

Раббимов Э.А.

доцент кафедры «Радиоэлектроника»

Джизакский политехнический институт

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПЛЕНОК CaF₂, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ Ba⁺**

Аннотация: При использовании монокристаллических пленок CaF₂ возникает необходимость контролируемого изменения электронной структуры, параметра кристаллической решетки и других свойств поверхностных слоев. Наши исследования показали, что для этого можно использовать имплантацию низкоэнергетических ионов Ba⁺ в сочетании с отжигом. Результаты исследований могут быть полезны для получения оптических резонаторов в УФ-диапазоне с изменяемой частотой ($7,8 \text{ эВ} \leq h\nu \leq 9,2 \text{ эВ}$).

Ключевые слова: ионная имплантация, нанопленки, эпитаксиальных пленок, гетероэпитаксиальных систем, фотон, концентрация.

Rabbimov E.A.

Associate Professor of the Department of Radioelectronics

Jizzakh Polytechnic Institute

**ELECTRONIC STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF
CaF₂ FILMS IMPLANTED WITH LOW-ENERGY Ba⁺ IONS**

Abstract: The using of monocrystalline CaF₂ films the necessity of the inspected alteration of the electron structure, crystalline lattice parameter and other surface layers` properties appears. Our investigations have showed that the low energy Ba⁺ ion implantation combined with annealing can be employed to this effect. The research results can be useful to get optical

resonators in UV region with the changeable frequency ($7,8 \text{ eV} \leq h\nu \leq 9,2 \text{ eV}$)

Key words: ion implantation, nanofilms, epitaxial films, heteroepitaxial systems, photon, concentration.

Известно, что метод низкоэнергетической ионной имплантации является одним из эффективных методов направленного изменения состояния и свойств приповерхностных слоев различных материалов и тонких пленок [1-3]. В последние годы метод ионной имплантации в сочетании с другими видами технологических обработок широко используется в создании многослойных гетероэпитаксиальных систем, необходимых для больших и ультра больших интегральных схем, оптоэлектронных приборов, солнечных элементов, запоминающих устройств [4]. В указанных системах наряду с Si, GaAs и CoSi₂, имеют большие перспективы пленки CaF₂ [5]. Однако при использовании этих пленок во многих случаях возникает необходимость контролируемого изменения параметров решетки, электронной структуры и других свойств их поверхности. Для этих целей мы использовали метод ионной имплантации в сочетании с отжигом.

По этому, целью работы являлось исследование влияния имплантации ионов активных металлов и последующего отжига на элементный и химический состав, электронную и кристаллическую структур приповерхностных слоев эпитаксиальных пленок CaF₂/Si(100).

Исследования проводились в пленках CaF₂ толщиной ~100 Å.

Технологические обработки (ионная имплантация, отжиг) и исследования структуры и свойств образцов проводились в универсальном экспериментальном приборе [6]. Источниками ионов служили таблетки титаната бария. Ионная пушка формировала моноэнергетический ионный пучок с плотностью тока $J=0,5 \div 20 \text{ мкА см}^{-2}$

² в области энергий $E_0=0,5\div 5$ кэВ. Диаметр пучка на мишень составлял 4 мм. Прогрев при каждой температуре продолжался в течение 30 мин. Измерения проводилось после остывания мишени до комнатной температуры. Элементный и химический состав определялся методом ожеэлектронной спектроскопии (ЭОС) [7]. Фотоэмиссионные характеристики измерялись при фиксированных значениях энергии фотонов в интервале $\hbar\omega=4\div 11$ эВ. Источниками фотонов служили стандартные газоразрядные лампы линейчатого спектра КрР, КсР, ВмФ. На мишень кванты излучения попадали через магний фторидовое окошко, которое является прозрачным для фотонов до энергий 12 эВ. Диаметр пучка фотонов на мишень составлял ~ 1 мм. При этом число фотонов, падающих в одну секунду, было равно $1 \cdot 10^{14}$.

Степень разупорядочения поверхности CaF_2 при ионной имплантации и его кристаллизация при отжиге, типы и параметры решетки изучались методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на стандартной установке. При снятии картины ДБЭ (электронограмм) пучок электронов с энергией 75 кэВ направлялся на поверхность мишени под углом ~ 1 градус [8].

