

КЛАСТЕРНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ p -GaInSbAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ n -GaSb : Te

Баранов А. Н., Воронина Т. И., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е.,
Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П.

В результате комплексного исследования подвижности носителей тока, магнитосопротивления и фотопроводимости в твердых растворах p -GaInSbAs, выращенных на подложке n -GaSb : Te, выявлены кластерные образования, которые могут быть обусловлены дефектами, за которые ответствен Te, продиффундировавший в эпитаксиальный слой из подложки. Показана значительная роль кластерных образований в механизме рассеяния и переносе носителей тока, определены параметры этих скопления.

Четырехкомпонентные твердые растворы p -GaInSbAs нашли широкое практическое применение как материалы для светодиодов, лазеров и фотоприемников [1-3]. В качестве активной области лазеров и фотоприемников для диапазона 1.8—2.5 мкм наиболее целесообразно использовать изопериодные твердые растворы p -Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}As_y ($0 < x < 0.25$), выращенные на подложке n -GaSb : Te.

Данная работа является продолжением работы [4], в которой рассматривались гальваномагнитные свойства специально не легированных слоев твердого раствора Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}As_y ($0 < x < 0.25$). Было показано, что кристаллизуются слои p -типа проводимости, а концентрация природных акцепторов и дырок в слое уменьшается почти на порядок (от $1 \cdot 10^{17}$ до $\sim 1 \cdot 10^{16}$ см⁻³) при увеличении содержания мольной доли InAs в слое от 0 до 0.22. При выращивании эпитаксиальных слоев на подложках n -GaSb : Te происходит диффузия теллура из подложки в эпитаксиальный слой твердых растворов. При этом часть атомов Te увеличивает концентрацию компенсирующих доноров, а часть участвует в образовании комплексов $V_{\text{Ga}}-\text{Te}$, создавая центры с энергией активации $E_i = E_c + 0.1$ эВ. Эти факторы, несомненно, должны сказаться на работе различных полупроводниковых приборов, изготавливаемых из четырехкомпонентного твердого раствора p -GaInSbAs.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния Te на свойства твердых растворов GaInSbAs, в частности выявлению его роли в формировании механизмов рассеяния носителей тока и возникновении фотопроводимости. С этой целью проведено комплексное исследование подвижности $\mu = R\sigma_T$, магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho$ и фотопроводимости $\Delta\sigma = (\sigma_p - \sigma_T)$ в интервале температур 77—300 К.

1. Экспериментальные результаты

Исследовались эпитаксиальные слои p -Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}As_y ($x \simeq 0.1-0.22$), выращенные методом жидкостной эпитаксии при $T \simeq 600$ °C на подложках n -GaSb : Te. Слои при этом были изолированы от подложки областью объемного заряда p - n -перехода. Для сравнения из тех же исходных компонентов были изготовлены контрольные эпитаксиальные слои p -GaInSbAs на подложках с промежуточным изолирующим слоем из высокоомного p -GaSb. Толщина ис-

межуемых слоев составляла 10—15 мкм. Образцы для исследования изготовлялись в форме прямоугольника с шестью контактами, нанесенными из In или In+Zn.

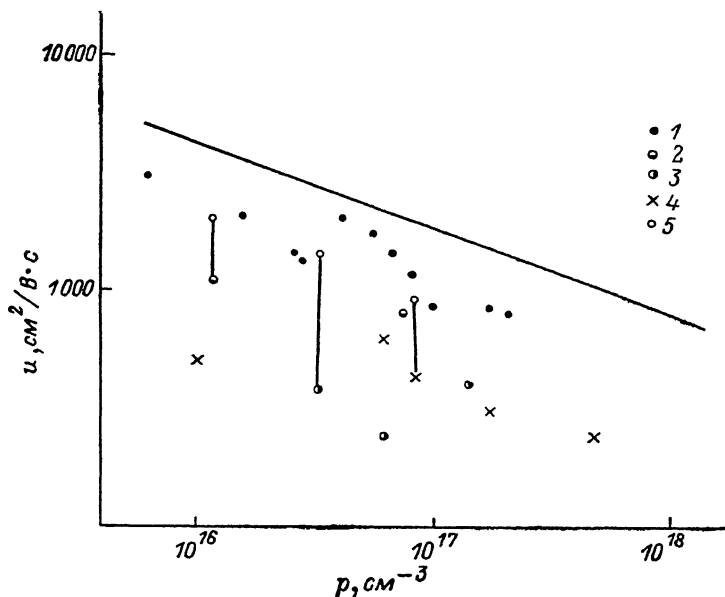


Рис. 1. Зависимость подвижности носителей тока от концентрации при $T=77$ К для твердых растворов $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$.

