

08

Электронная структура наноразмерных структур $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, созданных на поверхности GaAs методом ионной имплантации

© С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова

Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан
e-mail: ftmet@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 13 января 2015 г.)

Исследованы морфология и электронные свойства поверхности нанокристаллических фаз и нанопленок $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с толщиной 2.0–7.0 nm, созданных на поверхности GaAs (111), имплантированных ионами Al^+ в сочетании с отжигом (лазерный + температурный). Показано, что ширина запрещенной зоны E_g нанокристаллической фазы $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ с поверхностными размерами 25–30 nm составляет 2.8–2.9 eV.

Введение

Трехкомпонентные гетероэпитаксиальные слои типа Al–Ga–As, In–Ga–As и Ga–In–P выращенные на поверхности GaAs в настоящее время хорошо изучены, что связано с широким применением их в различных приборах микро- и оптоэлектроники [1–6]. Особый интерес представляют многослойные МЛЭ-структуры — $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$, кристаллическая структура и параметры решетки которых хорошо согласуются друг с другом. Расчеты в работе [7,8] показали, что тетрагональный твердый раствор $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ должен быть непрямозонным при $x \leq 0.4–0.45$ и прямозонным при $x > 0.45$. Таким образом, в зависимости от значения x могут существенно меняться оптические, электрические и др. свойства эпитаксиальных структур. Известно [1], что в процессе МЛЭ-роста однородные полупроводниковые пленки формируются начиная с толщины 10.0–15.0 nm. В создании приборов опто- и наноэлектроники нового поколения большой интерес представляет получение упорядоченных структур на основе соединений A_3B_5 с толщиной менее 5.0–10.0 nm. На наш взгляд, одним из перспективных методов получения таких пленок является ионная имплантация в сочетании с отжигом.

Нами ранее [9–12] изучено влияние бомбардировки ионами Ag^+ , Ba^+ и Na^+ на состав и структуру поверхности пленок GaAs. При этом установлено, что при бомбардировке ионами Ag^+ с высокой дозой поверхность обогащается атомами Ga, а при бомбардировке ионами Me (Ba и Na) — атомами Ga и Me. Эти процессы сопровождаются разупорядочением приповерхностной области. После прогрева при оптимальной температуре образуются эпитаксиальные нанокристаллические фазы (при имплантации с $D \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) и нанокристаллические пленки (при $D \geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) типа $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}$. Однако подобные исследования для GaAs, имплантированного низкоэнергетическими ионами ($E_0 \leq 5–10 \text{ keV}$), практически не проводились.

Настоящая работа посвящена получению нанокристаллов и нанопленок $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ в поверхностной области GaAs имплантацией ионов Al^+ в сочетании с отжигом (лазерный + температурный) и изучению их состава и электронной структуры.

Методика экспериментов

В качестве объектов исследования были выбраны пленки n - и p -типа GaAs/Ge(111) с толщиной $d = 500 \text{ nm}$. Бомбардировка проводилась ионами Al^+ с вариацией энергии в интервале E_0 от 0.5 до 5 keV и дозой облучения $D = 10^{14}–10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

Исследования проводились с использованием методов: оже-электронной спектроскопии (ОЭС), растровой электронной микроскопии (РЭМ), дифракции быстрых электронов (ДБЭ), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и снятием зависимостей коэффициентов вторично-электронной эмиссии (КВЭЭ). Для определения профиля распределения атомов по глубине проводился послойный оже-анализ путем распыления поверхности образца ионами Ar^+ с энергией 3 keV при угле падения $\sim 85^\circ$ относительно нормали, скорость травления составляла $\sim (5 \pm 1) \text{ \AA}/\text{min}$. Ультрафиолетовые фотоэлектронные спектры снимались при энергиях фотонов $h\nu \approx 10.8 \text{ eV}$. Источником фотонов служила стандартная газоразрядная водородная лампа. РЭМ-изображения сняты на стандартной установке типа SUPRA-40. Техника и методика экспериментов подробно описаны в [11].

