

**Состав и структура наноразмерных слоев $Ga_{1-x}Na_xAs$, созданных
в приповерхностной области GaAs имплантацией ионов Na^+**

Х.Х. Болтаев, Ж.Ш. Содикжанов, Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков

В работе с использованием методов оже-электронной спектроскопии и дифракции быстрых электронов изучены состав и структура наноразмерных фаз $Ga_{1-x}Na_xAs$, созданных имплантацией ионов натрия в приповерхностную область GaAs. Установлено, что при $E_0=20$ keV толщина питаксиального слоя трехкомпонентного соединения составляет 10–12 nm. При этом формируются трехслойные наносистемы $GaAs-Ga_{0.5}Na_{0.5}As-GaAs$.

DOI: 10.21883/0000000000

ВВЕДЕНИЕ

На неразмерные структуры, полученные на основе полупроводниковых пленок, имеют перспективы при разработке новых многослойных МДП, ПДП структур, барьерных слоев, электронно- и магнитозапоминающих устройств [1–4]. Нами ранее методами ионной имплантации в сочетании с отжигом в поверхностной области Si и GaAs получены нанокристаллы (НК) и нанопленки (НП) типа $CoSi_2$, $BaSi_2$, $Ga_{0.5}Na_{0.5}As$, $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ изучены их состав, электронная и кристаллическая структуры [5–7]. В частности, показано, что ширина запрещенной зоны E_g для нанопленки $Ga_{0.5}Na_{0.5}As$ составляет 2.3 eV, а для нанокристалла $Ga_{0.5}Na_{0.5}As$ — 2.9 eV. Получены и изучены электронная структура НК и НП $CoSi_2$, созданных в приповерхностной области (на глубине 20–25 nm) Si. Установлено, что, варьируя энергию ионов E_0 от 1 до 20 keV, можно регулировать глубину образования наноструктур $CoSi_2$ в пределах от 1–2 nm (на поверхности) до 15–20 nm. Настоящая работа посвящена изучению состава и структуры наноразмерных фаз $Ga_{1-x}Na_xAs$, созданных в приповерхностной области GaAs методом ионной имплантации в сочетании с отжигом.

Методика проведения экспериментов

Объектами исследования являлись монокристаллические образцы р-тип ($N_{Zn} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) GaAs (111) с толщиной $\sim 1 \text{ mm}$. Нами использовались стандартные заводские образцы GaAs (111), полированные до зеркального состояния фильтровальной бумагой (пропитанной смесью Br_2 -метанол) в сочетании с травлением в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Перед ионной имплантацией GaAs (111) обезгаживался в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7} \text{ Pa}$) при $T = 700 \text{ K}$ в течение 4–5 h и кратковременно при $T = 850 \text{ K}$. При этом поверхность полностью очищается от кислорода (на уровне чувствительности оже спектрометра), а содержание углерода уменьшается до минимума 2–3 at.%. Имплантация проводилась ионами Na^+ с энергией $E_0 = 15 \text{ keV}$ с вариацией дозы облучения D от 10^{14} до 10^{17} см^{-2} . Ионная бомбардировка, температурный прогрев, лазерный отжиг и основные исследования с использованием методов вторичной и фотоэлектронной спектроскопии (ВЭС и ФЭС) проводились в одном и том же экспериментальном приборе в условиях сверхвысокого вакуума ($P \approx 10^{-7} \text{ Pa}$). Элементный и химический составы определялись методом оже-электронной спектроскопии, а электронная структура — методами ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и путем снятия энергетической зависимости интенсивности I проходящего света через образец [8]. Кристаллическая структура и морфология поверхности контролировались использованием стандартных установок ЭМП-2 и SUPRA-40. Оптическая ширина запрещенной зоны измерялась на спектрофотометре UV-1280 в диапазоне длин волн от 300 до 1200 nm. Перед ионной имплантацией образцы GaAs обезгаживались длительным прогревом (8–10 h) при $T \approx 700\text{--}750 \text{ K}$ и многократным кратковременным прогревом ($t = 20\text{--}25 \text{ s}$) до $T \approx 900 \text{ K}$. Профили распределения атомов по глубине определялись методом ОЭС в сочетании с травлением поверхности ионами Ar^+ .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В настоящей работе наноразмерные структуры и пленки $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}$ (где Me—Al, Ва и Na) созданы в приповерхностной области GaAs на глубине 20–25 nm имплантацией