образцы на подложках: 1 — с дополнительным изолирующим слоем, 2—5 — $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ (x: 2 — 0.1, 3 — 0.15, 4 — 0.2; 5 — подвижность u_0 в матрице для соответствующих образцов).

На рис. 1 видно, что во всех образцах, полученных на подложках $n\text{-GaSb}:\text{Te}$, подвижность всегда имела более низкие значения, чем в аналогичных контрольных образцах.

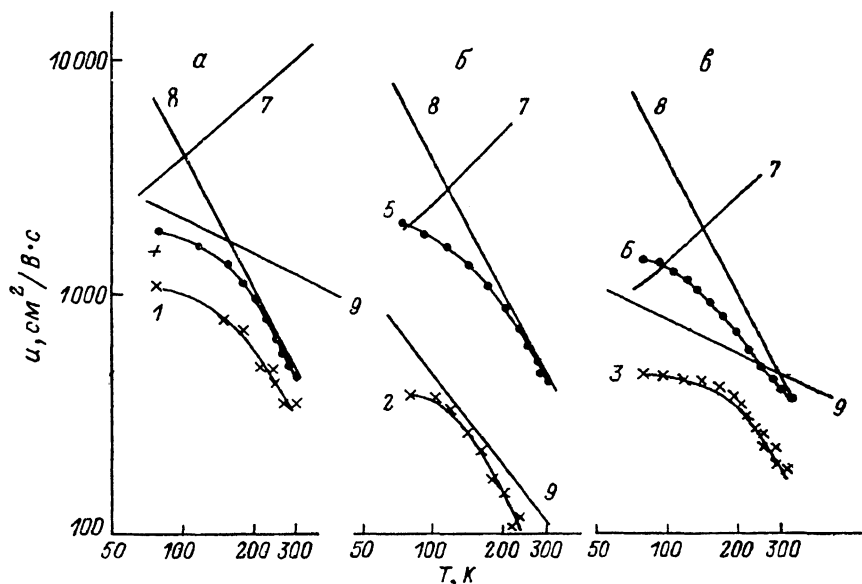


Рис. 2. Зависимость подвижности от температуры для образцов с различными x .

а — 0.1, б — 0.15, в — 0.2. Номера кривых здесь и на рис. 3, 4 соответствуют номерам образцов в таблице; 7—9 — подвижности в образцах на подложках $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ для рассеяния на ионах примеси u_T , на решетке u_R и дефектах u_S .

ных образцах. Особенно сильное занижение подвижности (в 5—10 раз) наблюдалось в образцах с $x \approx 0.15$.

На рис. 2 и 3 представлены температурные зависимости подвижности μ и магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho$ для типичных образцов, характеристики которых даны в таблице.

На рис. 2 видно, что во всех образцах, полученных на подложках $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ (кривые 1—3), характер зависимости $\mu(T)$ такой же, как в образцах, полученных на подложках с промежуточным изолирующим слоем (кривые 4—6), однако значения подвижности занижены во всей области температур, и если в последних образцах подвижность определяется только рассеянием на ионах примесей