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 приведены РЭМ-изображения и ДБЭ-картинки (вставки) поверхности чистого GaAs(111) и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, полученные после прогрева при $T = 850 \text{ K}$ GaAs, имплантированного ионами Al^+ с $E_0 = 1 \text{ keV}$ при $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Результаты ОЭС показали, что в данном случае значение x лежит в пределах 0.45–0.5. Следовательно, можно полагать, что образуются соединения с примерным составом $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$. Увеличивая температуру, можно уменьшит содержание Al. Например при $T = 950 \text{ K}$ поверхностная концентрация Al составляла 15–20 at.% и образовалось соединение типа $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$. Из рис. 1 видно, что поверхность чистого GaAs обладает гладким микрорельефом. Что касается

нанопленки $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$, то она состоит из отдельных монокристаллических наноблоков с поверхностными размерами $d = 10-20$ nm. Хотя эти отдельные блоки выращиваются эпитаксиально, на некоторых из них кристаллографические ориентации на границах не совпадают друг с другом, следовательно, на ДБЭ-картине появляются узкие концентрические кольца с точечными рефлексами, характерные для текстурированных пленок. Наши дальнейшие исследования показали, что при отжиге ионно-легированного GaAs с использованием лазерного излучения с плотностью энергии $W = 1.6 J \cdot cm^{-2}$ в сочетании с кратковременным прогревом до $T = 900-950$ K формируется однородная эпи-

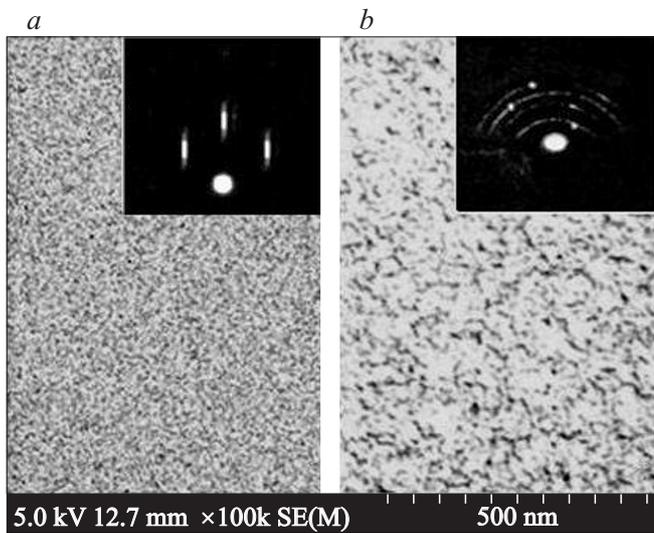


Рис. 1. РЭМ и ДБЭ-изображения поверхности: *a* — GaAs(111), *b* — $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$, полученный прогревом GaAs, имплантированного ионами Al^{+} с $E_0 = 1$ keV при $D = 4 \cdot 10^{16} cm^{-2}$.

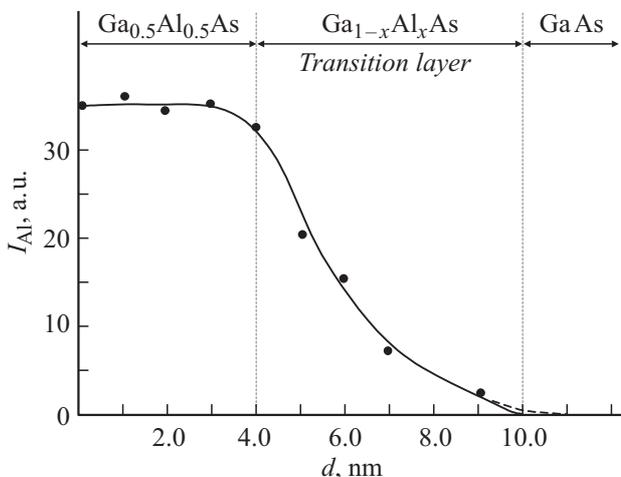


Рис. 2. Профили распределения атомов Al по глубине системы $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs$, полученной имплантацией ионов Al в GaAs с $E_0 = 1$ keV при $D = 4 \cdot 10^{16} cm^{-2}$ в сочетании с отжигом (лазерный + температурный).

