

06;09;12

Применение высокочистых слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в эпитаксиальных структурах для мощных полевых СВЧ транзисторов

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

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
НПП ОКТАВА, Новосибирск

Поступило в Редакцию 25 марта 1999 г.

Сообщается о получении методом молекулярно-лучевой эпитаксии высокочистых слоев твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в диапазоне составов $0 \leq x \leq 0.38$. В спектрах низкотемпературной фотолюминесценции полученных слоев доминирует линия рекомбинации свободных экситонов (X). Малая ширина линии X , большая величина отношения интенсивности этой линии к интенсивности линии переходов зона-акцептор, а также линейная зависимость интенсивности линии X от плотности мощности возбуждения в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} - 100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-2}$ свидетельствуют о низкой концентрации фоновых примесей в данных слоях. Использование полученного материала в псевдоморфных $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ гетероструктурах для мощных СВЧ транзисторов позволило получить транзисторы с удельной насыщенной выходной мощностью 0.9 W/mm на частоте 18 GHz .

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), коэффициента усиления мощности (K), коэффициента полезного действия (КПД), удельной крутизны вольтамперных 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 арсенид галлиевых структурах, составляет $0.5-0.6 \text{ W/mm}$ на частоте 18 GHz [3]. Для повышения удельной мощности ПТШ необходимо одновременно увеличивать

плотность тока исток–сток (I_1) и пробивное напряжение сток–затвор (U_2). Известно, однако, что в арсенидгаллиевых структурах с однородно легированным каналом, используемых в настоящее время для серийного изготовления СВЧ транзисторов, одновременно повысить значения U_2 и I_1 не удастся [2,4]. Анализ представленных в литературе данных показал, что наибольшие значения плотности тока и пробивного напряжения имеют транзисторы, изготовленные на основе псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур [5,6], в которых затвор располагается на широкозонном материале, а в качестве канала используется сильно легированный тройной раствор InGaAs. Величина пробивного напряжения U_2 в таких структурах определяется концентрацией фоновых примесей в AlGaAs и глубиной AlGaAs/InGaAs/GaAs квантовой ямы.

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 низкой концентрации фоновых примесей в слоях свидетельствуют малые ширины линий рекомбинации экситонов, которые почти в 1.5 раза меньше минимальных экспериментальных значений, приведенных в литературе [7,8], и не превышают значений, теоретически рассчитанных в предположении случайного распределения атомов Ga и As в кристаллической решетке слоев $Al_xGa_{1-x}As$ [9], а также большая величина отношения интенсивности линии рекомбинации экситонов к интенсивности линии переходов зона–акцептор. Использование полученного высокочистого материала в псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах для мощных СВЧ транзисторов позволило повысить U_2 до 25 V, что на 25% выше значений, полученных при использовании AlGaAs с уровнем легирования порядка $n = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, и изготовить транзисторы с удельной насыщенной выходной мощностью $P = 0.9 \text{ W/mm}$ на частоте 18 GHz, что сравнимо с мощностью аналогичных зарубежных транзисторов [10].

Исследуемые в работе слои и псевдоморфные AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктуры для СВЧ транзисторов выращивались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии Riber 32P с трехдюймовым держателем подложки на пластинах полуизолирующего GaAs(001). Последовательность слоев в структуре приведена в табл. 1. В качестве исходных материалов использовались 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

Таблица 1. Последовательность слоев в псевдоморфной AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктуре для СВЧ транзисторов

| Слой | Толщина, nm |
|---|-------------|
| n^+ GaAs (Si: $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) | 40 |
| i GaAs | 5 |
| i -Al _{0.38} Ga _{0.62} As | 30 |
| n^+ In _{0.15} Ga _{0.85} As канал (Si: $2.8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) | 15 |
| i GaAs | 10 |
| i -Al _{0.38} Ga _{0.62} As | 100 |
| i GaAs | 100 |
| CP (AlAs) ₅ (GaAs) ₁₀ × 20 | |
| i GaAs | 300 |
| АГЧП-10 (100) подложка | |

в ИПТМ РАН, и алюминий марки ОСЧ с содержанием остаточных примесей $< 10^{-4}\%$ (6N) фирмы Vacuum Metallurgical Co.Ltd. После отжига установки при 200°C в течение двух недель и охлаждения криопанелей жидким азотом в ростовой камере достигалось давление остаточных газов не хуже 10^{-11} Торг при дежурных режимах молекулярных источников. На полученных гетероструктурах были изготовлены полевые транзисторы с барьером Шоттки с длиной затвора $0.5 \mu\text{m}$ и шириной канала 180 и $300 \mu\text{m}$. Измерение СВЧ параметров транзисторов проводилось на зондовой установке "Поляна" на частотах 12 и 17.7 GHz .

