

УДК 621.382.323

Т. С. Шамирзаев, А. И. Торопов, А. К. Бакаров, К. С. Журавлев,
Ю. Н. Раков, Ю. Б. Мякишев

(Новосибирск)

**ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Al_xGa_{1-x}As$
И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР
ДЛЯ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ***

Сообщается о получении методом молекулярно-лучевой эпитаксии высокочистых слоев твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ в диапазоне составов $0 \leq x \leq 0,38$. Полученный материал использован в гетероструктурах для мощных СВЧ-транзисторов. Изготовлены транзисторы с удельной насыщенной выходной мощностью до 1,2 Вт/мм на частоте 18 ГГц.

Развитие устройств связи, средств радиоэлектронной борьбы, радиолокации и других сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов, в состав которых входят мощные СВЧ-транзисторы на основе арсенида галлия, требует улучшения основных характеристик СВЧ-транзисторов: удельной выходной мощности ($P_{уд}$), коэффициента усиления мощности ($K_{y,p}$), коэффициента полезного действия (КПД), удельной крутизны вольт-амперных характеристик и рабочего диапазона частот [1]. Наиболее важным интегральным параметром транзисторов является удельная выходная мощность [2]. Удельная выходная мощность, достигнутая к настоящему времени на серийно выпускаемых в стране полевых СВЧ-транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ) на арсенидгаллиевых структурах, составляет 0,5–0,6 Вт/мм на частоте 18 ГГц [3]. Для повышения удельной мощности ПТШ необходимо одновременно увеличивать плотность тока исток–сток (I_c) и пробивное напряжение сток–затвор ($U_{ст-з}$). Известно, однако, что в арсенидгаллиевых структурах с однородно легированным каналом, используемых в настоящее время для серийного изготовления СВЧ-транзисторов, одновременно повысить значения $U_{ст-з}$ и I_c не удастся [2, 4]. Анализ представленных в литературе данных показал, что наибольшие значения плотности тока и пробивного напряжения имеют транзисторы, в которых затвор располагается на широкозонном материале (в качестве материала часто используются твердые растворы $AlGaAs$) [5, 6]. Величина пробивного напряжения $U_{ст-з}$ в таких структурах определяется шириной запрещенной зоны твердого раствора и уменьшается с повышением концентрации фоновых примесей в нем.

В данной работе сообщается о получении высокочистых слоев твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ с содержанием $AlAs$ в диапазоне $0 \leq x \leq 0,38$. О низ-

* Работа выполнена при поддержке гранта для молодых ученых РАН (проект № 403).

кой концентрации фоновых примесей в слоях свидетельствуют малые ширины линий рекомбинации экситонов, которые почти в 1,5–2 раза меньше минимальных экспериментальных значений, приведенных в литературе [7, 8], и не превышают значений, теоретически рассчитанных в предположении случайного распределения атомов Ga и Al в кристаллической решетке слоев $Al_xGa_{1-x}As$ [9]; кроме того, о низкой концентрации фоновых примесей свидетельствует и большое значение отношения интенсивности линии экситонов к интенсивности линии переходов зона–акцептор. Полученный широкозонный материал был использован в качестве подзатворного псевдодиэлектрика в AlGaAs/GaAs и псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах для мощных СВЧ-транзисторов. Изготовлены СВЧ-транзисторы с удельной насыщенной выходной мощностью до $P_{уд} = 1,2$ Вт/мм на частоте 18 ГГц, что сравнимо с мощностью аналогичных зарубежных транзисторов [10].