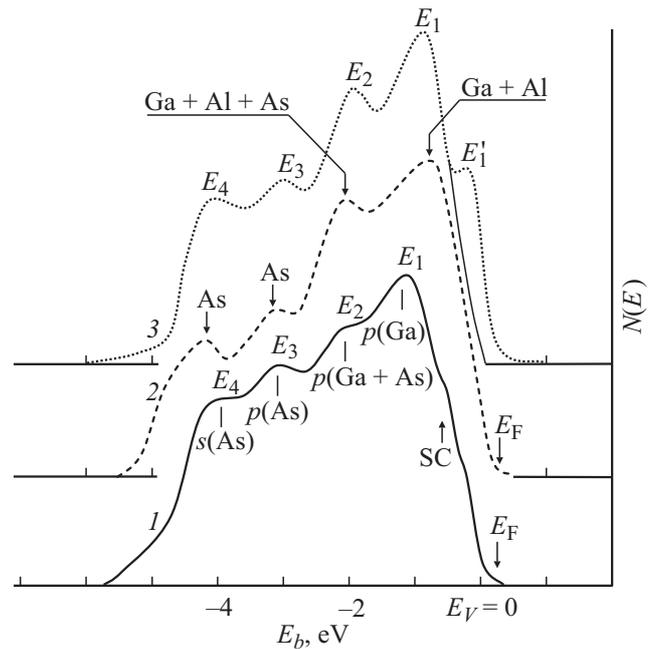


Рис. 3. Фотоэлектронные спектры: 1 — пленки чистого GaAs/Ge(111), 2 — нанопленок $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs(111)$ с $\theta = 4.0$ nm, 3 — пленки GaAs с нанокристаллами $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ с $d = 15-20$ nm.

таксиальная пленка $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs$. Изучение профиля распределения этой системы показало, что толщина пленки $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ составляет $\sim 3.5-4.0$ nm, а толщина переходного слоя, где концентрация Al монотонно уменьшается от 25 at.% до 0, составляет 5.0–6.0 nm (рис. 2).

На рис. 3 приведены фотоэлектронные спектры GaAs и $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$, снятые при энергии фотонов $h\nu = 10.8$ eV. На спектре GaAs отчетливо проявляются четыре пика, обусловленные возбуждением электронов из *s*-состояний As и *p*-состояний Ga и As, а также обнаруживаются особенности вблизи E_4 , обусловленные поверхностными состояниями. Образование трехкомпонентных соединений приводит к следующим изменениям:

- 1) ширина спектра уменьшается на 0.3–0.4 eV, т.е. положение E_V относительно E_B увеличивается на 0.3–0.4 eV,
- 2) положение пика E_1 смещается в сторону больших энергий и его ширина существенно увеличивается. Мы полагаем, что при формировании этого пика участвуют 4*p*-электроны Ga и 3*p*-электроны Al,
- 3) положение пика E_2 , обусловленного расщеплением *p*-состояний Ga, Al и As, смещается направо на 0.1–0.2 eV и увеличивается его интенсивность,
- 4) положение пиков мышьяка E_3 и E_4 заметно не изменяется, только происходит некоторое изменение их интенсивностей.

Изменяя энергию ионов Al в интервале 0.5–5 keV, можно было получить однородные пленки $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ с толщиной θ от 2.0–2.5 nm до 6.0–7.0 nm. В случае

Параметры энергетических зон для GaAs и наноструктур Ga_{0.5}Al_{0.5}As

Исследуемый объект	Толщина θ , nm	E_V , eV	E_g , eV	χ , eV
<i>n</i> -тип GaAs/Ge(111)	50.0	5.1	1.4	3.7
Нанопленки Ga _{0.5} Al _{0.5} As	2.0–2.5	5.4	2.3	3.1
	3.5–4.0	5.3	2.1	3.2
	5.0–6.0	5.3	2.1	3.2
Нанокристаллы Ga _{0.5} Al _{0.5} As $d = 15–20$ nm	3.5–4.0	5.6	2.9	2.7

отжига (лазерный + температурный) GaAs, имплантированного ионами Al с $E_0 = 1$ keV при низкой дозе ($D = 8 \cdot 10^{14}$ cm⁻²), образовались эпитаксиальные нанокристаллические фазы трехкомпонентного соединения Ga_{0.5}Al_{0.5}As с поверхностным диаметром $d = 15–20$ nm, как в случае с Si [12]. Расстояние между центрами этих фаз составляло 50–60 nm.