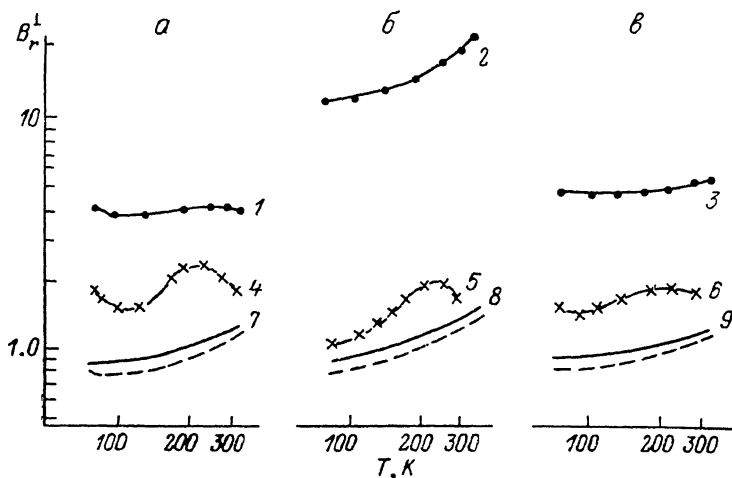


Рис. 3. Зависимость коэффициента поперечного магнитосопротивления B_r^\perp от температуры для образцов с различными x .

x : а — 0.1, б — 0.15, в — 0.2; штрихи — расчет по теории [5]; 7—9 — коррелированные значения $B_r^{\text{теор}}$ для образцов 1—3.

\bar{u}_T и на колебаниях решетки $u_p \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{u_T} + \frac{1}{u_p} \right)$ [4], то в образцах на подложке $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ действует дополнительный механизм рассеяния

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{u_T} + \frac{1}{u_p} + \frac{1}{u_S} \right), \quad (1)$$

где u_S — подвижность, связанная с этим дополнительным механизмом рассеяния.

№ образца	Состав, %		$\rho \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$		$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$		B_r^\perp	B_r^\parallel	u_0^\parallel	f	u_S (77 К)	$N_{\text{ОПЗ}}^*$	$K = \frac{N_D}{N_A}$
	x	y	300 К	77 К	300 К	77 К	77 К						
1	9.2	93	6.6	1.2	370	1100	4.2	0.4	2000	0.4	2280	3.5	0.53
2	15.6	86	70	3.4	118	377	11	2	1400	0.56	516	30	0.77
3	21	79	300	8.7	185	454	4.7	1.8	900	0.45	916	11	0.5
4*	11	93	6.2	1.5	463	1870	1.7	0.13	2500	0.15	7420	1	0.35
5*	15.5	86	9.4	0.59	363	1950	1.1	0.1	2200	0.12	17000	1	0.4
6*	20.2	80	8.7	2.8	416	1384	1.6	0.1	1600	0.15	1600	1	0.3

Примечание. * Контрольные образцы на подложке $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ с промежуточным изолирующим слоем.

Известно, что к природе рассеяния и типу рассеивающих центров очень чувствительно магнитосопротивление. На рис. 3 представлена температурная зависимость коэффициента поперечного магнитосопротивления $B_r^\perp = (\Delta\rho/\rho)/(\mu H/c)^2$. Видно, что в образцах, полученных на подложках $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ (кривые 1—3), B_r^\perp гораздо выше, чем в образцах, полученных на изолирующей подложке (кривые 4—6), для которых величина B_r^\perp близка к теоретическим значениям,

рассчитанным для рассеяния на ионах примеси и на колебаниях решетки с учетом легких и тяжелых дырок [5] (рис. 3, штрихи).

В образцах, выращенных на подложках n -GaSb : Te, наблюдалось и продольное магнитосопротивление $(\Delta\rho/\rho)_{||} = B_{||}^2 (uH/c)^2$, которое в образцах, выращенных на изолирующей подложке, практически отсутствовало (см. таблицу).