Исследуемые в работе слои AlGaAs и гетероструктуры для СВЧ-транзисторов выращивались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Riber 32P" с трехдюймовым держателем подложки на пластинах полуизолирующего GaAs(001). В качестве исходных материалов использовался мышьяк марки ОСЧ с содержанием остаточных примесей $<10^{-5}$ % (7N) фирмы "Furukawa Co. Ltd", галлий марки ОСЧ с содержанием остаточных примесей $<10^{-6}$ % (8N) и индий марки ОСЧ с содержанием остаточных примесей $<10^{-5}$ % (7N), приготовленные в ИПТМ РАН, и алюминий марки ОСЧ с содержанием остаточных примесей $<10^{-4}$ % (6N) фирмы "Vacuum Metallurgical Co. Ltd". После отжига установки при 200 °С в течение двух недель и охлаждения криопанелей жидким азотом в ростовой камере достигалось давление остаточных газов не хуже 10^{-11} Торр при дежурных режимах молекулярных источников. Ранее [11] было показано, что основными источниками фонового легирования являются нагреватель подложки и загрузочные материалы, в особенности мышьяк. Поэтому особое внимание и время было уделено тщательному обезгаживанию самих молекулярных источников, нагревателя подложки и загрузочных материалов. Источники Ga и Al отжигались в течение нескольких часов при температурах на 150 °С выше температуры рабочих режимов, отжиг мышьяка проводился при эффективном давлении в потоке $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Исследуемые слои $Al_xGa_{1-x}As$ требуемого состава толщиной 2,5–3,0 мкм помещались между двумя тонкими (25 нм) обкладками AlAs для понижения скорости поверхностной и интерфейсной рекомбинации. Буферный слой содержал короткопериодную сверхрешетку из 20 периодов $(AlAs)_5(GaAs)_{10}$. Температура роста составляла 630 °С. Давление мышьяка поддерживалось достаточным для стабилизации на ростовой поверхности сверхструктуры $(3 \times 1)As$. Последовательность слоев в гетероструктурах приведена в табл. 1, 2. На полученных гетероструктурах были изготовлены полевые транзисторы с барьером Шоттки с длиной затвора 0,5 мкм и суммарной шириной затвора 180, 300 и 900 мкм. Измерения СВЧ-параметров транзисторов проводились на зондовой установке «Поляна» на частотах 12 и 17,7 ГГц.

Стационарная фотолюминесценция (ФЛ) исследуемых слоев AlGaAs измерялась на установке, описанной в работе [11]. Для возбуждения ФЛ использовалось излучение Ar⁺-лазера на длине волны 488 нм. Плотность мощности возбуждения менялась в пределах от $3 \cdot 10^{-4}$ до 160 Вт·см⁻² с помощью

Т а б л и ц а 1

Последовательность слоев
в AlGaAs/GaAs гетероструктуре
для СВЧ-транзисторов

Слой	Толщина, нм
n^+ -GaAs (Si: $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	40
i -GaAs	10
i -Al _{0,24} Ga _{0,76} As	30
Канал n^+ -GaAs (Si: $5-6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	55–100
i -GaAs	100
CP (AlAs) ₅ (GaAs) ₁₀ × 20	–
i -GaAs	300
Подложка АГЧП-10 (100)	–

Т а б л и ц а 2

Последовательность слоев
в псевдоморфной AlGaAs/InGaAs/GaAs
гетероструктуре для СВЧ-транзисторов

Слой	Толщина, нм
n^+ -GaAs (Si: $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	40
i -GaAs	5
i -Al _{0,38} Ga _{0,62} As	30
Канал n^+ -In _{0,15} Ga _{0,85} As (Si: $2,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	19
i -GaAs	10
i -Al _{0,38} Ga _{0,62} As	100
i -GaAs	100
CP (AlAs) ₅ (GaAs) ₁₀ × 20	–
i -GaAs	300
Подложка АГЧП-10 (100)	–

нейтральных фильтров. Содержание AlAs в слоях AlGaAs определялось по формуле, предложенной в работе [12]:

$$E_g(\text{AlGaAs}) = E_g(\text{GaAs}) + 1,447x - 0,15x^2, \quad (1)$$

где значение ширины запрещенной зоны твердого раствора $E_g(\text{AlGaAs})$ рассчитывалось прибавлением энергии связи свободного экситона [13] к энергетическому положению линии рекомбинации свободного экситона в спектрах низкотемпературной ФЛ исследуемых слоев.

