

## СОСТАВ, ЭЛЕКТРОННАЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК CdF<sub>2</sub>/Si

<sup>1</sup>А.А.Абдувайитов, <sup>2</sup>Б.Е.Умирзаков, <sup>3</sup>Д.А.Ташмухамедова, <sup>4</sup>Х.Х.Болтаев,  
<sup>5</sup>И.К.Кодирова, <sup>6</sup>Х.М.Шамаев

<sup>1</sup>Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан, г. Ташкент

<sup>2</sup>Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан, г. Ташкент

<sup>3</sup>Доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии производства электронных аппарат Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан, г. Ташкент

<sup>4</sup>Доктор философии по физико-математическим наукам, доцент кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан, г. Ташкент

<sup>5</sup>Ассистент кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан, Ташкент

<sup>6</sup> Ташкентский государственный технический университет

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5732-6103>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9815-2111>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-5813-7518>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-6453-6523>

<sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0000-5469-3330>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15424386>

**Аннотация.** С использованием методов оже-электронной спектроскопии, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, дифракции быстрых электронов и снятия угловых зависимостей коэффициента неупругоотраженных электронов изучено на состав, электронную и кристаллическую структуру поверхностных слоев монокристаллических образцов и пленок CdF<sub>2</sub>(111).

**Ключевые слова:** Эпитаксиальный слой, гетероструктуры, оже-спектр, фотоэлектронный спектр, разупорядоченный слой, плотность состояния электронов.

**Abstract.** The surface composition, electronic structure, and crystal structure of monocrystalline samples and films of CdF<sub>2</sub>(111) have been studied using methods such as Auger electron spectroscopy (AES), ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS), fast electron diffraction (FED), and angular dependence measurements of the coefficient of inelastically reflected electrons.

### ВВЕДЕНИЕ

Фториды, в частности, широко используются в создании специальных ПДП структур в трехмерных интегральных схемах. Особый интерес представляют гетероструктуры CdF<sub>2</sub>/Si (111) с буферным слоем CaF<sub>2</sub> [1-4].

В отличие от полупроводниковых материалов диэлектрические пленки обладают большой шириной запрещенной зоны ( $E_g \geq 5$  эВ), малым значением сродства к электрону ( $\chi \leq 1$  эВ) и большой глубиной зоны выхода вторичных электронов (200 Å). Низкоэнергетическая ионная имплантация может резко изменять физико-химическое

состояние приповерхностного слоя этих пленок. Поэтому исследование процессов, происходящих при взаимодействии электронов и фотонов с поверхностью ионно-легированных пленок  $\text{CdF}_2$  и получение информации об изменении микроскопических электронных характеристик, о распределении плотности состояний электронов валентной зоны и зоны проводимости, о сдвигах основных уровней и изменении кристаллической структуры представляет особый научный интерес. Изменение состава, морфологии, электронных и оптических свойств пленок  $\text{CdF}_2$  изучены слабо.

### МЕТОД

С использованием методов оже-электронной спектроскопии, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, дифракции быстрых электронов и угловых зависимостей коэффициента неупругоотраженных электронов изучено влияние бомбардировки ионами и электронами на состав, электронную и кристаллическую структуру поверхностных слоев монокристаллических образцов и пленок  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CdF}_2(111)$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными инородными примесями в приповерхностной области  $\text{CdF}_2$  являлись атомы кислорода и углерода. Кроме того, в оже- и масс-спектрах обнаружено малое количество (1 - 2 ат.%) атомов S и N. Как видно из рис.1 при прогреве пленки до 900 К происходит почти полное испарение углерода, азота, серы и уменьшение концентрации кислорода до 3 - 4 ат.%. Наиболее оптимальная температура обезгаживания пленки  $\text{CdF}_2$  - 1000 - 1050 К.