ионов Me^+ с $E_0 = 15-25$ keV. Основные исследования проводились для GaAs, имплантированного ионами Na^+ . На рис. 1 приведены изменения интенсивностей оже-пиков Na ($E = 990$ eV), Ga ($E = 1070$ eV) и As ($E = 1228$ eV) при имплантации ионов Na^+ с энергией $E_0 = 20$ keV с разными дозами в GaAs. Видно, что до $D \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

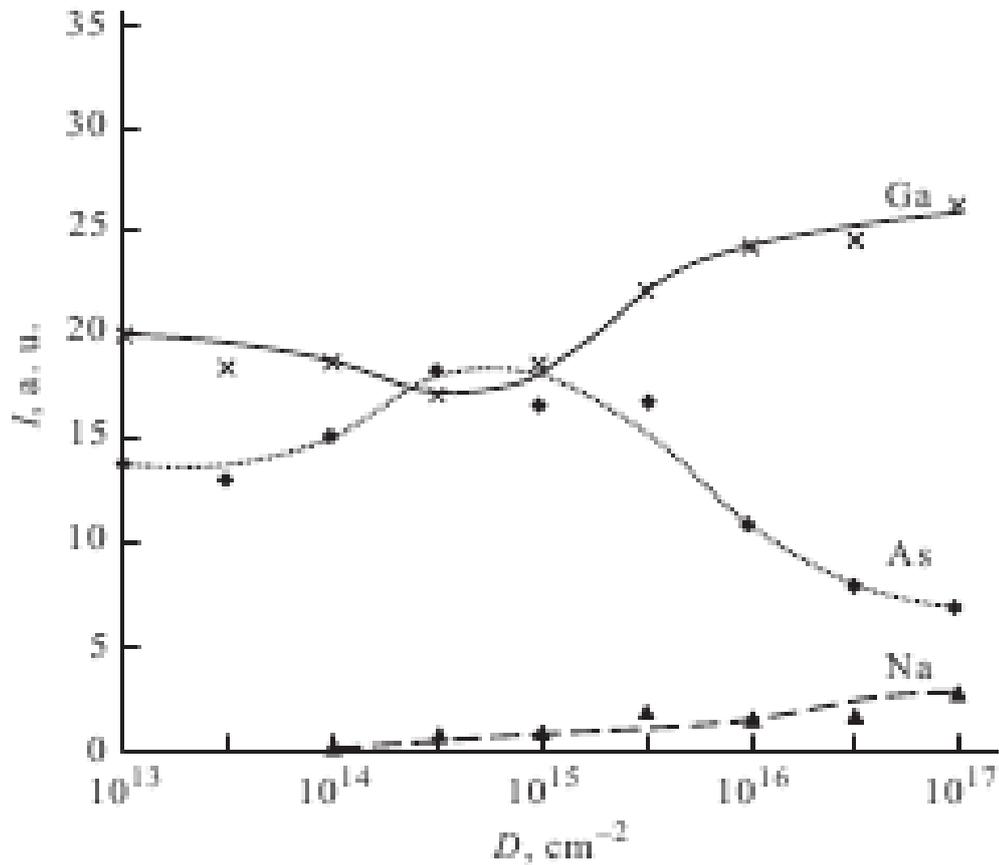


Рис. 1. Зависимости интенсивностей оже-пиков Ga (1070 eV), As (1228 eV) и Na (990 eV) от дозы ионов для GaAs, имплантированного ионами Na^+ с $E_0 = 20$ keV.