Спектры ФЛ намеренно не легированных слоев GaAs и Al_xGa_{1-x}As различного состава, измеренные при температуре 4,2 К, приведены на рис. 1. В спектре слоя GaAs доминирует линия FX с энергией в максимуме 1,5151 эВ, обусловленная рекомбинацией свободных экситонов [14], кроме того, наблюдается линия рекомбинации зона-акцептор (e, A) через уровни мелкого фонового акцептора углерода. Интенсивность линии (e, A) в 30 раз ниже интенсивности линии FX.

В спектрах твердых растворов Al_xGa_{1-x}As доминирует асимметричная линия X, энергия максимума которой зависит от состава твердого раствора. Низкоэнергетичное крыло этой линии описывается функцией Лоренца, а высокоэнергетичное крыло спадает экспоненциально. Интенсивность линии (e, A), которая также присутствует в спектрах, на 2–3 порядка ниже интенсивности линии X. Хорошо известно, что в спектрах низкотемпературной ФЛ твердых растворов AlGaAs доминируют линии связанных экситонов. Для

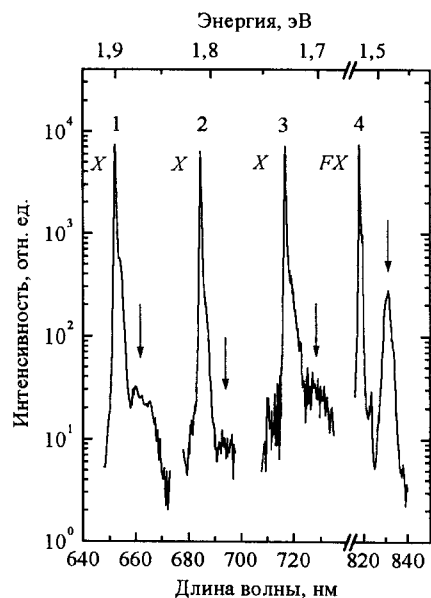


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции слоев GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, измеренные при плотности мощности возбуждения 30 мВт/см^2 и температуре 4,2 К: слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,27$ (кривая 1); 0,21 (2); 0,15 (3); 0 (4). Стрелками обозначены энергетические положения линий переходов зона–акцептор (e, A)

того чтобы однозначно идентифицировать линию X, мы измерили спектры пропускания исследуемых слоев. На рис. 2 показаны спектры ФЛ и пропускания, измеренные при температуре 4,2 К для слоя AlGaAs с содержанием AlAs $x = 0,21$. Видно, что положение максимума линии в спектре ФЛ (кривая 1) сдвинуто относительно минимума в спектре пропускания (кривая 2) на величину порядка kT , что характерно для линии свободного экситона [15]. Та-

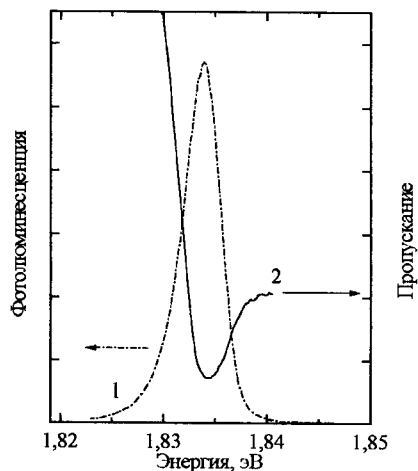


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции и оптического пропускания слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, измеренные при температуре 4,2 К: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,21$: подложка GaAs удалена с помощью химического травления

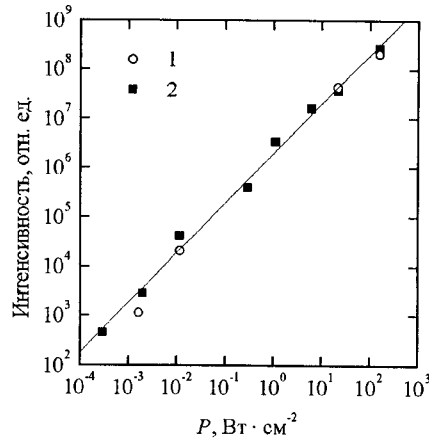


Рис. 3. Зависимости интегральной интенсивности линии свободных экситонов в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,15$ (1) и $0,21$ (2) от плотности мощности лазерного возбуждения

ким образом, мы идентифицируем линию X , как обусловленную рекомбинацией свободных экситонов.