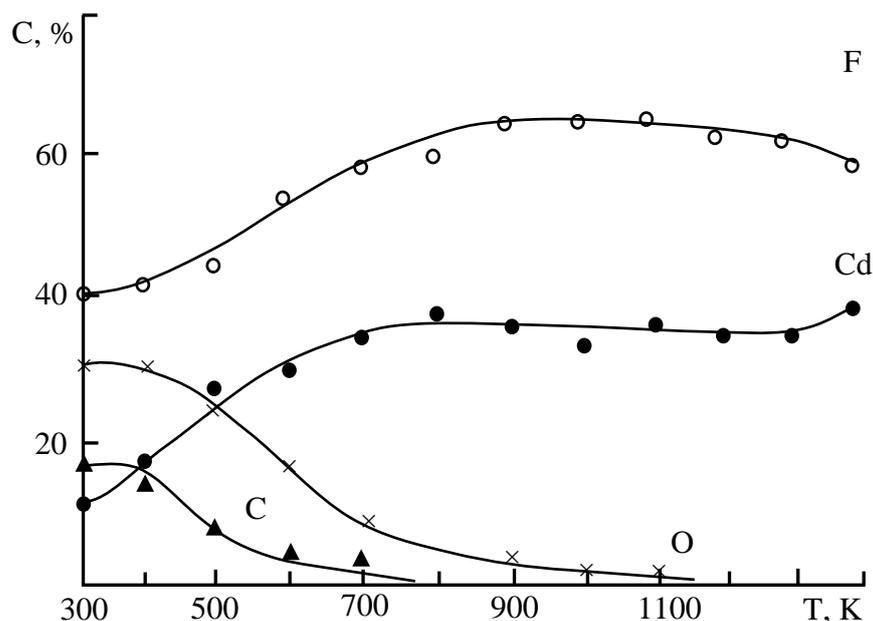


Рис 1. Изменение концентрация атомов Cd, F, C, O на поверхности плёнки  $\text{CdF}_2$  при термической очистке.

При этом концентрация кислорода уменьшалась до 2 - 3 ат.% и эти образцы нами принимались за "чистые". Дальнейшее увеличение температуры прогрева приводило к частичному разложению  $\text{CdF}_2$ , вследствие чего наблюдалось десорбция фтора с поверхностных слоев и обогащение этих слоев атомами кадмия (рис.1).

В качестве объекта исследования был использован монокристаллический образец  $\text{CaF}_2(111)$  толщиной ~ 0,5 мм и МЛЭ пленки  $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$  толщиной ~500 Å. Перед измерением система  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  очищалась прогревом при 1000 К. Анализ Оже- электронного

спектра показал, что на поверхности пленки  $\text{CaF}_2$ , в основном, содержатся примесные атомы  $\text{O}$  и  $\text{C}$  концентрацией не более 1 ат.%. На рис.2 представлены зависимости максимального значения коэффициента ИВЭ  $\sigma_m$  и квантового выхода фотоэлектронов  $Y$  от толщины пленки  $\text{CdF}_2$ , нанесенной на поверхность  $\text{Si}(111)$ . Как видно из этого рисунка, значения  $\sigma_m$  и  $Y$  с ростом  $d$  увеличиваются, что связано большей эмиссионной эффективностью  $\text{CdF}_2$  по сравнению с  $\text{Si}$ . Глубина зоны выхода вторичных электронов для  $\text{CdF}_2$  при бомбардировке как первичными электронами, так и фотонами с  $h\nu \geq 10$  эВ составляет  $350 \div 400$  Å. Основные исследования в данной работе проведены на пленках толщиной  $d \geq 500$  Å.