Теперь обратимся к фотосвойствам этих же образцов. На рис. 4 представлены спектральные зависимости напряжения фотопроводимости ($u_{ФП} \sim \Delta\sigma$) для образцов 2, 3 и 5 ($x \approx 0.15$ и ≈ 0.2) при $T=78$ и 292 К. Кривые при различных

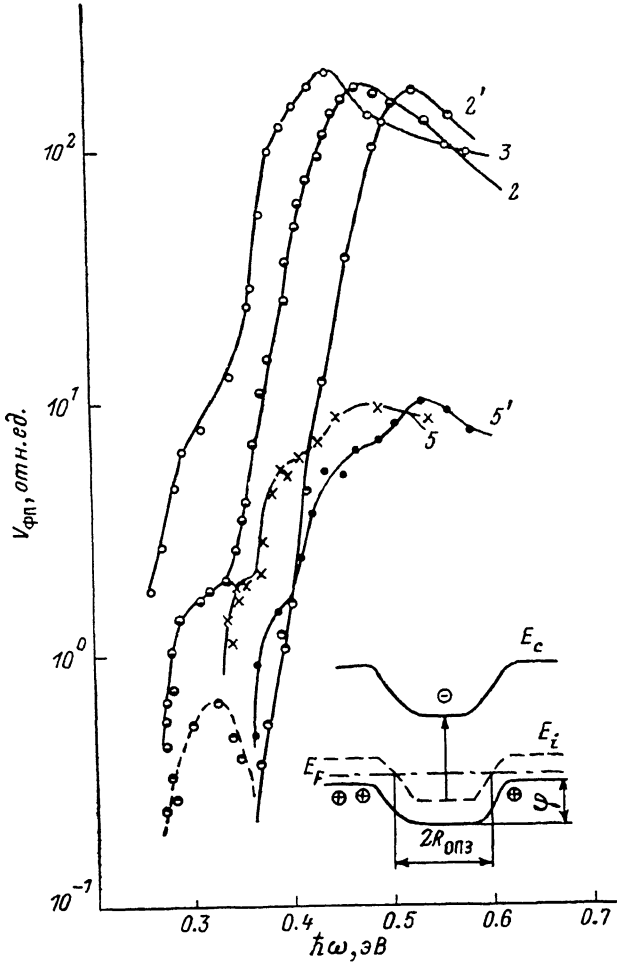


Рис. 4. Спектральные зависимости ($V_{ФП}$) твердых растворов p -GaInSbAs на подложке n -GaSb : Te.

T , К: 2, 3, 5 — 292; 2', 5' — 78.

температурах приведены к одному максимуму. Хорошо заметна разница в ходе спектральных кривых образцов 2, 3 и контрольного образца 5, выращенного на изолирующей подложке. В последнем в длинноволновой области спектра отчетливо проявляются ступеньки примесной фотопроводимости, связанные с фотоионизацией уровней двухзарядного структурного дефекта $V_{Ga}GaSb$ $E_v + (0.03 - 0.035)$ и $E_v + 0.07$ эВ [4] и соответствующие по энергии фотонов $\hbar\omega$ переходам электронов с этих уровней в зону проводимости. На спектральных кривых 2 и 3 эти ступеньки проявляются слабо или совсем исчезают. В то же время на зависимостях 2 и 3, относящихся к образцам на подложке n -GaSb : Te, в диапазоне $\hbar\omega \approx 0.35 - 0.45$ эВ при $T=300$ К хорошо виден максимум, который по энергии фотонов соответствует переходу электронов с акцепторного уровня структурных дефектов $V_{Ga}-Te$, выявленного в работе [4] как $E_v + 0.1$ эВ, в зону проводимости. При $T=78$ К (кривая 2') в этом же диапазоне спектра наблюдается

эффект отрицательной фотопроводимости (ОФП). При этом следует отметить наличие в области как отрицательного, так и положительного фотосигналов долговременной релаксации фотопроводимости ($\tau \sim 10^{-2}$ с).

2. Обсуждение результатов

Вся совокупность экспериментальных результатов для образцов, выращенных на подложке n -GaSb : Te, а именно общее уменьшение подвижности дырок, большое значение поперечного магнитосопротивления, появление продольного магнитосопротивления, наличие ОФП и долговременной релаксации фотопроводимости, может быть объяснена существованием в материале неоднородно распределенных заряженных центров, приводящих к образованию кластеров [6, 7]. В нашем случае неоднородности такого типа могут быть связаны с дефектами, за которые ответствен Te, продифундировавший в твердый раствор из подложки. Каждый примесный кластер с зарядом ze окружен слоем пространственного заряда ОПЗ радиусом $R_{\text{ОПЗ}}$ (см. вставку на рис. 4).