Для сравнения концентраций мелких акцепторов углерод на месте мышьяка в слоях GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ вычислялось отношение интенсивностей линий, связанных с рекомбинацией свободных экситонов и с переходами зона-акцептор. Значение этого отношения в спектрах слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в 10–30 раз меньше, чем в спектрах слоев GaAs. Это свидетельствует о том, что концентрация мелкого акцептора углерод на месте мышьяка в этих слоях, по крайней мере, на порядок меньше, чем в слое GaAs.

На рис. 3 приведены зависимости интегральной интенсивности линии X $f = I_X(P)$ от плотности мощности возбуждения для слоев с долей Al $x = 0,15$ и $0,21$. Видно, что зависимость $f = I_X(P)$ при изменении плотности мощности в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} - 100 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ представляет собой прямую линию. Линейная зависимость $f = I_X(P)$ свидетельствует о том, что рекомбинация свободных экситонов является доминирующим каналом рекомбинации неравновесных носителей заряда в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, а концентрация центров безызлучательной рекомбинации мала. Известно, что доминирующими центрами безызлучательной рекомбинации в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ являются фоновая примесь кислорода и собственные точечные дефекты [8, 16]. Поэтому низкая концентрация центров безызлучательной рекомбинации свидетельствует о низкой концентрации этой примеси и дефектов.

На рис. 4 представлена зависимость ширины линии X , полученная при плотностях мощности возбуждения $\approx 30 \text{ мВт/см}^2$, от содержания AlAs в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Здесь же приведены данные для наиболее совершенных из известных в литературе слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии [7] и металлоорганической эпитаксии [17], и представлена расчетная зависимость ширины экситонной линии от состава твердого раствора [9]. Из рисунка видно, что значения ширины линии экситонной рекомбинации, полученные в данной работе, на 30–50 % меньше наименьших из приводимых в литературе значений и не превосходят расчетных значений из работы [9]. Данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что основным механизмом уширения линий рекомбинации

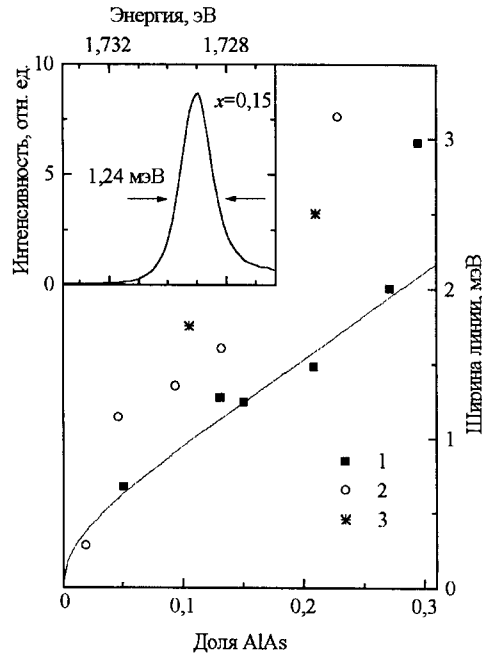


Рис. 4. Зависимость полуширины линии свободного экситона от состава твердого раствора: 1 – экспериментальные данные настоящей работы, 2 и 3 – экспериментальные данные работ [7] и [17] соответственно, сплошная линия – расчет из работы [9]: на вставке приведен спектр ФЛ с высоким разрешением для слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,15$

экситонов в спектрах исследованных слоев является влияние случайных электрических полей, возникающих вследствие хаотичного распределения атомов Al и Ga в твердом растворе; этот факт также указывает на низкую концентрацию ионизированных примесей.