Спектры фотолуминесценции намеренно нелегированных слоев GaAs и Al _{x} Ga _{$1-x$} As различного состава, измеренные при температуре 4.2 K , приведены на рис. 1. В спектре слоя GaAs доминирует линия FX с энергией в максимуме 1.5151 eV , обусловленная рекомбинацией свободных экситонов [11], 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 _{x} Ga _{$1-x$} 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) на $2-3$ порядка величины ниже интенсивности линии X. При изменении температуры измерения (T) от 4.2 до 30 K

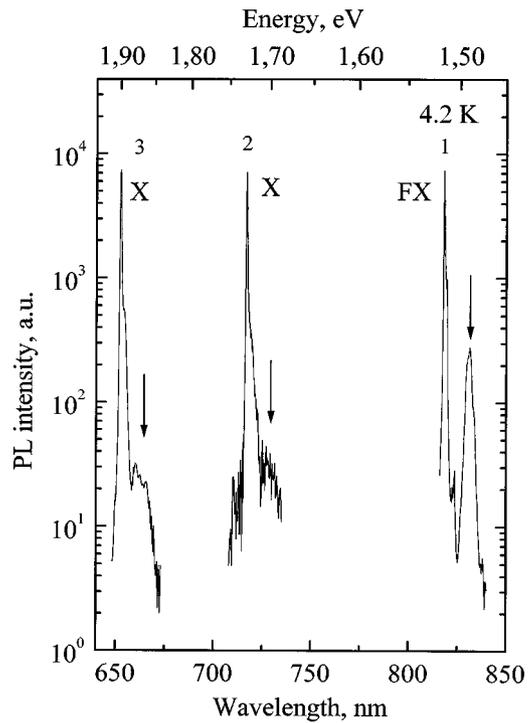


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$, измеренные при плотности мощности возбуждения 15 mW/cm^2 и температуре 4.2 K . Состав слоев $Al_xGa_{1-x}As$, x : 1 — $x = 0$; 2 — $x = 0.17$; 3 — $x = 0.27$. Стрелками обозначены энергетические положения линий переходов зона-акцептор.

форма высокоэнергетичного крыла линии X не изменяется. Форма коротковолнового крыла этой линии при различных температурах (T) описывается функцией $-a \cdot \exp(-\hbar\omega/kT)$, где a — константа, $\hbar\omega$ — энергия фотона, k — постоянная Больцмана. Форма линии X и ее температурная зависимость свидетельствуют о том, что эта линия обусловлена рекомбинацией свободных экситонов [12].

На рис. 2 приведены зависимости интегральной интенсивности линии X $f = I_x(P)$ от плотности мощности возбуждения для слоев с

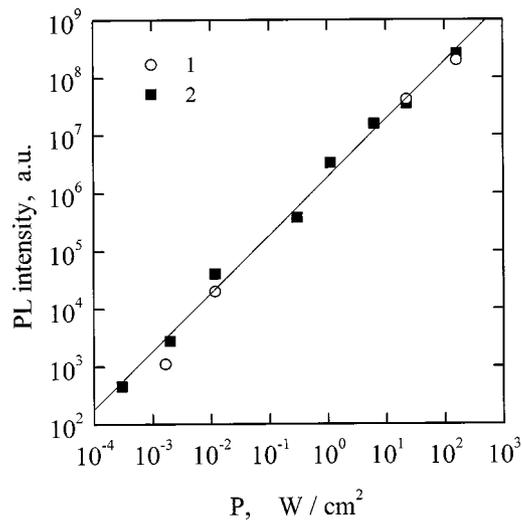


Рис. 2. Зависимости интегральной интенсивности линии свободных экситонов в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (с 1 — $x = 0.17$; 2 — $x = 0.24$) от плотности мощности лазерного возбуждения.

долей Al $x = 0.17$ и $x = 0.24$. Видно, что зависимость $f = I_x(P)$ при изменении плотности мощности в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} - 100 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ представляет собой прямую линию. Это 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, кислород и собственные точечные дефекты [8,13]. Поэтому низкая концентрация центров безызлучательной рекомбинации свидетельствует о низкой концентрации этой примеси и дефектов.

