



УДК: 537.533.7.8

Ганжимурад ШИРИНОВ,
Базовый докторант ТДТУ
Сардар ДОНАЕВ,
Проректор ТДТУ по научной работе и инновациям
Ёкуб ЭРГАШОВ,
Профессор Национального университета Узбекистана, д.ф.-м.н
Ботир ТУРАКУЛОВ,
Базовый докторант Национального университета Узбекистана

По отзыву к.ф.-м.н Н. Норкулова

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ СОГЛАСУЮЩИХСЯ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ CaF_2 ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОК AlInV

Аннотация

Методом низкоэнергетической ионной бомбардировки на границе системы GaAs/CaF_2 и GaP/CaF_2 созданы тонкие (наноразмерные) согласующиеся переходные слои. Установлено, что наиболее эффективный переходной слой формируется в сулое имплантации ионов Sr^+ с последующим прогревом при $T=900$ К. Методом оже-электронной спектроскопии в сочетании с травлением поверхности ионами Ar^+ изучены профили распределения атомов Sr по глубине $\text{CaF}_2(111)$.

Ключевые слова: Согласующиеся переходные слои, граница раздела, ПДП – структура, профил распределения, нанопленки, концентрация атомов, ионная имплантация, взаимодиффузия атомов.

SA2 YUZASIDA AlInV PLENKA SHAKLLANTIRISH UCHUN YUPQA MOSLASHUVCHAN QATLAM OLISH

Annotatsiya

Kichik energiyali ionlar implantatsiyasi usuli bilan GaAs/CaF_2 va GaP/CaF_2 tizimining chegarasida moslashtiruvchi o'tish qatlamlari hosil qilingan. Eng optimal o'tish qatlami Sr^+ ionlarini implantatsiya qilib keyin $T=900$ K qizdirishda hosil bo'lishi aniqlangan. Oje – elektroskopiya usulini yuzalarni Ar^+ ionlari bilan yemirish bilan birgalikda qo'llab Sr atomlarining chuqurlik bo'yicha taqsimoti o'rganilgan.

Kalit so'zlar: Moslashtiruvchi o'tish qatlami, chegaraviy qatlam, YADYA tuzilmasi, chuqurlik bo'yicha taqsimoti, atomlar konsentratsiyasi, atomlarning o'zaro diffuziyasi.

OBTAINING THIN CONSISTENT LAYERS ON THE SURFACE OF CaF_2 FOR THE FORMATION OF AlInV FILMS

Annotation

Thin (nanosized) matching transition layers were created by low-energy ion bombardment at the interface between the GaAs/CaF_2 and GaP/CaF_2 systems. It has been found that the most efficient transition layer is formed in the Sr^+ ion implantation phase followed by heating at $T=900$ K. Auger electron spectroscopy in combination with surface etching with Ar^+ ions was used to study the depth distribution profiles of Sr atoms in $\text{CaF}_2(111)$.

Keywords: Matching transition layers, interface, PDP-structure, distribution profile, nanofilms, atomic concentration, ion implantation, interdiffusion of atoms.

Введение. Известно, что эпитаксиальные МДП и ПДП – структуры широко используются и имеют перспективы для создания приборов микро-, нано- и оптоэлектроники (СВЧ транзисторы, ИС, резонаторы; оптоэлектронные, приборы, запоминающие устройства, солнечные элементы и др.). Границы раздела этих пленок, например, “полупроводник - диэлектрик”, обладают уникальными, присущими только им физикохимическими свойствами, целенаправленное использование их позволяет создать приборы нового поколения [1]. Однако, при создании перспективных многослойных - структур не всегда удается выбрать полупроводники и диэлектрики с идентичными параметрами решетки. Это, в свою очередь, требует формирования переходных слоев. В создание нанопленочных –структур во многих случаях используются кристаллы и пленки с кубической решеткой: полупроводники Si , Ge , GaAs , GaP , CdTe ; диэлектрики CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 и полупроводники обладающие металлическими свойствами NiSi_2 , CoSi_2 [6]. При этом особые требования предъявляется идентичности кристаллической структуры и близости параметры решетки, а также близости температурного коэффициента расширение выращиваемых пленок. В случае заметного отличие параметров решетки пленок возникает