В рамках этой модели, если средний радиус кластера $R_{\text{ОПЗ}}$ много больше длины свободного пробега электрона, а высота барьера ϕ превышает несколько kT , перенос носителей тока можно рассматривать как движение электронов в хорошо проводящей однородной матрице с изолирующими включениями. В таком кристалле линии тока искривляются, измеряемая подвижность $u = R\sigma$ падает, однако свойства носителей тока в проводящих каналах (матрице) остаются неизменными.

Для описания экспериментальных результатов таких образцов можно воспользоваться простейшей теорией эффективной среды [8], согласно которой

$$u = u_0 \frac{1 - \frac{3}{2}f}{1 - \frac{3}{4}f}, \quad (2)$$

$$(\Delta\rho/\rho)^* = 0.3f(u_0H/c)^2, \quad (3)$$

где u_0 — истинная подвижность в матрице кристалла, f — доля объема, занятая неоднородностями.

Измерив u и $(\Delta\rho/\rho)^*$, можно по формулам (2) и (3) определить u_0 и f . Оказалось, что во всех образцах, выращенных на подложках n -GaSb : Te, доля объема, занятая неоднородностями $f = 0.4 - 0.56$, в образцах, выращенных на изолирующей подложке, $f < 0.15$ (см. таблицу).

Используя полученные значения u_0 , можно определить коррелированные значения коэффициента магнитосопротивления $B_r^{\text{коп}} = (\Delta\rho/\rho)^* / (u_0H/c)^2$ (рис. 3), которые хорошо согласуются с теорией рассеяния на ионах примесей и на колебаниях решетки в однородных образцах.

Значения u_0 в образцах $I-3$ близки к подвижности для образцов, полученных на изолирующей подложке (рис. 1, точки и стрелки). Они могут быть использованы в качестве экспериментальной подвижности для определения $u_I \left(\frac{1}{u_0} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{u_I} + \frac{1}{u_P} \right) \right)$. Определив зависимость $u_I(T)$ по формуле (1), можно найти зависимость $u_S(T)$. Как видно из рис. 2, $u_S \sim T^{-0.5}$ в образцах с $x \simeq 0.1$ и $\simeq 0.2$, а в образцах с $x \simeq 0.15$ $u_S \sim T^{-1}$.

Согласно теории Вайсберга [9], для рассеяния на областях пространственного заряда (ОПЗ)

$$u_S = e [N_{\text{ОПЗ}} (2m^*kT)^{1/2} A]^{-1}, \quad (4)$$

где $N_{\text{ОПЗ}}$ — концентрация ОПЗ, A — эффективное сечение рассеяния ОПЗ, которое для сферических областей пропорционально квадрату радиуса $R_{\text{ОПЗ}}$ и зависит от концентрации носителей тока в матрице и от температуры. При этом подвижность, связанная с рассеянием на дефектах, $u_S \sim T^{-0.5 \div -0.9}$, что и наблюдается в наших образцах. В таблице приведены значения u_S и эффективной концентрации ОПЗ ($N_{\text{ОПЗ}}^* = N_{\text{ОПЗ}}/N_{\text{ОПЗ}}^0$), нормированной к концентрации ОПЗ ($N_{\text{ОПЗ}}^0$), в соответствующих контрольных образцах. Как видно из таблицы,

наибольшее влияние кластеров наблюдается в более компенсированном образце 2 (≈ 0.15 , $K=N_D/N_A=0.77$).

Рассмотрим процессы, происходящие при освещении твердых растворов, примере образца 2, характеризующегося наибольшим скоплением кластеров. Спользуя анализ модели, проведенный в работе [7], остановимся в области имесного поглощения. При достаточной глубине ям уровни $V_{Ga}-Te$ располагаются значительно ниже уровня Ферми (см. вставку на рис. 4). При освещении светом с энергией кванта $\hbar\omega \approx 0.41$ эВ в области включений происходит фотоионизация. При этом электроны переходят в зону проводимости. Часть фотоионизированных электронов, преодолевая потенциальный барьер, покидает область включений и рекомбинирует с дырками в валентной зоне. Это приводит к уменьшению проводимости, т. е. к возникновению ОФП. С повышением температуры в результате уменьшения объема и высоты ям влияние кластеров на оптопроводимость уменьшается. Кроме этого, с ростом температуры усиливается термическая ионизация центров и, когда темп термогенерации электронов на центре $V_{Ga}-Te$ превосходит темп фотоионизации с них, т. е. при $E_s=(3-6)kT$, ОФП должна исчезнуть, что подтверждается экспериментом ($T > 170$ К).