поверхностная концентрация атомов Ga и As практически не изменяется. В интервале $D = 5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ интенсивность оже-пика Ga монотонно уменьшается до минимума, а As увеличивается до максимума. Начиная с $D \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ появляется малоинтенсивный пик Na. Дальнейшее увеличение D до 10^{16} cm^{-2} приводит к заметному уменьшению интенсивности пика As и увеличению интенсивности пика Ga, а пик Na немного увеличивается. При этом поверхностная область GaAs полностью разу упорядочивается. В интервале $D \approx 10^{16} - 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ скорости изменения интенсивностей пиков замедляются и выходят на плато. Дальнейшее увеличение дозы не приводит к заметному изменению

элементного состава поверхности, т. е. $D \approx 8 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$ является дозой насыщения. При этом концентрации Ga, As и Na соответственно составляют 55–60, 35–40 и 2–5 at.%. Отметим, что при низких энергиях имплантации ($E_0 = 0.5\text{--}2 \text{ keV}$) поверхностная концентрация Ga при дозе насыщения составляла 45–50 at.%, As — 15–20 at.%, а Na — 25–30 at.% [9]. На рис. 2 приведены профили распределения атомов Ga, As и Na по глубине для GaAs, имплантированного ионами Na с $E_0 = 20 \text{ keV}$ при $D = D_H = 8 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$. Видно, что в области $d = 15\text{--}25 \text{ nm}$ зависимость $C_{\text{Na}}(d)$ проходит через максимум, а зависимость $C_{\text{Ga}}(d)$ через минимум. Зависимость $C_{\text{As}}(d)$ имеет более сложный характер: сначала при $d \approx 4\text{--}5 \text{ nm}$ проходит через минимум, а затем при $d \approx 14\text{--}18 \text{ nm}$ — через максимум. Прогрев ионно-имплантированной системы приводит к существенному изменению профилей распределения примесей и к рекристаллизации приповерхностных слоев. При оптимальной температуре, равной 850K (время прогрева $t = 30 \text{ min}$) наблюдается увеличение концентрации атомов Na в области максимума ($d = 20\text{--}30 \text{ nm}$) и заметное уменьшение полуширины кривой $C_{\text{Na}}(d)$ (рис. 3). Соответственно происходит перераспределение атомов Ga и As по глубине мишени. При этом приповерхностный слой полностью кристаллизуется и формируется эпитаксиальная трехслойная нанопленочная система GaAs–Ga_{0.5}Na_{0.5}As–GaAs (рис. 3). На границах раздела GaAs/Ga_{0.5}Na_{0.5}As и Ga_{0.5}Na_{0.5}As/GaAs образуются переходные слои типа Ga_{1-x}Na_xAs ($x = 0\text{--}0.5$). Параметры решетки GaAs ($a = 5.65 \text{ \AA}$) и Ga_{0.5}Na_{0.5}As ($a = 5.60 \text{ \AA}$) очень близки друг к другу, следовательно, ширина переходного слоя на их границе не превышает 10–15 nm [9].