Динамика изменения кривой энергетического распределения (КЭР) фотоэлектронов, снятых при $\hbar=10,8$ эВ в зависимости от дозы облучения для CaF_2 , легированного ионами Ba^+ с $E_0=0,5$ кэВ, приведена на рис.1.

По оси абсцисс отложена энергия связи $E_{\text{св}}$ электронов. На всех КЭВ фотоэлектронов использован один и тот же масштаб по вертикали, выбранный таким образом, что площадь под кривой пропорциональна величине квантового выхода электронов из образцов. Видно, что ионная имплантация приводит к изменению структуры спектра фотоэлектронов. С

ростом дозы ионов происходит уширение спектра, увеличение площади под КЭР (увеличение квантового выхода), изменения интенсивности и смещения положения основных пиков матрицы, появление новых пиков. Эти изменения происходят до дозы $(5\div 8)10^{16}$ см⁻². Анализ структуры и спектров фотоэлектронов, совместно с данными ОЭС и ДБЭ, показали, что в процессе имплантации ионов Ва⁺ в пленке СаF₂ сопровождается разупорядочением приповерхностного слоя, образованием новых соединений (примерно 15-20% атомов Ва внедренных в приповерхностные слои образуют соединения типа Ва+F, Ва+Са+F) и обогащением поверхности несвязанными атомами бария. Отметим, что в запрещенной зоне нелегированного СаF₂ на расстоянии 2,5 эВ от верхнего края валентной зоны содержатся глубокие уровни дырочного типа. Наличие этих уровней может быть связано с некоторой дефектностью кристаллической структуры [9]. После имплантации ионов Ва⁺ с достаточно высокой дозой ($D \geq 5 \cdot 10^{15}$ см⁻²), начало спектра фотоэлектронов смещается примерно до этого уровня, т.е. на 2,5 эВ (рис.1).

Мы предполагаем, что изменение положения верхнего края валентной зоны после ионной имплантации связано с разупорядочением приповерхностного слоя. Аналогичные разрешенные уровни появляются и вблизи дна зоны проводимости, что приводит к увеличению кажущей величины электронного сродства. Появление в спектре новых пиков, нами объясняется обогащением поверхности атомами Ва, а сдвиг пиков матрицы образованием новых соединений.

Во всех случаях доза ионов составляла $8 \cdot 10^{16}$ см⁻². Видно, что при низких энергиях ионов ($E_0 \leq 1$ кэВ) $S_{\text{ва}}(d)$ имеет ступенчатый вид, а при энергиях $E_0 \geq 1$ кэВ представляет собой кривую с максимумом. С ростом энергии ионов наблюдается уменьшение концентрации бария вблизи

поверхности, уширение максимума распределения ионов и сдвиг его в сторону больших глубин. В области энергией ионов $E_0 = 3 \div 5$ кэВ доля атомов легирующего элемента, входящих в химическую связь с атомами матрицы, может увеличиваться до $20 \div 30$ ат.% (здесь за 100 ат.% принимается общая концентрация внедренной примеси). Однако с ростом E_0 содержание внедренной примеси в приповерхностном слое быстро убывает (рис.2), что приводит к уменьшению концентрации новых соединений в этих слоях [10].

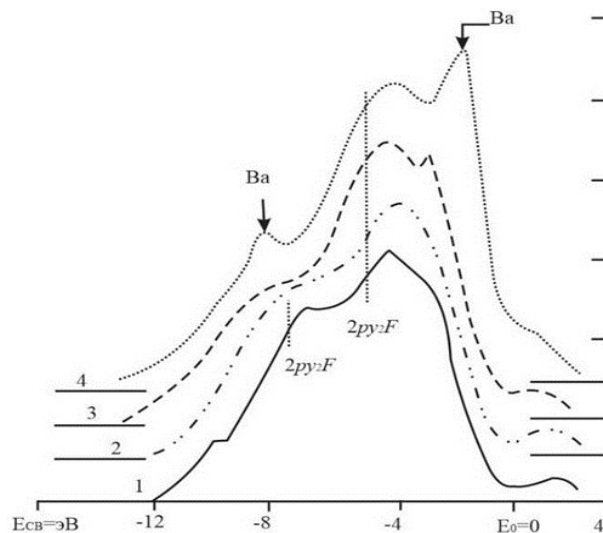
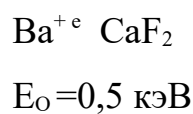


