn} >$

порядка 30 мэВ (кривая 1 рис.1*a* и зонная схема 3 рис.1*b*). Поэтому кроме использовавшегося ранее [1,2] приемника $\text{Ge} < \text{Ga} >$ (полоса чувствительности вблизи 10 мэВ) мы использовали приемник $\text{Ge} < \text{Zn} >$ (чувствительность около 30 мэВ). На рис.2 представлена зависимость интенсивности излучения от давления, регистрируемого одновременно этими фотоприемниками. Легко видеть, что спектр излучения содержит частоты, соответствующие спектральным диапазонам обоих приемников. Пик в сигнале фотоприемника $\text{Ge} < \text{Zn} >$ есть результат изменения энергии кванта стимулированного излучения с увеличением давления и приблизительно повторяет один из пиков чувствительности $\text{Ge} < \text{Zn} >$ [7].

Длина волны излучения в пике интенсивности на рис.2, измеренная самодельным интерферометром Майкельсона с $\text{Ge} < \text{Zn} >$ в качестве приемника, действительно соответствовала 30 мэВ – энергии кванта оптического перехода между расщепленными сжатием акцепторными уровнями. Сигнал приемника $\text{Ge} < \text{Ga} >$ (≈ 10 мэВ) мог быть вызван оптическими переходами на нижний примесный уровень из возбужденных состояний или из валентной зоны. Тем не менее, основной причиной вынужденного излучения на всех частотах является инверсия заполнения двух основных состояний примеси. Это видно из данных рис.3, где показан сигнал фотоприемника $\text{Ge} < \text{Ga} >$ в зависимости от давления для $P \parallel [100]$ при разных электрических полях E . Хотя вынужденное излучение может возникать при различных пороговых давлениях в разных полях, срывается оно при одном и том же давлении. При этом давлении энергия верхнего примесного уровня, отсчитанная от дна зоны легких дырок, близка к 36 мэВ – энергии оптического фонона (см. зонную схему 4 рис.1б). Верхний уровень опустошается из-за эмиссии оптических фононов, что и приводит к срыву стимулированного излучения на всех частотах.

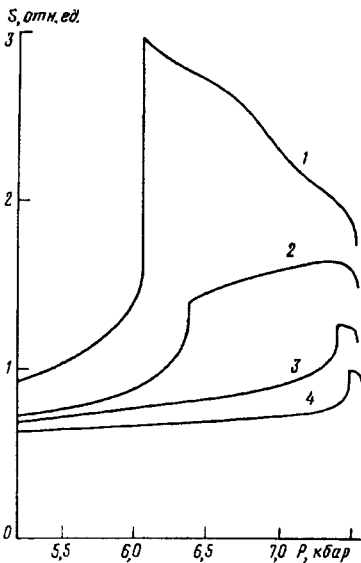


Рис.3. Зависимости интенсивности излучения S от давления P для $E \parallel P \parallel [100]$, регистрируемого фотоприемником $\text{Ge} < \text{Ga} >$ для различных E , кВ/см: 1 – 4,1; 2 – 3,5; 3 – 3,1; 4 – 2,6

Таким образом, полученные данные показывают, что основную роль в вынужденном излучении из сжатого p -Ge играют излучательные переходы между расщепленными давлением примесными уровнями, когда верхний из них находится в непрерывном зонном спектре. Отметим, что в работе [8] в спектре стимулированного излучения из недеформированного p -Ge в скрещенных электрическом и магнитном полях наблюдались линии, соответствующие переходам между возбужденными и основными состояниями мелких акцепторов. Однако эти внутрицентровые переходы, по мнению авторов [8], 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.

Авторы выражают благодарность Н.Г.Ждановой за обсуждение результатов. Работа была частично поддержана грантом фонда Сороса, присужденным американским обществом, и индивидуальными грантами Международного Научного Фонда.

-
1. И.В.Алтухов, М.С.Каган, В.П.Синис, Письма в ЖЭТФ, **47**, 133 (1988).
 2. I.V.Altukhov, M.S.Kagan, and V.P.Sinis, *Opt. Quant. Electr.* **23**, S211 (1991).
 3. E.V.Starikov and P.N.Shiktorov, *Opt. Quant. Electr.* **23**, S247 (1991).
 4. V.I.Gavrilenko, A.V.Galyagin, V.V.Nikonorov and P.N.Tsereteli, *Lithuanian J. of Phys.* **32**, No.5 Suppl., 161 (1992).
 5. И.В.Алтухов, М.С.Каган, К.А.Королев, В.П.Синис, ЖЭТФ **103**, 1829 (1993); *Phys. Lett. A* **176**, 133 (1993).
 6. Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус, Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука 1972.
 7. A.K.Ramdas and S.Rodrigues, *Rep. Progr. Phys.* **44**, 1337 (1981).
 8. А.В.Муравьев, С.Г.Павлов, В.Н.Шагин, Письма в ЖЭТФ **52**, 959 (1990).