

Электронные и оптические свойства тонких пленок GaAlAs/GaAs

© Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, Н.М. Мустафаева

Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова,
100095 Ташкент, Узбекистан
e-mail: sardor.donaev@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 сентября 2017 г.
В окончательной редакции 16 марта 2018 г.
Принято к публикации 1 марта 2019 г.

Показано, что формирование на поверхности GaAs нанопленок GaAlAs приводит к увеличению значения коэффициента эмиссии истинно-вторичных электронов и квантового выхода фотоэлектронов, что объясняется отличием глубины зоны выхода истинно-вторичных электронов для GaAs и для GaAlAs.

Ключевые слова: эмиссионные свойства, оптические свойства, нанопленка, ионная имплантация, пленки GaAs, нанокристаллические фазы.

DOI: 10.21883/JTF.2019.10.48177.2475

Введение

В настоящее время хорошо изучены состав, структура, оптические и электронные свойства многослойных структур $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$, полученных различными методами эпитаксии, что связано с широким использованием их в различных приборах микро- и оптоэлектроники [1–6]. Постоянные решетки $Ga_{1-x}Al_xAs$ и GaAs хорошо согласуются друг с другом, а их ширины запрещенных зон отличаются в ~ 1.5 раза. Авторами ранее [7] исследованы морфология и электронные свойства поверхности нанокристаллических фаз и нанопленок $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ с толщиной 2.0–7.0 nm, созданных на поверхности GaAs(111) имплантацией ионов Al^+ в сочетании с отжигом. Показано, что ширина запрещенной зоны E_g нанопленок $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ составляет ~ 2.1 – 2.3 eV, а для нанокристаллов — ~ 2.9 eV. Однако до настоящего времени практически не изучены эмиссионные и оптические свойства тонких ($d \leq 10$ nm) пленок GaAlAs/GaAs. Подобные исследования дают богатую информацию об электронных свойствах и кристаллической структуре исследуемых пленок.

Настоящая работа посвящена изучению энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), коэффициентов отражения и поглощения света пленкой $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs$.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования были выбраны монокристаллические образцы p -типа GaAs(111) с размерами $10 \times 10 \times 0.8$ mm. Основные исследования проводились для пленок $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs(110)$ с толщиной ~ 5 – 10 nm, полученных имплантацией ионов Al^+ в GaAs с энергиями 1–8 keV при дозе $D \approx 8 \cdot 10^{16}$ cm $^{-2}$ в сочетании с прогревом при $T = 850$ – 900 K (образцы № 1) [7]. Известно, что незначительное изменение состава или параметров решетки пленки и подложки

может привести к существенному изменению свойства гетероструктуры [6–9]. Дальнейшее увеличение энергии ионов приводило к увеличению коэффициента распыления поверхности и уменьшению концентрации Al в области максимума. Следовательно, этим методом получить пленки $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ с толщиной > 10 nm с хорошей стехиометрией было невозможно. Поэтому одновременно были исследованы свойства пленок $Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs(111)$ с толщиной 5–20 nm, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) (образцы № 2).

Исследования проводились снятием зависимостей $\delta(E_p)$ и $\eta(E_p)$ в широкой области энергии первичных электронов ($E_p \approx 5$ – 1000 eV) и угловых зависимостей $\delta(\varphi)$ и $\eta(\varphi)$, где δ — коэффициент истинно-вторичных электронов, η — коэффициент неупругоотраженных электронов, измерения интенсивности проходящего света через образец, а также измерение коэффициентов преломления и отражения света. Зонно-энергетические параметры определялись по данным ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии упруго отраженных электронов. Состав поверхности контролировался методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС), а профили распределения атомов по глубине исследовались методом ОЭС в сочетании с распылением поверхности пленки ионами Ar^+ с энергией 3 keV при угле падения 85° относительно нормали. Методика эксперимента более подробно описана в [10]. При снятии угловых зависимостей $\delta(\varphi)$ и $\eta(\varphi)$ мишень поворачивалась относительно пучка первичных электронов на $\pm 70^\circ$. Во всех остальных случаях пучок электронов направлен на поверхность мишени перпендикулярно.

Экспериментальные результаты и их обсуждения

В таблице приведены значения термо- и фотоэлектронной работы выхода ($e\phi$ и $e\Phi$), максимальное

Основные эмиссионные характеристики GaAs (*p*-тип) и пленки GaAlAs

Исследуемый объект	$e\phi$, eV	eF , eV	E_g , eV	E_{pm} , eV	δ_m	H	K , ($h\nu = 10.8$ eV)
GaAs	5	5.1	1.4	500	1.1	0.26	$3 \cdot 10^{-3}$
Ga _{0.5} Al _{0.5} As	5.1	5.3	2.1	550	1.4	0.25	$6 \cdot 10^{-3}$

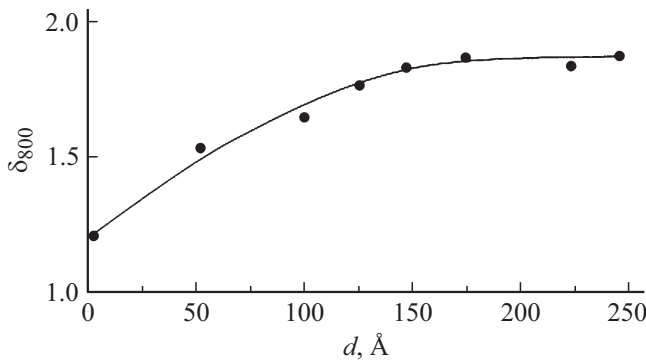


Рис. 1. Зависимость значения δ при $E_p \approx 800$ eV от толщины d МЛЭ-пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs.

