

УДК 621.383

Раббимов Э.А., доцент

Джизакский политехнический институт

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ
ТЕЛ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ.**

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.

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

Rabbimov E.A., assistant professor

Jizzak Polytechnic Institute

**ENERGU SPECTRA OF THE SURFACE OF SOLIDS
IMPLANTED WITH-LOW ENERGU 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.

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]. В последние годы метод ионной имплантации в сочетании с другими видами технологических обработок широко

используется в создании многослойных гетероэпитаксиальных систем, необходимых для больших и ультрабольших интегральных схем, оптоэлектронных приборов, солнечных элементов, запоминающих устройств [2]. В указанных системах наряду с Si, GaAs и CoSi₂, имеют большие перспективы пленок CaF₂ [3]. 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.

Технологические обработки (ионная имплантация, отжиг) и исследования структуры и свойств образцов проводились в универсальном экспериментальном приборе [4]. Источниками ионов служили таблетки титаната бария. Ионная пушка формировала моноэнергетический ионный пучок с плотностью тока $J=0,5\div 20$ мкА см⁻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 оже-электронной спектроскопии (ЭОС). Фотоэмиссионные характеристики измерялись при фиксированных значениях энергии фотонов в интервале $\hbar\omega=4\div 11$ эВ. Источниками фотонов служили стандартные газоразрядные лампы линейчатого спектра KrP, KcP, 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 ~ 1мм. При этом число фотонов, падающих в одну секунду, было равно $1 \cdot 10^{14}$.

Степень разупорядочения поверхности CaF₂ 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.

По оси абсцисс отложена энергия связи E_{sv} 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 [5]. 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 $(5 \div 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Анализ структуры и спектров фотоэлектронов, совместно с данными ОЭС и ДБЭ, показали, что в процессе имплантации ионов Ba^+ в пленке CaF_2 сопровождается разупорядочением приповерхностного слоя, образованием новых соединений (примерно 15-20% атомов Ba внедренных в приповерхностные слои образуют соединения типа $\text{Ba}+\text{F}$, $\text{Ba}+\text{Ca}+\text{F}$) и обогащением поверхности несвязанными атомами бария. Отметим, что в запрещенной зоне нелегированного CaF_2 на расстоянии 2,5 эВ от верхнего края валентной зоны содержатся глубокие уровни дырочного типа [6]. Наличие этих уровней может быть связано с некоторой дефектностью кристаллической структуры. После имплантации ионов Ba^+ с достаточно высокой дозой ($D \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), начало спектра фотоэлектронов смещается примерно до этого уровня, т.е. на 2,5 эВ.

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 кажущейся величины электронного сродства [7]. Появление в спектре новых пиков, нами объясняется обогащением поверхности атомами Ba, а сдвиг пиков матрицы образованием новых соединений. Во всех случаях доза ионов составляла $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Видно, что при низких энергиях ионов ($E_0 \leq 1 \text{ кэВ}$) $S_{\text{ва}}(d)$ имеет ступенчатый вид, а при энергиях $E_0 \geq 1 \text{ кэВ}$ 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 [8].

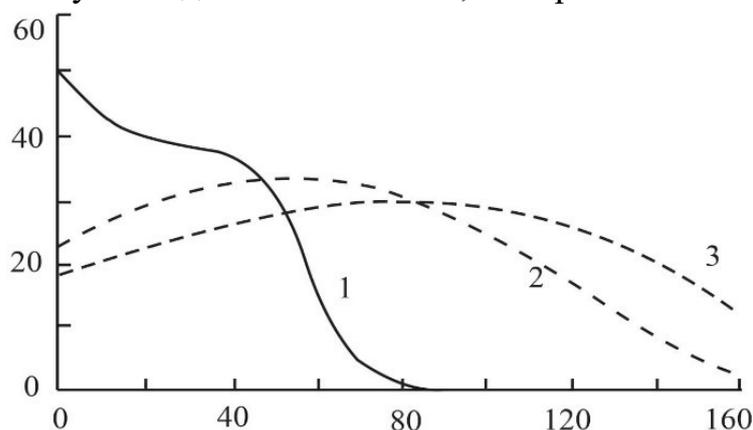
В силу большой химической активности почти все освободившиеся атомы фтора вновь входят в химическую связь как атомами кальция. Следовательно, в приповерхностном слое образуются и трехкомпонентные системы. Как следует из экспериментов [8], при $E_0 \leq 1$ кэВ, одновременно с образованием различных соединений 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. 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 . Дальнейшее увеличение температуры приводило к перераспределению атомов Ва СВа (ат. %) и кристаллизации приповерхностного слоя, увеличению доли атомов Ва образующих химическую связь с атомами матрицы. При температуре $T=1000$ К все атомы бария входят в химическую связь с атомами матрицы

и образуется эпитаксиальная пленка $Ba_{1-x}Ca_xF_2$ с перестраиваемой постоянной решетки. При этом, на поверхности образуют соединение типа $Ba_{0.6}Ca_{0.4}F_2$ с постоянной решетки $\sim 5,73 \text{ \AA}$ [9]. При одинаковой температуре отжига соотношение концентрации атомов Ba и Ca на поверхности для разных доз легирования будет разным. Во всех случаях с ростом глубины концентрация бария и следовательно, значение постоянной решетки, монотонно уменьшается.

Рис. 1. 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.

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.