необходимость создания согласующихся слоев. В качестве МДП и ПДП - структур до сих пор в основном, используется эпитаксиальные структуры типа $\text{NiSi}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ и $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ [9]. Параметры решетки этих компонентов практически единичны. Однако в силу концентрации и подвижности носителей возникает необходимость заменять Si бинарными полупроводниками GaAs, GaP, InP и др. Наиболее практически интерес имеет гетероструктуры CaF_2/GaP и CaF_2/GaAs . Параметр решетки CaF_2 ($a \approx 5,39 \text{ \AA}$) близки к "a" GaP ($a_{\text{GaP}} \approx 5,45 \text{ \AA}$), однако существенно отличается от "a" GaAs ($a_{\text{GaAs}} \approx 5,65 \text{ \AA}$). Несоответствие постоянных решеток вследствие взаимодиффузии атомов приводит к увеличению толщины переходных слоев на границе раздела пленка – подложка [13]. Основной целью данной работы являлась создания согласующихся слоев для системы $\text{A}_3\text{B}_5 - \text{CaF}_2(111)$ с использованием методом ионной имплантации в сочетании с отжигом.

Методика эксперимента. Пленки GaAs и GaP с толщиной $\sim 600 \text{ \AA}$ осаждены на хорошо очищенную поверхность $\text{CaF}_2(111)$ методом МЛЭ при комнатной температуре. При этом пленки были аморфными.

В качестве объектов исследования были выбраны монокристаллические образцы GaP(111) с диаметром $\sim 10 \text{ мм}$ и толщиной 1 мм . Исследования проводились с использованием методов: оже-электронной спектроскопии (ОЭС), дифракции быстрых электронов (ДБЭ), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и снятием энергетических и угловых 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 1 кэВ при угле падения $\sim 80\text{--}85^\circ$ относительно нормали, скорость травления составляла $\sim (5 \pm 1) \text{ \AA/мин}$. Ультрафиолетовые фотоэлектронные спектры снимались при энергии фотонов $h\nu \approx 10,8 \text{ эВ}$. Источником фотонов служила стандартная газоразрядная водородная лампа.

Экспериментальные результаты и их обсуждения. На рис. 1 приведены профили распределения атомов F по глубине для системы GaP/CaF₂ и GaAs/CaF₂, измеренные до и после отжига. Из рис. 1 видно, что даже при комнатной температуре на границе раздела пленка – подложка происходят разложение соединений GaP(GaAs) и CaF_2 и взаимодиффузия атомов между ними. При этом атомы P(As) и F имеют сравнительно большой коэффициент диффузии по сравнению с атомами Ga и Ca.

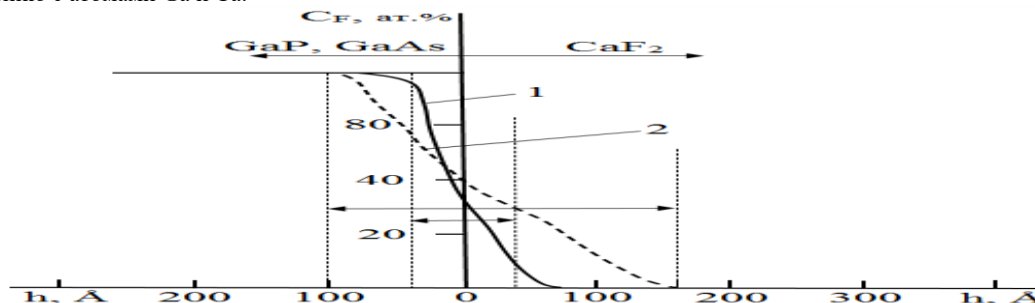


Рис.1. Профили распределения атомов F по глубине системы: 1 - GaP/CaF₂(111),

2 - GaAs/CaF₂

До отжига толщина переходного слоя в случае GaP/CaF₂ составляет $\sim 100 \text{ \AA}$, а в случае GaAs/CaF₂ – $\sim 250 \text{ \AA}$. Для получения эпитаксиальных пленок системы GaAs/CaF₂ и GaP/CaF₂ прогревались до $T=850 \text{ К}$ и 900 К соответственно. Время прогрева $\sim 25\text{--}30 \text{ мин}$. После прогрева ширина переходного слоя в случае GaP/CaF₂ увеличивается до ~ 150 , а в случае GaAs/CaF₂ – $\sim 400 \text{ \AA}$ [5].