Известно, что имеется определенная связь между структурой кривых зависимостей КВЭЭ, снятых при низких энергиях ($E_p = 1–25$ eV), с зонным строением полупроводников и диэлектриков [13]. На рис. 4 приведены зависимости $\sigma(E_p)$, $R(E_p)$ и $\delta(E_p)$ для нанопленок Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs (111) с $\theta = 4.0$ nm. Здесь σ — полный коэффициент вторичной электронной эмиссии, δ — коэффициент истинно-вторичных электронов, R — коэффициент упруго-отраженных электронов. Из рис. 4 видно, что начальное уменьшение R наблюдается при $E_{p\eta} = 2–2.1$ eV, что соответствует началу неупругого отражения электронов без выхода в вакуум, т.е. электроны переходят с потолка валентной зоны на дно зоны проводимости: $E_{p\eta} = E_g$. Второе резкое уменьшение R наблюдается при $E_{p\delta} = 5.4$ eV, что соответствует началу роста δ , т.е. начинается эмиссия электронов в вакуум: $E_{p\delta} = E_g + \chi$.

На рис. 5 приведены зависимости $\delta(E_p)$ для пленки GaAs, нанопленки ($\theta = 4.0$ nm) Ga_{0.5}Al_{0.5}As и для GaAs

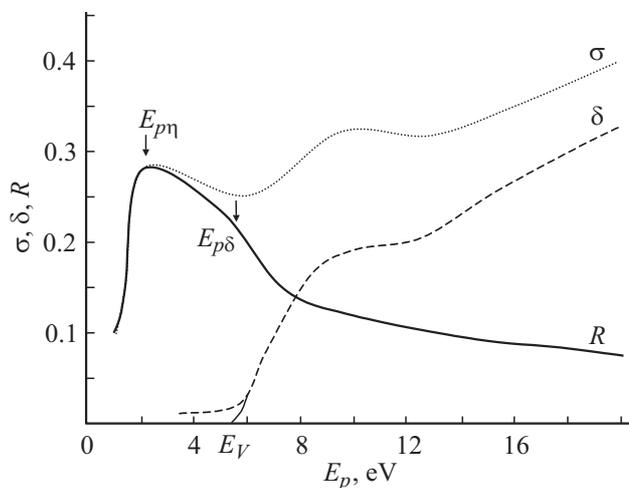


Рис. 4. Зависимость $\sigma(E_p)$, $R(E_p)$ и $\delta(E_p)$ для пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As с $\theta = 4.0$ nm.

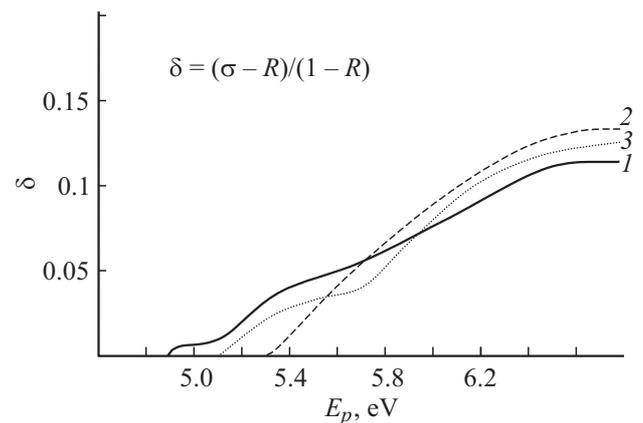


Рис. 5. Зависимости $\delta(E_p)$ для: 1 — пленки GaAs, 2 — нанопленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As с $\theta = 4.0$ nm, 3 — пленки GaAs с нанокристаллами Ga_{0.5}Al_{0.5}As.

