

## МЕЖПОДЗОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

Баширов Р. И., Гавриленко В. И., Красильник З. Ф., Мусаев А. М.,  
Никоноров В. В., Потапенко С. Ю., Чернобровцева М. Д.

Методом электролюминесценции исследуются эффекты динамического разогрева дырок германия в условиях одноосной деформации кристалла. Обсуждается влияние одноосной деформации на механизм индуцированного излучения горячих дырок в сильных  $E \perp H$  полях при межподзонных оптических переходах.

1. *Введение.* Одноосная деформация кристалла германия приводит к изменению энергетического спектра дырок, снимает вырождение подзон в валентной зоне в точке  $p=0$  и существенно изменяет энергетический спектр дырок [1]. В настоящей работе исследуется влияние деформации на кинетические свойства дырок при динамическом разогреве в сильных электрических полях. В последние годы открыты и интенсивно изучаются механизмы неустойчивости электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в  $p$ -Ge при низких температурах, которые обусловлены формированием инвертированных распределений дырок в  $E, H$  полях (см., например, литературу в [2]). Одноосная деформация может служить еще одним фактором воздействия на функцию распределения и высокочастотную проводимость горячих носителей заряда в полупроводниках. Об этом свидетельствует, в частности, недавнее сообщение о наблюдении влияния давления на индуцированное излучение  $p$ -Ge в  $E \perp H$  полях [3] в дальнейшем инфракрасном диапазоне (см. п. 4). Представляется, что исследования динамического разогрева носителей заряда в деформированном кристалле могут оказаться плодотворными как для изучения трансформации валентных зон под давлением, так и для исследования распределений горячих носителей и связанных с ними приложений.

2. *Эксперимент.* Изучение спонтанного дальнего ИК излучения  $p$ -Ge в сильных  $E, H$  полях является достаточно простым и информативным методом диагностики функций распределения горячих дырок [4, 5]. В данной работе этот метод впервые применен для исследования разогрева дырок и заселенности легкой подзоны в условиях одноосного сжатия кристалла. Изучалось спонтанное излучение образцов умеренно легированного германия ( $N_A + N_D \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) длиной 1 см и с поперечным сечением  $1.4 \times 1.4$  мм (рис. 1). Давление до  $3 \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup> прикладывалось вдоль кристаллографического направления [001], а импульсное электрическое поле — как вдоль ( $E \parallel [001]$ ), так и поперек ( $E \parallel [110]$ ) направления давления. Спонтанное излучение образцов  $p$ -Ge при  $T = 4.2$  К в полях  $E \leq 10^3$  В/см регистрировалось фотоприемниками Ge (Ga) и  $n$ -InSb с максимумами чувствительности при  $\lambda \approx 100$  мкм ( $\hbar\omega \approx 12.4$  мэВ) и  $\lambda \approx 290$  мкм ( $\hbar\omega \approx 4.3$  мэВ) соответственно (спектральные характеристики приемников приведены в [5]). Одновременно измерялись вольтамперные характеристики образцов (рис. 2).

3. *Обсуждение результатов.* Для объяснения результатов эксперимента необходимо рассмотреть изменение структуры валентной зоны германия в условиях одноосного сжатия. На рис. 3 представлены законы дисперсии дырок в направлении давления  $\mathcal{P} \parallel [001]$  и в перпендикулярном направлении, получен-

ные из выражения для  $\mathcal{E}(p, \mathcal{P})$ , приведенного в [1]. Расщепление подзон в точке  $p=0$  пропорционально давлению и составляет  $\delta=6.0$  мэВ при  $\mathcal{P}=10^3$  кгс/см<sup>2</sup>.<sup>1</sup> В области малых кинетических энергий  $\mathcal{E}_{1,2}^{\text{кин}} \ll (A \mp B) \delta/2B$  поверхности постоянных энергий представляют собой эллипсоиды вращения, при этом эффективные массы вдоль и поперек направления давления составляют  $m_{\parallel}^{\pm}=0.046m_0$ ,  $m_{\perp}^{\pm}=0.216m_0$ ,  $m_{\frac{1}{2}}^{\pm}=0.0569m_0$ , а массы плотности состояний  $m^{ds} = (m_{\parallel} m_{\perp}^2)^{1/3}$ ,  $m_1^{ds} = 0.083m_0$ ,  $m_2^{ds} = 0.089m_0$ .