Низкая концентрация фоновых примесей углерода и кислорода в исследуемых слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ связана, по-видимому, с высокой степенью сегрегации этих примесей на поверхности слоев, выращенных в условиях, обеспечивающих поддержание на их поверхности сверхструктуры $(3 \times 1)\text{As}$. Сегрегация углерода и кислорода наблюдалась ранее в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при росте многослойных структур с квантовыми ямами и является одной из причин ухудшения качества обратной гетерограницы GaAs/AlGaAs по сравнению с качеством прямой границы AlGaAs/GaAs [18, 19].

Статические и динамические характеристики транзисторов, изготовленных на основе AlGaAs/GaAs и псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур, приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что значения $P_{\text{уд}}$ и КПД изготовленных нами транзисторов в два раза выше, чем у серийно выпускаемых в стране приборов, и сравнимы со значениями параметров аналогичных транзисторов, выпускаемых за рубежом [10, 20]. Интегральные ПТШ были использованы в квазимонолитных усилителях мощности с распределенным усилением. Использование интегральных гетероструктурных псевдоморфных ПТШ обеспечило в диапазоне 2–16 ГГц выходную мощность 250–375 мВт при КПД = 12–17 % [21]. Использование ПТШ на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs позволило в диапазоне S поднять уровень выходной

Результаты измерения статических и динамических характеристик полевых транзисторов, изготовленных на AlGaAs/GaAs и псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах

Параметры	Гетероструктура	
	AlGaAs/GaAs	AlGaAs/InGaAs/GaAs
Статические параметры ПТШ		
Удельный максимальный насыщенный ток стока (при напряжении на затворе +1,5 В), мА/мм	500–525	250–320
Удельный насыщенный ток стока, мА/мм	330–350	133–167
Удельная крутизна, мСм/мм	110–120	117–133
Напряжение насыщения тока стока, В	1,3–1,5	1,1–1,3
Напряжение отсечки затвора, В	–3,0–4,0	–1,4–1,6
Пробивное напряжение затвор–сток при токе затвора 0,1 мА/мм, В	14–18	20–25
Динамические параметры ПТШ на частоте измерения 17,7 ГГц		
Малосигнальный коэффициент усиления, дБ	6,2–8,2	7–9,3
Удельная выходная мощность при сжатии $K_{ур}$ на 1дБ ($P - 1$), Вт/мм	0,8–1,1	0,65–0,77
Удельная насыщенная мощность, Вт/мм	0,9–1,2	0,76–0,84
КПД по добавленной мощности, %	45–60	47–51

Примечание. Динамические характеристики ПТШ измерялись при токе исток–сток 160 мА/мм и напряжениях исток–сток 7–8 В и исток–затвор –2 и –0,5 В для транзисторов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs и AlGaAs/InGaAs/GaAs соответственно.

мощности с кристалла квазимонолитного усилителя мощности с 1,8 до 2,9 Вт при КПД = 25–30 %.

Таким образом, в данной работе сообщается о получении методом молекулярно-лучевой эпитаксии сверхчистого $Al_xGa_{1-x}As$ при $0 \leq x \leq 0,38$ с низким содержанием фоновых примесей углерода и кислорода. Изготовлены полевые СВЧ-транзисторы с уровнем удельной выходной мощности 0,8–1,2 Вт/мм с КПД = 51–60 %, что в два раза превышает уровень ПТШ на основе GaAs, серийно выпускаемых в России, и сравнимо с мощностью транзисторов, выпускаемых за рубежом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеева О. Арсенидгаллиевые ИС. Современный уровень и перспективы // Электроника. 1997. № 2. С. 39.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991.