значение коэффициента истинно-вторичных электронов (КИВЭ) δ_m и соответствующей ему энергии первичных электронов E_{pm} , значение коэффициента неупруго отраженных электронов при $E_p \approx 800$ eV H, а также значение квантового выхода фотоэлектронов K, снятого при $h\nu = 10.8$ eV для чистого монокристалла GaAs(111) и GaAs с пленкой Ga_{0.5}Al_{0.5}As толщиной ~ 50 Å (образец № 1).

Из таблицы видно, что в случае GaAs с нанопленкой Ga_{0.5}Al_{0.5}As, несмотря на некоторое увеличение $e\phi$, значения δ_m и K заметно увеличиваются. Отметим, что плотность (в g/cm³) Ga_{0.5}Al_{0.5}As на $\sim 20\%$ меньше, чем плотность GaAs. Однако плотность атомов (число атомов в 1 cm³) в GaAs и GaAlAs практически идентичны, и ионы элементов Ga и Al имеют почти одинаковые размеры. Поэтому $\eta_{GaAs} \approx \eta_{GaAlAs}$ и, следовательно, эмиссионные эффективности слоев GaAs и GaAlAs мало отличаются друг от друга. Тогда увеличение δ_m и K в основном могут быть обусловлены увеличением ширины запрещенной зоны и глубины зоны выхода λ истинно-вторичных электронов δ . В настоящей работе λ определялась методом снятия зависимости $\delta_{800}(d)$ [11], где δ_{800} — значения δ при $E_p = 800$ eV, d — толщина пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As, выращенной на поверхности GaAs методом МЛЭ. Величина λ для чистого GaAs определялась предварительно и составила $\sim 100-120$ Å. На рис. 1 приведена зависимость $\delta_{800}(d)$ для системы Ga_{0.5}Al_{0.5}As/GaAs.

Видно, что значение δ_{800} при $d \geq 150-160$ Å с ростом d практически не меняется, поэтому можно полагать, что глубина зоны выхода ИВЭ (а также фотоэлектронов) λ для Ga_{0.5}Al_{0.5}As составляет $150-160$ Å.

В гетероструктурных системах степень кристалличности и эпитаксиальности нанопленки представляет особый интерес. При $d < \lambda$ степень эпитаксиальности можно оценить по угловым зависимостям коэффициентов ВЭЭ. На рис. 2 приведены зависимости $\delta_{800}(\phi)$ для чистого GaAs(111) и для GaAs с пленкой Ga_{0.5}Al_{0.5}As с $d \approx 50$ Å, полученные двумя способами: ионной имплантацией с сочетанием отжига и МЛЭ. Угол ϕ определялся относительно нормали образца.

Видно, что во всех случаях с ростом ϕ происходит немонотонный рост значения δ_{800} , т.е. на зависимости $\delta_{800}(\phi)$ наблюдаются максимумы и минимумы, положения которых соответствуют определенным кристаллографическим направлениям [12]. Угловые положения максимумов GaAs и GaAlAs, полученные методом ионной бомбардировки, хорошо совпадают друг с другом. Поэтому можно сделать вывод, что в данном случае происходит строгий эпитаксиальный рост пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As. В случае МЛЭ-пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As на зависимости $\delta_{800}(\phi)$ интенсивности пиков, характерных для GaAs, существенно уменьшаются, вблизи этих пиков появляются новые пики. Изучение зависимостей $\delta(\phi)$, снятых при различных E_p , показали, что при $E_p \approx 200$ eV глубина выхода ИВЭ составляет ~ 50 Å. При этом на кривых зависимостей $\delta(d)$ пики GaAs полностью исчезают, а интенсивности пиков GaAlAs существенно увеличиваются. По-видимому, при МЛЭ-росте пленка GaAlAs имеет высокую монокристалличность и ее постоянная решетки почти идентична постоянной решетке