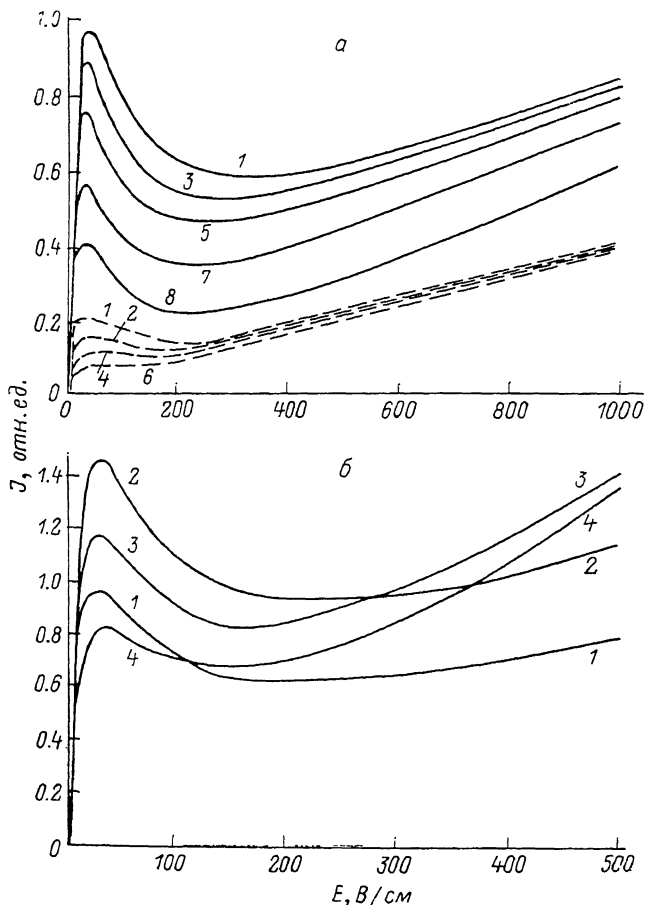


Рис. 1. Зависимости интенсивности спонтанного излучения  $p$ -Ge от электрического поля для разных значений давления.

$\mathcal{P} \cdot 10^{-3}$ , кгс/см<sup>2</sup>: а) 1 — 0, 2 — 1.1, 3 — 1.3, 4 — 1.7, 5 — 2.0, 6 — 2.3, 7 — 2.7, 8 — 2.9; б) 1 — 0, 2 — 1.25, 3 — 1.9, 4 — 2.7. а —  $E \parallel [010]$ ,  $\mathcal{P} \parallel [001]$ ; б —  $E \parallel \mathcal{P} \parallel [001]$ . Сплошные линии — фотоприемник Ge(Ga), штриховые —  $n$ -GaAs.

При динамическом разогреве  $\omega_E = eE/p_0 \gg \nu_a, \nu_{\text{II}}$  (здесь  $\nu_a, \nu_{\text{II}}$  — характерные частоты рассеяния на акустических фононах и примесях,  $p_0$  — импульс дырки с энергией, равной энергии оптического фонона  $\mathcal{E} = \hbar\omega_0$ ) дырки рассеиваются преимущественно на оптических фононах. В этих условиях основным механизмом спонтанного излучения являются тормозное излучение дырок и излучение при прямых межподзонных оптических  $2 \rightarrow 1$  переходах [4, 5]. Тормозное излучение при рассеянии дырок на оптических фононах возрастает с полем  $E$  и при  $\mathcal{P}=0$  проявляется в виде монотонного роста  $J(E)$  при  $E \geq 300$  В/см в полосе приемника Ge(Ga) [5] (рис. 1). В меньших полях излучение связано в первую очередь с  $2 \rightarrow 1$  переходами. Его рост в полях  $E \approx 5 \div 30$  В/см вызван

<sup>1</sup> Здесь использованы следующие параметры германия: константы деформационного потенциала  $a = -2.09$  эВ,  $b = -2.5$  эВ,  $d = -4.5$  эВ; упругие константы  $c_{11} = 1.31 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>,  $c_{12} = 0.49 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>,  $c_{44} = 0.81$  кгс/см<sup>2</sup>; параметры закона дисперсии  $A = -13.27$ ,  $B = -8.63$ ,  $C^2 = 153.8$ .