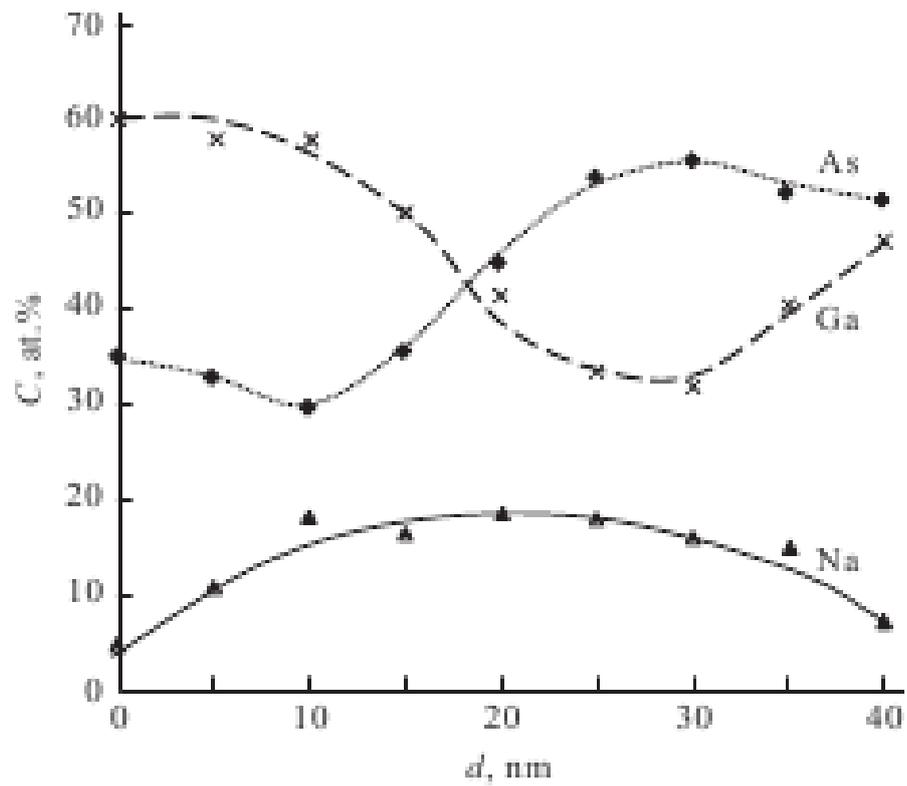


Рис. 2. Профили распределения атомов Ga, As и Na по глубине GaAs, имплантированного ионами Na^+ с $E_0 = 20 \text{ keV}$ при $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$.

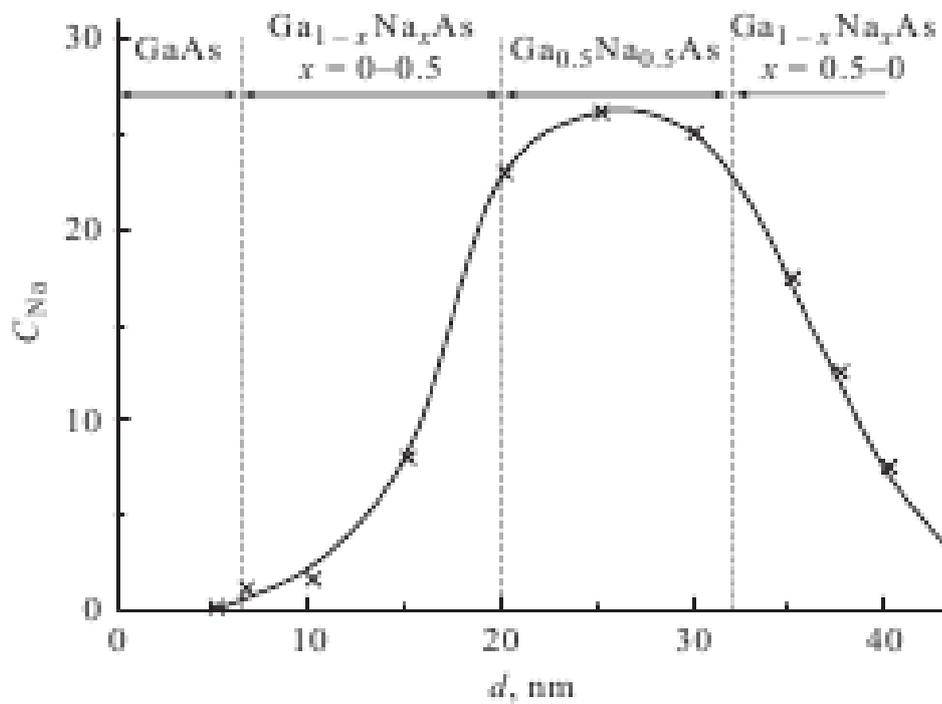


Рис. 3. Влияние прогрева при $T = 850 \text{ K}$ на профиль распределения атомов Na, по глубине GaAs, имплантированного ионам Na с $E_0 = 20 \text{ keV}$ при $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, время прогрева = 30 min.