Надо отметить, что фоточувствительность во всей области спектра, связанная большим временем жизни носителей в таком материале, оказывается более чем на порядок выше, чем в образцах, выращенных на изолирующих подложках (рис. 4, образец 2).

На основании полученных экспериментальных результатов можно дать оценки параметров кластерных скоплений. Для образца 2 с наибольшим влиянием кластеров они оказались следующими.

1. Согласно формуле $\tau = \tau_0 \exp \varphi/kT$, где τ_0 — время жизни носителей в матрице (по аналогии с GaSb τ_0 было взято равным 10^{-7} с), а τ , как показали исследования кинетики фотопроводимости, порядка 10^{-2} с, высота барьеров φ достигает 0.1 эВ.

2. Полагая, что в кристалле существуют кластеры одного типа с зарядом z , имеем потенциал барьера $\varphi = ze/\kappa r$, где κ — диэлектрическая постоянная, $r \approx a_0$ — расстояние от центра кластера, на котором потенциальный барьер уже не прозрачен для электрона. Тогда в нашем случае при $r \approx 200$ Å заряд кластера $z=35$.

3. Известно, что для сферических областей, образованных кластерными скоплениями, объем кластера $V_{ОПЗ} = z/(N_A - N_D)$, радиус области пространственного заряда $R_{ОПЗ} = \sqrt[3]{3/4(z/N_A - N_D)}$. Для образца 2 $V_{ОПЗ} = 10^{-15}$ см³, $R_{ОПЗ} = 630$ Å.

4. Привлекая найденные выше значения f (см. таблицу), находим по очевидной формуле и концентрацию кластеров: $N_{ОПЗ} = f/V_{ОПЗ} = 5.6 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

Оценки параметров кластерных скоплений для образцов 1 и 3 были сделаны из сопоставления значений $u_s \approx 1/N_s R_{ОПЗ}^2$ и доли объема, занятого кластерами, $f = N_{ОПЗ} V_{ОПЗ}$. Как видно из таблицы, число кластерных скоплений в образцах 1 и 3 значительно меньше.

Таким образом, проведенные исследования электрических и фотоэлектрических свойств твердых растворов GaInSbAs, выращенных на подложках *n*-GaSb:Te, выявили значительную роль Te в формировании кластеров, влияющих на механизм рассеяния и проводимость носителей тока, и позволили оценить параметры этих кластеров. Эта необходимо учитывать при изготовлении любых полупроводниковых приборов на основе этих твердых растворов.

Список литературы

- [1] Баранов А. Н., Джуртанов Б. Е., Именков А. Н., Шерстнев Ю. М., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2217—2221.
- [2] Андаспаева А., Баранов А. Н., Гусейнов А., Именков А. Н., Литвак А. М., Филаретова Г. М., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845—849.
- [3] Андреев И. А., Афраймов М. А., Баранов А. Н., Демильченко В. Г., Мирсагатов М. А., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 12. С. 1311—1315.
- [4] Баранов А. Н., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 98—103.

- [5] Гасанли Ш. М., Емельяненко О. В., Наследов Д. Н., Талалакин Г. Н. // ФТП. 1972 Т. 6. В. 10. С. 2053—2056.
- [6] Дахно А. Н., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Старосельцева С. П. // ФТП. 1973 Т. 13. В. 10. С. 1988—1994.
- [7] Петросян С. Г., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 7. С. 1355—1359.
- [8] Cohen M. H. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. P. 696—702.
- [9] Weisberg L. R. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. P. 1817—1821.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 18.01.1990
Принята к печати 14.02.1990