Рис. 1. Спектры фотоэлектронов для CaF_2 , легированного ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5$ кэВ при дозах $D, \text{ см}^{-2}$ 1-0; 2- $6 \cdot 10^{14}$; 3- $6 \cdot 10^{15}$; 4- $8 \cdot 10^{16}$

Таким образом, в процессе ионной имплантации при поверхностном слое происходит интенсивное разложение CaF_2 на составляющие. Небольшая часть этих компонентов может расплыться с поверхности. В силу большой химической активности почти все освобожденные атомы фтора вновь входит в химическую связь как атомами кальция. Следовательно, в приповерхностном слое образуются и трехкомпонентные системы. Как следует из экспериментов [11], при $E_0 \leq 1$ кэВ, одновременно с образованием различных соединений возникают

“избыточные” атомы легирующего элемента, концентрация которого с ростом дозы увеличивается. При высоких энергиях ионов ($E_0 \geq 3$ кэВ) происходит заметная десорбция фтора с поверхности, что приводит к накоплению атомов Са вблизи поверхности. Наибольшая концентрация последнего составляет $40 \div 45$ ат. %.

Для направленной модификации физико-химических свойств поверхности ионно-легированной пленки CaF_2 можно применять постимплантационный высокотемпературный отжиг [12]. При этом меняя температуру прогрева можно создавать слои с монотонно изменяющейся концентрацией активного элемента. Наши исследования показали, что до $T=600$ К не происходит заметное изменение состава и свойства поверхности ионно-легированного CaF_2 .

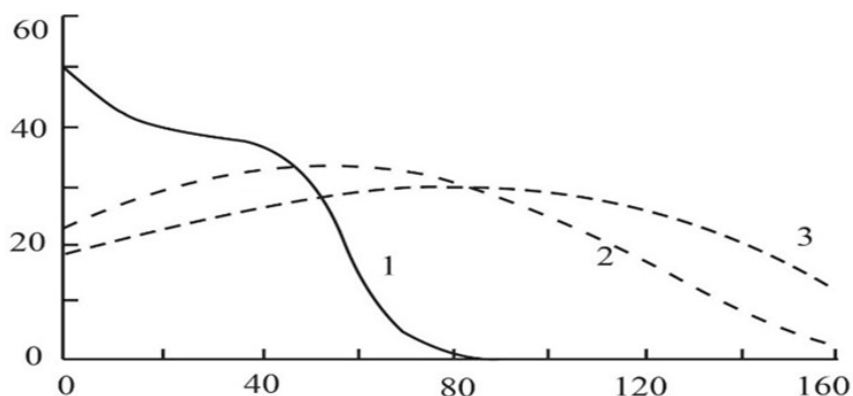


Рис. 2. Концентрационные профили распределения бария по глубине для CaF_2 легированного ионами Ba^+ с $E_0, \text{кэВ}$ ($D=8 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$) 1-0.5; 2-3; 3-5.

При температуре $T=1000$ К все атомы бария входят в химическую связь с атомами матрицы и образуется эпитаксиальная пленка $\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x\text{F}_2$ с перестраиваемой постоянной решетки. При этом, на поверхности образуют соединение типа $\text{Ba}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{F}_2$ с постоянной решетки $\sim 5,73 \text{Å}$. При одинаковой температуре отжига соотношение концентрации атомов Ва и Са на поверхности для разных доз легирования будет разным. Во всех случаях с ростом глубины концентрация бария и следовательно, значение постоянной решетки,

монотонно уменьшается [13]. На рис.2. приведены концентрационные профили распределения атомов бария по глубине для пленок CaF_2 , легированного ионами Ba^{+} с энергиями 0,5; 3 и 5 кэВ.

Ионная имплантация также приводила к существенному изменению значения оптических параметров пленок CaF_2 (таб.1.) Значения n и r определялись в области УФ – излучения (1050 \AA). Видно, что после ионной имплантации величина показателя преломления и коэффициента отражения света увеличивается, что объясняется изменением оптической прозрачности пленки, вследствие частичной металлизации ее приповерхностной области. Прогрев ионно-легированного образца приводит к уменьшению показателя преломления и коэффициента отражения света, однако их значения остаются несколько большими, чем для чистой пленки CaF_2 . Эффект резкого увеличения отражательной способности пленки после высокодозной имплантации (металлизация поверхности и ее избирательность к частоте света) может применяться при разработке и создании оптических резонаторов, запоминающих устройств, лазерных источников и волноводов. Возможность управления величиной n пленок в широких пределах с помощью ионной имплантации и последующего отжига очень важны для создания оптических приборов с переменной диэлектрической проницаемостью, светофильтров, преобразователей световой энергии и элементов связи [14].