диффузионным разогревом дырок до энергий  $\varepsilon \sim 15$  мэВ [6], при которых дырки способны излучать кванты  $\hbar\omega$  в полосе используемых приемников Ge(Ga) и n-GaAs. Наблюдаемый спад  $2-1$  излучения при  $E > 30$  В/см связан с вклю-

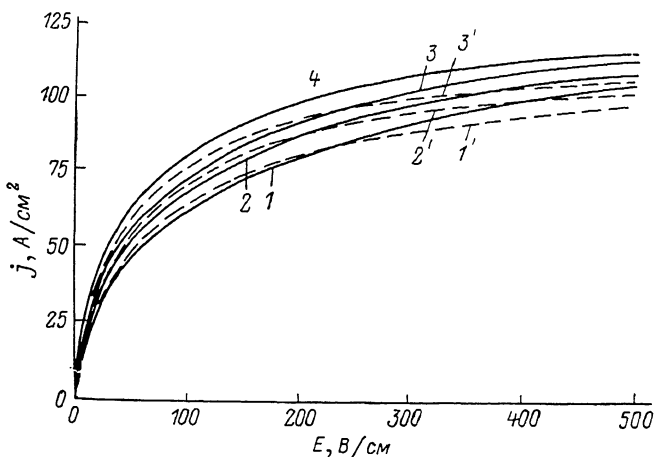


Рис. 2. Вольтамперные характеристики образцов p-Ge при разных значениях давления.

$\mathcal{P} \parallel [001]$ . Сплошные кривые —  $E \parallel [001]$ , штриховые —  $E \parallel [010]$ .  $\mathcal{P} \cdot 10^{-3}$ , кгс/см<sup>2</sup>: 1, 1' — 0, 2 — 1.25, 2' — 1.7, 3 — 1.9, 3' — 2.9, 4 — 2.7.

чением рассеяния на оптических фононах, приводящего к уменьшению доли легких дырок до значений  $p_2/p_1 \simeq (m_2/m_1)^2 = 1.5\%$  по сравнению с  $p_2/p_1 \simeq (m_2/m_1)^{3/2} = 4.3\%$  в слабых полях.

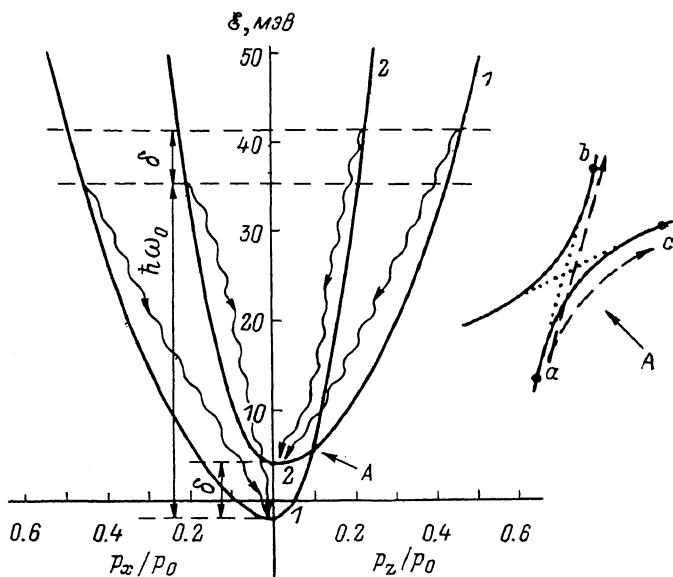


Рис. 3. Расщепление подзон тяжелых (1) и легких (2) дырок германия при одноосной деформации кристалла давлением  $\mathcal{P} = 10^3$  кгс/см<sup>2</sup>.