Значения ширины линии X , полученные в данной работе при плотности мощности возбуждения, равной $3 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, на 30–50% меньше минимальных из приводимых в литературе значений [17] и не превосходят расчетных значений ширины линии в не содержащем примесей твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ со случайным распределением

Таблица 2. Результаты измерения статических и динамических характеристик полевых транзисторов, изготовленных на псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах

| Статические параметры | Значения параметров | |
|--|---------------------|------|
| Удельный максимальный насыщенный ток стока (при напряжении на затворе +1.5 V), mA/mm | 600 | |
| Удельный насыщенный ток стока, mA/mm | 333 | |
| Удельная крутизна, mS/mm | 122 | |
| Напряжение насыщения тока стока, V | 1.1 – 1.3 | |
| Напряжение отсечки затвора, V | –2.7 | |
| Пробивное напряжение затвор–сток при токе затвора 1 mA/mm, V | 25 | |
| Динамические параметры ПТШ | | |
| Частота измерения, GHz | 12 | 17.7 |
| Малосигнальный коэффициент усиления, dB | 7.6 | 6.8 |
| Удельная выходная мощность при сжатии K на 1 dB (P-1), W/mm | 0.62 | 0.78 |
| Удельная насыщенная мощность, W/mm | 0.77 | 0.91 |
| КПД по добавленной мощности, % | 41 | 60 |

Примечание: Динамические характеристики ПТШ измерялись при напряжениях исток–сток 7.0 V и исток–затвор –1.3 V, токе исток–сток 220 mA/mm на частоте 12 GHz и при напряжениях исток–сток 7.0 V и исток–затвор –2.0 V, токе исток–сток 160 mA/mm на частоте 17.7 GHz.

атомов Ga и Al в кристаллической решетке [9]. Это указывает на то, что основным механизмом уширения линий рекомбинации экситонов в спектрах исследованных слоев является влияние случайных электрических полей, возникающих вследствие хаотичного распределения атомов Al и Ga в твердом растворе, а концентрация ионизированных примесей в исследуемом материале мала.

Низкая концентрация фоновых примесей углерода и кислорода в исследуемых слоях $Al_xGa_{1-x}As$ связана, по-видимому, с высокой степенью сегрегации этих примесей на поверхности слоев, выращенных

в условиях, обеспечивающих поддержание на их поверхности сверхструктуры (3×1) 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 [14,15].

Статистические и динамические характеристики транзисторов, изготовленных на основе псевдоморфных гетероструктур, приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что значения P и K изготовленных нами транзисторов в 1.5–2 раза выше, чем у серийно выпускаемых в стране приборов и сравнимы со значениями параметров аналогичных транзисторов, выпускаемых за рубежом [10].

Таким образом, в данной работе сообщается о получении методом МЛЭ сверхчистого $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в диапазоне составов твердых растворов $0 \leq x \leq 0.38$, с низким содержанием фоновых примесей углерода и кислорода. Введение слоев сверхчистого $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в качестве изолятора под затвор полевого СВЧ транзистора позволило повысить величину пробивного напряжения U_2 до 25 В. Достигнутый уровень удельной выходной мощности транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур в 1.5–2.0 раза превышает уровень серийно выпускаемых в России на основе GaAs ПТШ и сравним с мощностью транзисторов, выпускаемых за рубежом.

Список литературы

- [1] *Сергеева О.* // Электроника. 1997 № 2. С. 39.
- [2] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [3] *Новости СВЧ техники.* 1995. № 10. С. 7.
- [4] *Паиковский А.Б.* // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1986. В. 4. С. 14.
- [5] *Cooper S., Anderson K., Salzman K., Culbertson R., Mason J., Bryant D., Saunier P.* // GaAs IC Symposium. 1992. P. 183.
- [6] *Greenberg D.R., del Alamo J.A., Harbison J.P., Florez L.T.* // IEEE Electron Device Letters. 1991. V. 12. P. 436.
- [7] *Reynolds D.C., Bajaj K.K., Litton C.W., Yu P.W., Klem J., Peng C.K., Morkoc H., Singh J.* // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 727.
- [8] *Pavesi L., Guzzi M.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. P. 4779.

- [9] *Lee S.M., Bajaj K.K.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. P. 1788.
- [10] *Matsunaga K. et al.* // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1995. V. 5. P. 402.
- [11] *Elman B.S., Koteles E.S., Zemon S.A., Chi Y.J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1987. V. 5. P. 757.
- [12] *Aoki K., Okuyama Y., Kobayashi T., Yamamoto K.* // J. Phys. C. 1979. V. 12. P. 647.
- [13] *Chand N., Chu S.N.G., Jordan A.S., Geva M.* // J. Vacuum Sci. Technol. B. 1992. V. 10. P. 807.
- [14] *Chand N., Chu S.N.G., Geva M.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 2874.
- [15] *Zhang D.H., Li C.Y., Yoon S.F.* // J. Cryst. Growth. 1997. V. 181. P. 1.