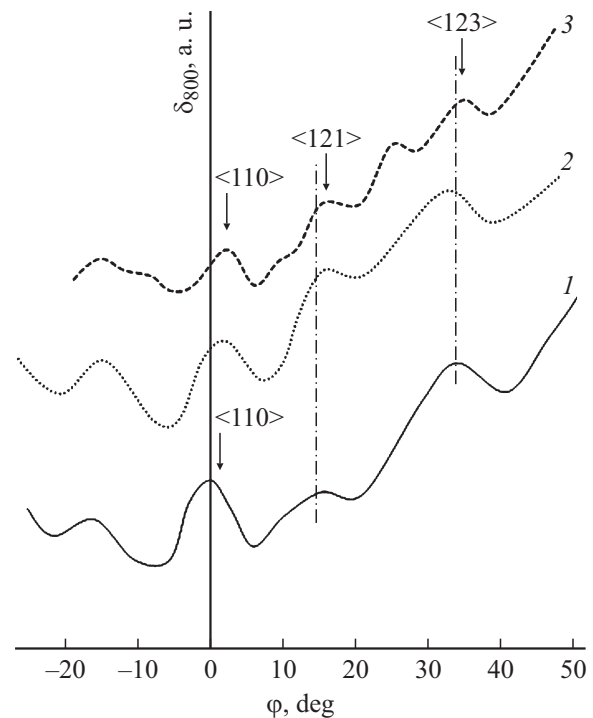


Рис. 2. Зависимости $\delta_{800}(\phi)$ для чистого GaAs (кривая 1) и для систем GaAs с пленкой Ga_{0.5}Al_{0.5}As толщиной 50 Å, полученных методом ионной имплантации (кривая 2) и МЛЭ (кривая 3).

GaAs, однако кристаллографические ориентации пленки и подложки совпадают друг с другом не полностью.

Известно, что даже после тщательной очистки GaAs(110), на его поверхности имеется определенное количество атомов углерода и наблюдается некоторая релаксация поверхности. Все эти факторы могут привести к некоторому изменению кристаллографической ориентации МЛЭ-пленки GaAlAs по отношению к GaAs. В случае ионной имплантации поверхностные слои полностью очищаются от углерода и приповерхностные слои аморфизуются. Толщина аморфизированных слоев GaAs составляет 300–400 Å, что в 3–4 раза больше, чем толщина ионно-легированных слоев. При прогреве происходит одновременная кристаллизация аморфизированных слоев GaAs и кристаллизация ионно-имплантированных слоев GaAs с образованием соединения типа Ga_{0.5}Al_{0.5}As. По-видимому, все это способствует формированию трехкомпонентной эпитаксиальной пленки, совпадающей с ориентацией матрицы.

Заключение

На основе анализа полученных результатов о структуре, эмиссионных и оптических свойствах тонких пленок GaAlAs/GaAs можно сделать следующие выводы:

1. Зонно-энергетические параметры, эмиссионные свойства и параметры решетки тонких ($d \approx 50\text{--}100 \text{ \AA}$) пленок GaAlAs, полученных методами МЛЭ и ионной имплантацией, мало отличаются друг от друга. В случае пленок, полученных методом ионной имплантации, кристаллографическая ориентация пленки и подложки хорошо совпадают друг с другом.

2. Глубина зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов для GaAs составляет $\sim 100\text{--}120 \text{ \AA}$, а для пленки Ga_{0.5}Al_{0.5}As — 150–160 Å. Значения коэффициентов η соответственно для GaAs и Ga_{0.5}Al_{0.5}As практически идентичны, а значения коэффициентов ИВЭ δ_m отличаются на 20–25%. Коэффициент отражения света K во всей исследованной области длин волн (как в области поглощения, так и в области максимального отражения) в GaAlAs до двух раз превышал значение K в GaAs. Прогрев системы GaAlAs/GaAs при $T \approx 600^\circ\text{C}$ в течение 5–10 min приводил к некоторому уменьшению K в области интенсивного поглощения света ($\lambda \leq 580 \text{ nm}$). Одной из причин этого может быть наличие в пленках GaAlAs некоторых избыточных атомов Ga или As.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Эпитаксия и гетероструктуры. / Пер. с англ. Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М.: Мир, 1989. 582 с.
- [2] Laref S., Mec-abih S., Abbar B., Bouhafis B., Laref A. // Physica. B. 2007. Vol. 396. P. 169.
- [3] Золотарев В.В., Леишко А.Ю., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Подоскин А.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Бахвалов К.В., Тарасов И.С. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 1. С. 124–128.
- [4] 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.
- [5] Чалдышев В.В., Школьник А.С., Евтихий В.П., Holden T. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 12. С. 1466–1469.
- [6] Середин П.В., Готов А.В., Домашевская Э.П., Арсентьев И.Н., Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Тарасов И.С. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 12. С. 1654–1661.
- [7] Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 148–151.
- [8] Domashevskaya E.P., Seredin P.V., Lukin A.N., Bituytskaya L.A., Grechkina M.V., Arsent'ev I.N., Vinokurov D.N., Tarasov I.S. // Surf. Interf. Analysis. 2006. Vol. 8. N 4. P. 828.
- [9] Домашевская Э.П., Гордиенко Н.Н., Румянцева Н.А., Середин П.В., Агапов Б.Л., Битюцкая Л.А., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Тарасов И.С. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 9. С. 1086–1093.
- [10] Умирзаков Б.Е., Нормурадов М.Т., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К. Наноматериалы и перспективы их применения. Ташкент: MERIYUS, 2008. 256 с.
- [11] Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
- [12] Аброян И.А. // УФН. 1971. Т. 104. Вып. 1. С. 15–50.