$\mathcal{P} \parallel \hat{p}_z \parallel [001]$ ,  $\hat{p}_x \parallel [100]$ . Волнистыми стрелками схематически обозначены переходы дырок с испусканием оптического фонона  $\hbar\omega$ . В правой части рисунка крупным планом изображены подзоны вблизи точки касания A при отличном от нуля поперечном импульсе  $p_1$  и  $p_2$  (точки —  $p_1 = 0$ ). Дрейф в электрическом поле  $E \parallel \hat{p}_z$ , дырка из точки a подзоны 1 может туннельным образом проникнуть в подзону 2 (процесс ab) либо остаться в данной подзоне (процесс ac).

Одноосная деформация кристалла приводит к существенной анизотропии поверхности начальных состояний дырок в зоне 2, соответствующих межподзональным переходам с квантом  $\hbar\omega = \varepsilon_2(\mathbf{p}) - \varepsilon_1(\mathbf{p}) = \text{const}$  (рис. 4). Анизотропным является и распределение легких дырок в полях  $E \geq 30$  В/см при низких температурах решетки  $T \sim 4.2$  К: функция распределения вытянута вдоль

поля  $E$  [6]. При  $\mathcal{P} \perp E$  поверхность  $\mathcal{E}_2(\mathbf{p}) - \mathcal{E}_1(\mathbf{p}) = \hbar\omega$  вытягивается в направлении быстрого спада функции распределения (рис. 4), что должно приводить к монотонному уменьшению интенсивности  $2-1$  излучения с ростом давления. Наблюдаемое в этих условиях значительное (более чем в 2 раза) падение интенсивности люминесценции  $p$ -Ge с ростом давления в полосе приемника Ge (Ga) (рис. 1, а) связано именно с уменьшением интенсивности  $2-1$  переходов. Интенсивность тормозного излучения горячих дырок германия при одноосной деформации кристалла меняется, по-видимому, незначительно. Об этом свидетельствуют излучательные характеристики  $p$ -Ge в полосе приемника  $n$ -GaAs при  $E \geq 200$  В/см, где тормозное излучение является доминирующим [8].

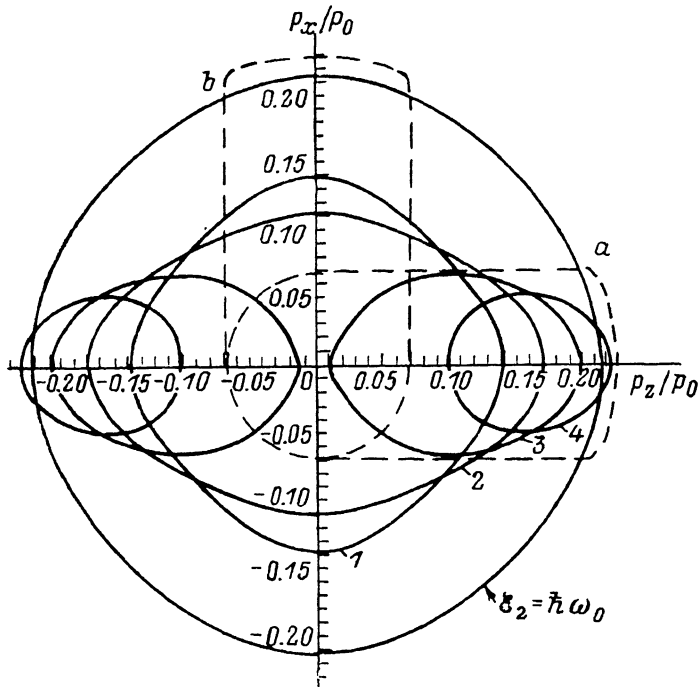


Рис. 4. Уровни постоянной разности энергий  $\mathcal{E}_2(p_x, 0, p_z) - \mathcal{E}_1(p_x, 0, p_z) = 12.4$  мэВ при разных давлениях  $\mathcal{P}$ , соответствующие начальным состояниям дырок с нулевым импульсом  $p_y$  в подзоне 2, оптические переходы которых в подзону 1 сопровождаются излучением фотона  $\hbar\omega$  в пике чувствительности фотоприемника Ge (Ga).