Таким образом, ширина переходного слоя и концентрация взаимодиф-фундирующих атомов в случае GaP/Ge значительно (2 и более раз) меньше, чем в случае системы GaAs/CaF₂. По-видимому, одной из основных причин большого значения ширины переходного слоя на границе GaAs/CaF₂, является возникновение значительного напряжения между сопрягающимися поверхностями из-за заметного различия параметров решетки. Поэтому в случае системы GaAs/CaF₂ возникает необходимость создания переходного согласующегося слоя. Для этого требуется почти монотонное увеличение "a" CaF_2 от $\sim 5,46 \text{ \AA}$ до $\sim 5,65 \text{ \AA}$. Последнего можно добиться, используя метод ионной имплантации [NIM B – 2000 УПЭ] в сочетании с прогревом. Имплантация проводилась ионами Mg^+ , Ba^+ и Sr^+ с энергиями $E_0 = 0,5\text{--}3 \text{ кэВ}$ при дозе насыщения $D = \text{DN}$. Затем производился прогрев до температуры образования слоя монокристаллического трехкомпонентного соединения. Наиболее надежный переходный слой образовались в случае имплантации ионов Sr^+ . На рис.2 приведены зависимости CSr от глубины h, полученные после прогрева при различных температурах CaF_2 , имплантированного ионами Sr^+ с $E_0=1 \text{ кэВ}$ при $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Прогрев при каждой T составлял 30 мин. Видно, что до отжига большая часть имплантированных атомов располагается на поверхности и вблизи нее до глубины $40 - 45 \text{ \AA}$. При этом не все атомы Sr входят в химическую связь с атомами матрицы. До температуры $T=600 \text{ К}$ профиль распределения атомов Sr заметно не меняется. Прогрев при $T=700 \text{ К}$ приводил к небольшому возрастанию концентрации атомов Sr на поверхности, что связано с диффузией несвязанных атомов Sr к поверхности.

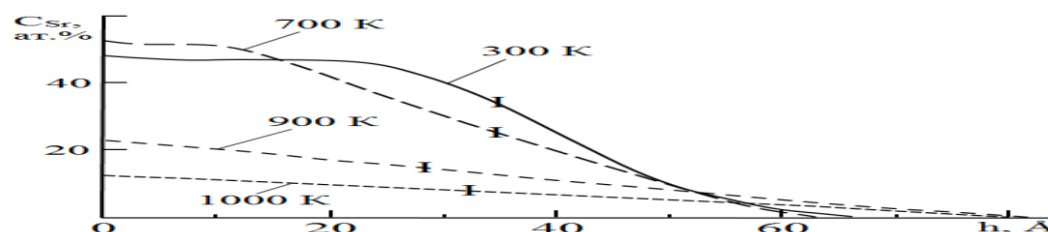


Рис.2. Влияние прогрева на зависимости концентрации атомов Sr по глубине

CaF₂, имплантированного ионами Sr⁺ с E₀ = 1 кэВ при D = 6·10⁻¹⁶ см².

С дальнейшим ростом температуры усиливается диффузия атомов Sr к поверхности и в глубь мишени, образование соединений Ga – Sr – As, отжиг дефектов и кристаллизация ионно – легированных слоев. Одновременно начинается интенсивная десорбция Sr из области внедрения и зависимость CSr(h) приобретает вид спадающей кривой. Следовательно, общая концентрация Sr в приповерхностной области уменьшается, что подтверждается уменьшением площади под кривой CSr(d). При T = 900 К все атомы Sr образуют связь с атомами матрицы и формируется эпитаксиальная монокристаллическая пленка. Примерный состав на поверхности имеет вид Ga_{0,6}Sr_{0,4}F₂. С ростом глубины концентрация Sr монотонно убывает, а Ca – увеличивается. При d ≈ 75–80 Å содержание Sr приближается к нулю. Значение “a” для структура Ca_{0,6}Sr_{0,4}F₂ на поверхности составили ~ 5,71 Å, что близко к “a” пленки GaAs, т.е. переходной слой, созданный на поверхности CaF₂ имплантацией ионов Sr, является наиболее эффективным для системы GaAs/CaF₂. Увеличивая температуры до 1000 К можно получить соединение типа Ca_{0,7}Sr_{0,3}F₂ [13].