Выводы

1. Впервые определены профили распределения примесных атомов Ba по глубине ионно- легированной пленки CaF_2 . Показано, что в процессе ионной имплантации только небольшая часть (15- 20 ат.%) атомов бария входит в химическую связь с атомами матрицы.

2. Впервые получена информация о распределении плотности электронных состояний и о параметрах энергетических зон ионно-

легированной пленки CaF_2 . В частности, показано, что после ионной имплантации ширина запрещенной зоны уменьшается в 2,5 раза.

3. Постимплантационный температурный прогрев способствует увеличению концентрации атомов Ва, входящих в химическую связь, и уменьшению дефектности решетки. При $T=1000$ К вблизи поверхности формируется монокристаллическая система $\text{Ca}_{0,4}\text{Ca}_{0,6}\text{F}_2$ с постоянной решетки $5,73 \text{ \AA}$.

Список литературы

1. Mustofoqulov, J. A., & Bobonov, D. T. L. (2021). "MAPLE" DA SO'NUVCHI ELEKTROMAGNIT TEBRANISHLARNING MATEMATIK Tahlili. *Academic research in educational sciences*, 2(10), 374-379.

2. Mustofoqulov, J. A., Hamzaev, A. I., & Suyarova, M. X. (2021). RLC Zanjirining matematik modeli va uni "MULTISIM" da hisoblash. *Academic research in educational sciences*, 2(11), 1615-1621.

3. Иняминов, Ю. А., Хамзаев, А. И. У., & Абдиев, Х. Э. У. (2021). Передающее устройство асинхронно-циклической системы. *Scientific progress*, 2(6), 204-207.

4. Мулданов, Ф. Р., Умаров, Б. К. У., & Бобонов, Д. Т. (2022). РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЙ, АЛГОРИТМА И ЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 13-16.

5. Мулданов, Ф. Р., & Иняминов, Й. О. (2023). МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ РОБОТА-АНАЛИЗАТОРА В ВИДЕОТЕХНОЛОГИЯХ. *Экономика и социум*, (3-2 (106)), 793-798.

6. Ирисбоев, Ф. Б., Эшонкулов, А. А. У., & Исломов, М. Х. У. (2022). ПОКАЗАТЕЛИ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 5-8.

7. Zhabbor, M., Matluba, S., & Farrukh, Y. (2022). STAGES OF DESIGNING A TWO-CASCADE AMPLIFIER CIRCUIT IN THE “MULTISIM” PROGRAMM. *Universum: технические науки*, (11-8 (104)), 43-47.
8. Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. Р. (2022). ТИПЫ РАДИОАНТЕНН. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 9-12.
9. Омонов С.Р., & Ирисбоев Ф.М. (2023). АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ЭМС НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ R&S ELEKTRA. *Экономика и социум*, (5-1 (108)), 670-677.
10. Саттаров Сергей Абудиевич, & Омонов Сардор Рахмонкул Угли (2022). ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА FPC1500. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 17-20.
11. Якименко, И. В., Каршибоев, Ш. А., & Муртазин, Э. Р. (2023). Джизакский политехнический институт СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ РАДИОЧАСТОТ. *Экономика и социум*, 1196.
12. Абдиев, Х., Умаров, Б., & Тоштемиров, Д. (2021). Структура и принципы солнечных коллекторов. In *НАУКА И СОВРЕМЕННОЕ ОБЩЕСТВО: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ* (pp. 9-13).
13. Раббимов, Э. А., & Иняминов, Ю. О. (2022). ВЛИЯНИЕ ОКИСНОЙ ПЛЕНКИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПЫЛЕНИЯ КРЕМНИЯ. *Universum: технические науки*, (11-6 (104)), 25-27.
14. Yuldashev, F. (2023). HARORATI MOBIL ELEKTRON QURILMALAR ASOSIDA NAZORAT QILINADIGAN QUYOSH QOZONI. *Interpretation and researches*, 1(1).