$\mathcal{P} \parallel \hat{p}_z \parallel [001]$ ;  $\mathcal{P} \cdot 10^{-3}$ , кгс/см<sup>2</sup>: 1—0, 2—1, 3—2, 4—3. Штриховой линией схематично изображена функция распределения легких дырок при динамическом разогреве в полях  $E \parallel \hat{p}_x$  (а) и  $E \parallel \hat{p}_z \parallel [100]$  (б).

(рис. 1, а). Столь же незначительно влияет одноосное сжатие и на ток  $p$ -Ge (рис. 2), величина которого определяется, как и интенсивность тормозного излучения в сильных электрических полях, средней частотой рассеяния дырок на оптических фононах.

Совершенно иной характер имеют зависимости  $2-1$  излучения от давления при продольной конфигурации векторов  $E$  и  $\mathcal{P}$ . С ростом давления поверхность  $E_2(\mathbf{p}) - E_1(\mathbf{p}) = \hbar\omega$  «втягивается» в область фазового пространства, где локализованы легкие дырки (рис. 4), т. е. увеличивается доля дырок, излучающих квант  $\hbar\omega$  (кривые 2, 3 при  $E \sim 30$  В/см и кривые 2—4 при  $E > 400$  В/см, рис. 1, б). При давлении  $\mathcal{P} \geq 1 \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup> в полях  $E \approx 30$  В/см, когда величина расщепления подзон оказывается сравнимой со средней энергией дырок или больше ее ( $\mathcal{E} \approx 15$  мэВ при  $\mathcal{P} = 0$  [6]), наблюдается спад интенсивности  $2-1$  излучения, вызванный уменьшением переходов дырок в легкую подзону в процессе квазиупругого рассеяния на акустических фононах. При тех же давлениях, но в сильных электрических полях  $E \geq 300$  В/см уменьшение населенности легкой подзоны из-за расщепления подзон не столь заметно. В таких полях основным механизмом рассеяния является неупругое рассеяние дырок на оптических фононах. Дырки успевают набрать перед актом рассеяния энер-

тию, большую величины  $\hbar \omega_0 + \delta$ , так что расщепление подзон слабо сказывается на межподзональном обмене дырок при рассеянии.

Альтернативный механизм роста  $2-I$  излучения с давлением при  $\mathcal{P} \parallel E$  мог бы быть связан с туннелированием дырок из тяжелой подзоны в легкую в окрестности точки касания подзон, что приводило бы к увеличению концентрации легких дырок и, следовательно,  $2-I$  излучения. Вероятность туннелирования дырки из точки  $a$  в точку  $b$  (см. вставку на рис. 3) составляет  $W_{ab} \simeq \simeq \exp \{-2\pi V^2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \hbar e E\}$ , где  $\alpha_{1,2}$  — наклоны подзон в точке касания  $p_2^*$ , а  $2V$  — энергетическая щель, через которую туннелируют дырки (рис. 3). С ростом давления  $\mathcal{P} \parallel E$  тяжелые дырки все с меньшим значением поперечного импульса  $p_1^* \sim \mathcal{P}^{-1/4}$ , дрейфующие в поле  $E$ , способны протуннелировать в легкую подзону. Координата  $p_2^*$  растет, как  $\mathcal{P}^{1/2}$ , так что число дырок, туннелирующих в легкую подзону из объема  $2\pi p_1^* p_2^*$ , практически не зависит от  $\mathcal{P}$  и остается примерно на том же уровне, что и при  $\mathcal{P} = 0$  [7], т. е. составляет единицы процентов от общего числа легких дырок.

4. Влияние одноосной деформации на инверсию  $2-I$  переходов в  $E \perp H$  полях. Одними из наиболее ярких эффектов горячих дырок в Ge являются межподзональная инверсия и индуцированное субмиллиметровое и дальнее ИК излучение при  $2-I$  переходах дырок, связанные с накоплением дырок при  $E \perp H$  в магнитной ловушке в легкой подзоне [8]. В работе [3] с целью «наблюдения положительного или отрицательного влияния давления на генерацию» исследовались характеристики индуцированного излучения  $p$ -Ge при  $\mathcal{P} \parallel [11\bar{2}]$ ,  $E \parallel [110]$  и  $H \parallel [111]$ . Без какого-либо обсуждения результатов сообщалось, что давление до  $10^3$  кгс/см<sup>3</sup> снижает пороговые значения  $E$ ,  $H$  полей, расширяет спектр генерируемых длин волн и повышает на 1—2 порядка интенсивность излучения.