В табл.1 приведены основные электронно-зонные и оптические параметры поверхности, ионно- легированной пленки CaF_2 ., измеренные до и после прогрева ($T=1000 \text{ K}$): Φ -Фотоэлектронная работа выхода, ϕ - термоэлектронная работа выхода, E_g –ширина запрещенной зоны, \mathcal{R} -средство к электрону, r - коэффициент отражения света, n -коэффициент преломления. Из этой таблицы следует, что ионная имплантация существенно изменяет величины указанных параметров, однако степень их изменения различна для разных энергий ионов [10]. Так, например, при $E_0=0,5 \text{ кэВ}$ ширина запрещенной зоны уменьшается на 5 эВ , а при $E_0=3 \text{ кэВ}$ - $2,3 \text{ эВ}$. После прогрева при $T \sim 1000 \text{ K}$ состав и структура

$Ba^{+} \square CaF_2$
 $E_0 = 0.5 \text{ кэВ}$

приповерхностного слоя пленки CaF₂ легированного с разными энергиями, существенно не отличались друг от друга.

| Параметры | CaF ₂ | E ₀ = 0,5 кэВ | | E ₀ = 3 кэВ | |
|---------------------|------------------|--------------------------|----------|------------------------|----------|
| | | T=300 К | T=1000 К | T=300 К | T=1000 К |
| Φ, эВ | 10,1 | 6,2 | 9,2 | 8,3 | 9 |
| φ, эВ | 4,2 | 2,5 | 4,0 | 3,2 | 3,8 |
| E _g , эВ | 9,1 | 4 | 8,2 | 6,8 | 8 |
| ℳ, эВ | 1 | 2,2 | 1 | 1,5 | 1 |
| n | 1,45 | 1,8 | 1,48 | 1,75 | 1,5 |
| r, % | 8 | 22 | 10 | 20 | 11 |

Таблица 1. Электронно-зонные и оптические параметры пленки CaF₂, легированной ионами Ва⁺

При этом, на поверхности этих пленок образуется трехкомпонентное соединение с примерным составом Ca 0,4 Ва 0,6 F₂. Из данных, приведенных в табл.1, видно, что указанная система обладает широкой запрещенной зоной (E_g =8 эВ) и малым сродством к электрону (1 эВ), т.е. является хорошим изолятором. Поэтому можно полагать, что трехкомпонентные соединения типа Ca_{1-x} Ва_x F₂ с перестраиваемой структурой могут успешно применяться в качестве согласующих слоев в системах металл- диэлектрик, полупроводник-диэлектрик.

Ионная имплантация также приводила к существенному изменению значения оптических параметров пленок CaF₂ (таб.1.) Значения n и r определялись в области УФ – излучения (1050 Ао). 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 CaF₂. 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 [11]. 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.

Вывод

Впервые определены профили распределения примесных атомов Ва по глубине ионно- легированной пленки CaF₂. Показано, что в процессе ионной имплантации только небольшая часть (15- 20 ат. %) атомов бария входит в химическую связь с атомами матрицы.

Впервые получена информация о распределении плотности электронных состояний и о параметрах энергетических зон ионно- легированной пленки CaF₂. В частности, показано, что после ионной имплантации ширина запрещенной зоны уменьшается в 2,5 раза.

Список литературы

1. Мустофокулов, Ж. А., & Чориев, С. С. (2024). Инвертор қурилмасини “Proteus” дастурида лойихалаш. *Ilm-fan va ta'lim*, 2(1 (16)).
2. J.A.Mustofoqulov at all. Methods for designing Electronic device circuits in the “Proteus” program. Journal of "Экономика и социум" №4(107) 2023.
3. Mustafiev, A. A. (2024). ELECTRONIC SPECTROSCOPY OF HETEROSYSTEM SI/CU SURFACES WITH NANOSCALE PHASES AND FILMS. *Modern Science and Research*, 3(1), 74-77.
4. Yuldashev, F. M. (2024). QUYOSH QOZONLARINI DASTURLASHTIRISH XOSSALARI. *Экономика и социум*, (1 (116)), 619-624.
5. Suyarova, M. (2024). ELEKTR KABELLARGA NISBATAN OPTIK TOLALI ALOQA LINIYALARINING ASOSIY AFZALLIKLARI. *Ilm-fan va ta'lim*, 2(1 (16)).

6. Turapov, U., & Muldanov, F. (2024). SHAXS YUZ TASVIRINI IDENTIFIKATSIYALASHDA ROBOT KO 'Z ANALIZATORI TIZIMI YARATISH MUOMMALARI VA MASALANING QO 'YILISHI. *Ilm-fan va ta'lim*, 2(1 (16)).

7. Якименко, И., Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. (2024). ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ: РЕВОЛЮЦИЯ В УПРАВЛЕНИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ. *Science and innovation*, 3(Special Issue 17), 666-668.

8. Дрозденский, С., Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. (2024). СИЛОВЫЕ КОНТУРА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ. *Экономика и социум*, (1 (116)), 839-844.

9. Раббимов, Э. А. (2024). ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК CaF₂, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ Ba⁺. *Экономика и социум*, (1 (116)), 1198-1204.

10. Якименко, И., Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. (2024). СОВРЕМЕННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ. *Экономика и социум*, (1 (116)), 1606-1611.

11. Suyarova, M., & Aliyev, S. (2024). DATA TRANSFER USING ALGORITHMSENCRYPTION IN A MULTI-PLATFORM BUILDING CLIMATE CONTROL INFORMATION SYSTEM. Interpretation and researches.