с нанокристаллами Ga_{0.5}Al_{0.5}As с поверхностными диаметрами 15–20 nm. Видно, что для пленки GaAs начальный рост δ , который приблизительно совпадает с E_V , происходит при $E = 5.1$ eV, а в случае Ga_{0.5}Al_{0.5}As — с 5.3 eV. Эти значения хорошо согласуются с данными, полученными методом УФЭС (рис. 3). А в случае нанопленок Ga_{0.5}Al_{0.5}As начальный резкий рост δ наблюдается при двух значениях E : 5.1 и 5.6 eV. По-видимому, при $E_{V1} = 5.1$ eV истинно-вторичные электроны начинают эмитироваться из участков GaAs, а при $E = 5.6$ eV к ним прибавляются электроны, эмитируемые с нанокристаллов Ga_{0.5}Al_{0.5}As. С использованием методов УФЭС и СУРЭ нами оценены электронно-зонные параметры нанопленок и нанокристаллов. В таблице приведены оценочные значения Φ , E_g и χ для GaAs, нанопленок Ga_{0.5}Al_{0.5}As разной толщины и для нанокристалла Ga_{0.5}Al_{0.5}As с $d = 15–20$ nm. Из таблицы видно, что значение E_g для нанопленок Ga_{0.5}Al_{0.5}As с $\theta \geq 3.5–4.0$ nm составляет ~ 2.1 eV, что очень близко к E_g для массивных пленок [1]. При $\theta = 2.0–2.5$ nm значение E_g увеличивается до 2.3 eV.

Можно полагать, что размерные эффекты для этих пленок начинают проявляться с $\theta = 2.0–2.5$ nm. Более существенное проявление квантовых эффектов наблюдается в нанокристаллических фазах Ga_{0.5}Al_{0.5}As. При этом значение E_g увеличивается до ~ 2.9 eV.

Эти результаты показывают, что ионная имплантация в сочетании с отжигом является эффективным средством получения трехкомпонентных нанопленок и нанокристаллов $Ga_{1-x}Al_xAs$ в поверхностной области GaAs с новыми электронными свойствами.

Заключение

Получены наноструктуры трехкомпонентных соединений $Ga_{1-x}Al_xAs$ с толщиной $\theta = 2.0-7.0$ nm в поверхностной области GaAs имплантацией ионов Al^+ с энергиями от 0.5 до 5 keV в сочетании с отжигом. При низких дозах облучения ($D \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) формировались нанокристаллические фазы, а при больших дозах ($D \geq 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) нанопленки типа $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$. Изменяя температуру постимплантационного отжига в интервале 850–1000 K, значение x можно регулировать в пределах от 0.5 до 0.2. Наиболее однородные пленки получены после проведения лазерного отжига в сочетании с кратковременным высокотемпературным прогревом. Оценочные значения E_g для нанопленки $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs$ с $\theta = 2.0-2.5$ nm составляло ~ 2.3 eV, а для нанокристалла — 2.9 eV.

Список литературы

- [1] Ченг Л., Плог К. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Пер. с англ. / Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М.: Мир, 1989. 582 с.
- [2] Золотарев В.В., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А. и др. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 1. С. 124–128.
- [3] Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А., Мурашова А.В., Николаев Д.Н. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 3. С. 388–391.
- [4] Абрамкин Д.С., Журавлёв К.С., Шамирзаев Т.С., Ненашев А.В., Калагин А.К. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 2. С. 183–191.
- [5] Ваганов С.А., Сейсян Р.П. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 1. С. 104–110.
- [6] Середин П.В., Домашевская Э.П., Арсентьев И.Н., Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Prutskij T. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 1. С. 3–8.
- [7] Laref S., Mec-abih S., Abbar B., Bouhafis B., Laref A. // Physica. B. 2007. Vol. 396. P. 169.
- [8] Su-Huai Wei, Zunger A. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39 (5). P. 700.
- [9] Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Мурадкабиров Д.М., Болтаев Х.Х. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 66–70.
- [10] Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Рузибаева М.К., Ташатов А.К., Донаев С.Б., Мавлянов Б.Б. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 146–149.
- [11] Умирзаков Б.Е., Нормурадов М.Т., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К. Наноматериалы и перспективы их применения. Ташкент: MERIYUS, 2008. 256 с.
- [12] Болтаев Х.Х., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С.24–29.
- [13] Фридрихов С.А., Мовин С.М. Физические основы электронной техники. М.: Высшая школа, 1982. 608 с.