Рассмотрим основные причины изменения состава поверхности и приповерхностных слоев GaAs при имплантации ионов Na^+ с высокой энергией ($E_0 = 20 \text{ keV}$) и дозой ($D = D_H = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$). Ионная бомбардировка сопровождается разложением GaAs на составляющие и внедрением ионов Na в приповерхностные слои. В ионно-легированном слое в основном содержатся атомы Ga, As и Na, часть из них образует соединения типа Ga-As, Ga-Na-As. При этом вследствие преимущественной диффузии атомов As в глубь мишени (и частичного испарения) в поверхностном слое ($d \approx 0-10 \text{ nm}$) концентрация Ga немного увеличивается, а As — уменьшается. Появление минимума на зависимости $C_{\text{As}}(d)$ при $d \approx 8-10 \text{ nm}$, по-видимому, обусловлено увеличением концентрации Na. В интервале $d = 10-25 \text{ nm}$ с ростом d концентрация внедренных атомов Na и диффундирующих атомов As увеличивается, что приводит к уменьшению C_{Ga} . При $d \geq 20-25 \text{ nm}$ с ростом d концентрация Na уменьшается и при $d \approx 40-45 \text{ nm}$ приближается к нулю; концентрация As уменьшается до 40–45 at.%, а Ga увеличивается до 40–45 at.%. При $d \geq 40-45 \text{ nm}$ элементный и химический составы исследуемых слоев мало отличаются от состава исходной пленки GaAs. Однако эти слои до глубины 80–100 nm являлись сильно разупорядоченными.

После прогрева при $T = 850 \text{ K}$ полуширина кривой зависимости $C_{\text{Na}}(d)$ резко уменьшается. На глубине $d \approx 20-32 \text{ nm}$ C_{Na} составляет 23–26 at.% (рис. 3), $C_{\text{As}} \approx 50 \text{ at.}$ %, $C_{\text{Ga}} \approx 25-30 \text{ at.}$ %, следовательно, формируется слой с толщиной $\sim 10-12 \text{ nm}$ с примерным составом $\text{Ga}_{0.5} \text{Na}_{0.5} \text{As}$. При этом в поверхностной области $d \approx 0-10 \text{ nm}$ концентрация Na уменьшается до нуля и образуется соединение типа GaAs. В диапазоне $d \approx 10-20 \text{ nm}$ C_{Na} увеличивается от 2–3 at.% до 20–25 at.% и, следовательно, формируется переходной слой типа $\text{Ga}_{1-x} \text{Na}_x \text{As}$. Аналогичный переходный слой формируется и в области $d = 35-50 \text{ nm}$, где C_{Na} уменьшается от 20–25 at.% до нуля. Если учесть, что ширина запрещенной зоны $\text{Ga}_{0.5} \text{Na}_{0.5} \text{As}$ составляет $\sim 1.9 \text{ eV}$, полученная трехслойная система имеет перспективы при разработке оптоэлектронных приборов, работающих в видимой области света.

Заключение

Таким образом, при имплантации ионов Na^+ с $E_0 = 15\text{--}25\text{ keV}$ в сочетании с тжигом приповерхностной области GaAs формируется трехкомпонентный эпитаксиальный слой $\text{Ga}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{As}$. Ионы Na^+ в основном замещают ионы Ga. При $E_0 = 20\text{keV}$ толщина этого слоя составляет 10–12 nm и располагается на глубине $\sim 20\text{--}30\text{ nm}$. Следовательно, формируется трехслойная нанопленка GaAs– $\text{Ga}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{As}$ –GaAs. На границах этих слоев формируются переходные слои типа $\text{Ga}_{1-x}\text{Na}_x\text{As}$ ($x \approx 0\text{--}0.5$) с толщиной 10–15 nm.

Список литературы

1. Курышев Г.Л., Ковчавцев А.П., Валишева Н.А. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1111–1119.
2. Тихов С.В., Горшков О.Н., Коряжкина М.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 10. С. 78–84.
3. Масалов С.А., Коротченков А.В., Евтихийев В.П., Сорокин С.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 1. С. 102–110.
4. Середен П.В., Домашеская Э.П., Арсентьев И.Н., Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Prutskij T. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 1. С. 3–8.
5. 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.
6. Donaev S.B., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. // Techn. Phys. 2015. Vol. 60. N 10. P. 1563–1566.
7. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Muradkabilov D.M., Voltaev Kh.Kh. // Techn. Phys. 2013. Vol. 58. N 6. P. 841–844.
8. Эргашов Е.С., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 4. С. 38–43.
9. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2002. № 4. С. 80–84.