Заключение. Получены наноразмерные согласующиеся слои Ca_{1-x}Sr_xF₂ на поверхности CaF₂ для системы GaAs/CaF₂. Наиболее эффективные слои с линейно изменившимися “x” получены после прогрева CaF₂, имплантированного ионами Sr⁺ с E₀ = 1 кэВ, при T = 900 К. При этом толщина переходного слоя составляли ~ 80 Å.

ЛИТЕРАТУРА

1. Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И. Получение структур CaF₂/Si(100) методом твердофазной эпитаксии. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. № 1 (25), 2012, С. 47-51.
2. Щербаков В.Д. Люминесцентная спектроскопия Mn²⁺ в SrF₂. Физико-математические науки. Том 157, кн. 4, 2015, С. 172-181.
3. Umirzakov B.E., Donaev S.B. On the creation of ordered nuclei by ion bombardment for obtaining nanoscale Si structures on the surface of CaF₂ films (2017) Journal of Surface Investigation, 11 (4), pp. 746-748.
4. Pak Alexandra M., Ermakova Julia A., Kuznetsov V.Sergey, Ryabova V.Anastasiya, Pominova V. Darya, Voronov V.Valerii. Efficient visible range SrF₂: Yb: Er-and SrF₂: Yb: Tm-based up-conversion luminophores. Journal of Fluorine Chemistry. 2017, (194), pp. 16-22.
5. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Мустафаева Н.М. Электронные и оптические свойства тонких пленок GaAlAs/GaAs. Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 10, С. 1589-1591.
6. Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Рябоштан Ю.Л., Багаев Т.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г. Сравнительный анализ квантовых ям GaAs/GaInP и GaAs/AlGaAs, полученных в условиях моc-гидридной эпитаксии. неорганические материалы, 2019, том 55, № 4. С. 345–349.
7. Умирзаков Б.Е., Ашуров Р.Х., Донаев С.Б.. Морфология и электронные свойства наноразмерных структур Si, созданных на поверхности CaF₂. Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 2, С. 264-267.
8. Соловьёв Я.А., В.А. Пилипенко. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремнии. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь). 2020, №. 18 (1), С. 81-88.
9. С.Б. Донаев. Получение наноразмерных пленок CoSiO на поверхности CoSi₂ методом ионной имплантации. Письма в ЖТФ, 2020, том 46, вып. 16, С. 16-18.
10. Ушаков С.Н., Усламина М.А., Пыntenков А.А., Мишкин В.П., Нишев К.Н., Кузнецов С.В., Чернова Е.В., Федоров П.П.. Выращивание и физические свойства монокристаллов CaSrBaF₆. Конденсированные среды и межфазные границы. 2021, 23(1), С. 101-107.
11. Velichko A.A., Krupin A.Y U., Filimonova N.I., Ilyushin V.A. Effect of the Growth Modes of CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) Heterostructures on Their Photoluminescence Spectrum. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques volume 15, 2021, pp. 424 – 429.
12. Руденко И.Е., Величко А.А., Крупин А.Ю., Филимонова Н.И., Илюшин В.А.. Получение многослойных периодических структур CaF₂/Si/CaF₂/Si(111), обладающих фотолюминесценцией в видимой области спектра. Технические науки. № 3 (52), 2021, С. 44-50.
13. Зиновьев В.А., Кацюба А.В., Володин В.А., Зиновьева А.Ф., Черкова С.Г., Смагина Ж.В., Двуреченский А.В., Крупин А.Ю., Бородавченко О.М., Живулько В.Д., Мудрый А.В.. Атомная структура и оптические свойства слоев CaSi₂, выращенных на CaF₂/Si-подложках. Физика и техника полупроводников, 2021, том 55, вып. 9, С. 725-728.
14. Усманов Ж.И., Абдуллаев М.Ш. Совершенствование полупроводниковых устройств. Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2022, 4(97).

-
15. Девицкий О.В., Захаров А.А., Лунин Л.С., Сысоев И.А., Пашенко А.С., Вакалов Д.С., Чапура О.М.. Влияние условий магнетронного распыления на структуру и морфологию поверхности тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs(100). Конденсированные среды и межфазные границы. 2022; 24(3): С. 300–305.