3. **Новости СВЧ-техники.** 1995. № 10. С. 7.
4. **Пашковский А. Б.** Сравнение характеристик полевых СВЧ-транзисторов со ступенчатым и однородным профилем легирования активного слоя // *Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ.* 1986. 4. С. 14.
5. **Cooper S., Anderson K., Salzman K. et al.** 8-watt high efficiency X-band power amplifier using AlGaAs/GaAs HFET technology // *GaAs IC Symp.* 1992. P. 183.
6. **Greenberg D. R., Del Alamo J. A., Harbison J. P., Florez L. T.** A pseudomorphic AlGaAs/n + InGaAs metal-insulator-doped channel FET for broad-band, large-signal applications // *IEEE Electron Dev. Lett.* 1991. 12, N 8. P. 436.
7. **Reynolds D. C., Bajaj K. K., Litton C. W. et al.** Excitonic photoluminescence linewidths in AlGaAs grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1986. 48, N 11. P. 727.
8. **Pavesi L., Guzzi M.** Photoluminescence of AlGaAs alloys // *Journ. Appl. Phys.* 1994. 75, N 4. P. 4779.
9. **Lee S. M., Bajaj K. K.** // *Journ. Appl. Phys.* 1993. 73. P. 1788.
10. **Matsunaga K. et al.** A 12 GHz, 12 W HJFET amplifier with 48 % peak power-aided efficiency // *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* 1995. 5, N 11. P. 402.
11. **Zhuravlev K. S., Kalagin A. K., Moshegov N. T. et al.** Effect of the cracking zone temperature of a solid state arsenic source on the composition of background impurities in GaAs obtained by molecular beam epitaxy // *Semiconductors.* 1996. 30. P. 891.
12. **Allali M. E., Sorensen C. B., Veje E., Tidemand-Petersson P.** Experimental determination of the GaAs and GaAlAs band-gap energy dependence on temperature and aluminium mole fraction in the direct band-gap region // *Phys. Rev. B.* 1993. 48, N 11. P. 4398.
13. **Monemar B.** Fundamental energy gaps of AlAs and AlP from photoluminescence excitation spectra // *Phys. Rev. B.* 1973. 8, N 12. P. 5711.
14. **Elman B. S., Koteles E. S., Zemon S. A., Chi Y. J.** Very high purity GaAs: Free exciton dominated 5-K photoluminescence and magnetophotoluminescence spectra // *Journ. Vac. Sci. Technol. B.* 1987. 5, N 3. P. 757.
15. **Bebb H. B., Williams E. W.** *Semiconductors and Semimetals* /Ed. by R. K. Willardson. N. Y.: Academic, 1972. V. 8. P. 181.
16. **Chand N., Chu S. N. G., Jordan A. S., Geva M.** // *Journ. Vac. Sci. Technol. B.* 1992. 10. P. 807.
17. **Olsthoorn S. M., Driessen F. A. J. M., Gilling L. J.** Excitonic photoluminescence spectra of AlGaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1991. 58, N 12. P. 1274.
18. **Chand N., Chu S. N. G., Geva M.** Effects of substrate misorientation on incorporation of ambient oxygen and infacial roughness in AlGaAs/GaAs heterostructures grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1991. 59, N 22. P. 2874.
19. **Zhang D. H., Li C. Y., Yoon S. F.** Influence of substrate misorientation on quality of active region and performance of GaAs/AlGaAs triple-quantum-well lasers grown by molecular beam epitaxy // *Journ. Cryst. Growth.* 1997. 181, N 1–2. P. 1.
20. **Раков Ю. Н., Мякишев Ю. Б., Журавлев К. С. и др.** Применение высокочистых слоев $Al_xGa_{1-x}As$ в структурах мощных СВЧ-полевых транзисторов // *Электрон. техника. Сер. СВЧ-техника.* 1999. Вып. 1.
21. **Мякишев Ю. Б., Раков Ю. Н., Аксенов Б. Н.** Мощные СВЧ гетероструктурные полевые транзисторы // Тезисы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 25–27 апреля 2000 г.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
Научно-производственное предприятие «Октава»,
E-mail: timur@thermo.isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
21 марта 2001 г.*