Результаты данной работы позволяют сделать некоторые выводы относительно возможного влияния одноосной деформации на индуцированное излучение  $p$ -Ge в  $E \perp H$  полях. Во-первых, наиболее выигрышной представляется такая взаимная ориентация полей и давления, при которой холловский дрейф носителей происходит в направлении давления  $\mathcal{P}$ . При этом возрастает число легких дырок, способных излучить квант  $\hbar \omega$ , и уменьшается число тяжелых дырок, способных поглотить этот квант. Это связано с тем, что легкие дырки «замангичены» в ловушке, смещенной в направлении холловского дрейфа [в этом направлении вытянута и поверхность  $\mathcal{E}_2(p) - \mathcal{E}_1(p) = \hbar \omega$  при  $\mathcal{P} \parallel [H \cdot E]$ ], а функция распределения тяжелых дырок, слабо отклоняющихся магнитным полем, вытянута поперек  $\mathcal{P}$ . Во-вторых, в результате расщепления подзон увеличивается межподзональная плотность состояний  $w \sim \int d^3 p \delta(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 - \hbar \omega)$ , которая, по оценкам, возрастает примерно в 2 раза на частоте  $\hbar \omega \sim \delta$ , что должно приводить к росту матричных элементов  $2-I$  переходов и расширению диапазона отрицательной проводимости в длинноволновую область. В-третьих, можно ожидать некоторого увеличения поступления дырок в легкую подзону при преимущественном неупругом рассеянии на оптических фононах за счет роста почти в 2 раза массы плотности состояний вблизи дна этой подзоны (см. п. 3). Давление, однако, не должно превышать  $(1 \div 2) \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup>, с тем чтобы расщепление подзон не приводило к обратному процессу — уменьшению поступления дырок в легкую подзону в результате рассеяния на оптических фононах из-за возникновения щели  $\delta \sim 6 \div 12$  мэВ, большей глубины проникновения дырок в активную область  $\mathcal{E} > \hbar \omega_0$  в полях  $E \sim 0.5 \div 2.0$  кВ/см, характерных для генерации стимулированного излучения.

Авторы признательны А. А. Андронову, В. Я. Алешкину за обсуждение результатов работы, А. И. Хусаиновой за подготовку образцов германия к измерениям.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1972. 584 с.
- [2] Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе / Под ред. А. А. Андропова и др. Горький, 1986. 175 с.
- [3] Komiyama S. — In: Proc. 13 Int. Conf. Phys. Semicond. Stockholm, 1986, p. 1641—1650.

- [4] Андронов А. А., Гавриленко В. И., Гришин О. Ф., Мурзин В. Н., Ноздри Ю. Н., Столицкий С. А., Чеботарев П. А., Шастиг В. Н. Наблюдение инверсии дырок в Ge в скрещенных E и H полях по спонтанному длинноволновому ИК излучению. — ДАН СССР, 1982, т. 267, в. 2, с. 339—343.
- [5] Берман А. В., Гавриленко В. И., Красильник З. Ф., Никоноров В. В., Павлов С. А., Чеботарев А. П. Люминесценция горячих дырок германия в субмиллиметровом диапазоне длин волн. — ФТП, 1985, т. 19, в. 3, с. 369—377.
- [6] Kurosawa T., Maeda H. — J. Phys. Soc. Japan, 1971, v. 31, N 3, p. 668—678.
- [7] Алешкин В. Я., Романов Ю. А. Туннельные переходы в сложной валентной зоне полупроводника. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, в. 5, с. 1857—1862.
- [8] Андронов А. А., Козлов В. А., Мазов И. С., Шастиг В. Н. Об усилении дальнего инфракрасного излучения в германии при инверсии населенностей «горячих» дырок. — Письма ЖЭТФ, 1979, т. 30, в. 9, с. 585—589.

Институт прикладной физики  
АН СССР  
Горький

Получена 8.06.1987  
Принята к печати 21.08.1987