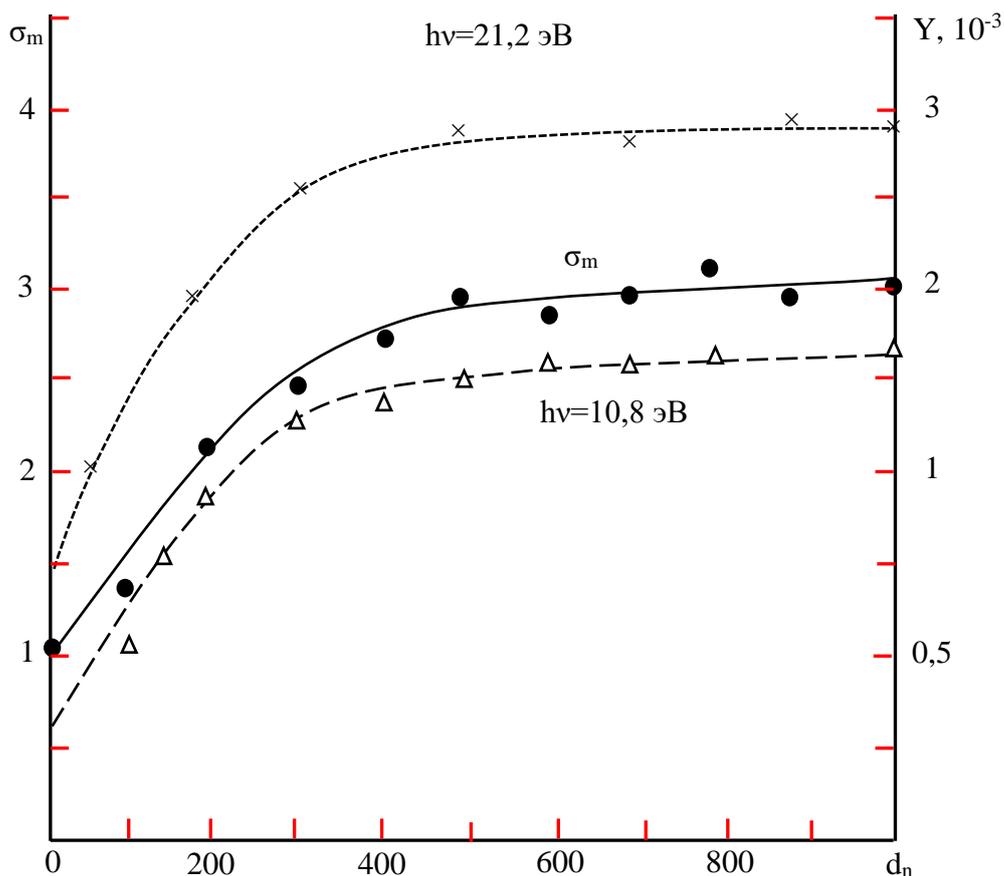


Рис 2. Зависимости  $\sigma_m$  и  $Y$  от толщины пленки  $\text{CdF}_2$

На рис.2.показан УФЭС  $\text{CdF}_2/\text{Si}(111)$ , снятый при  $h\nu = 21,2$  эВ. Эти спектры дают информацию о плотности состояния валентных электронов, а площадь под КЭР - пропорциональна квантовому выходу  $Y$  фотоэлектронов. За начало отсчета взят потолок валентной зоны  $E_v$   $\text{CdF}_2$ .

В таблице 1. представлены значения  $n$  для  $\text{Si}$  с поверхностной пленкой  $\text{CdF}_2$  разной толщины, определенные оптическим методом и методом СУОЭ. Как следует из таблицы, в случае тонких пленок  $\text{CdF}_2$  на  $n$  сильное влияние оказывает подложка - кремний. Роль подложки особенно заметна в видимой и инфракрасной областях света, т.е. в области, где энергия электромагнитного излучения ( $h\nu < 2$  эВ), много меньше ширины запрещенной зоны пленки  $\text{CdF}_2$  ( $E_g \sim 9-10$  эВ). В указанной энергетической области излучения диэлектрическая пленка оказывается почти прозрачной, следовательно свет, проникая вглубь образца, в основном, взаимодействует с атомами кремния. Некоторое уменьшение  $n$  в случае толстых пленок, по-видимому, обусловлено наличием примесных атомов в объеме

пленки CdF<sub>2</sub>. В области ультрафиолетового излучения, особенно при  $h\nu > 10,2$  эВ ( $< 1200$  Å), происходит сильное поглощение света пленкой. Поэтому уже при толщине пленки  $d \sim 600$  Å показатель преломления света почти не отличается от величины  $n$  для толстой пленки. Исходя из этого можно полагать, что глубина проникновения фотонов с  $h\nu > 10$  эВ для CdF<sub>2</sub> лежит в пределах 600-800 Å.

Таблица 1.

Значения показателя преломления света  $n$  для пленок CdF<sub>2</sub>

Метод	Толщина пленок $d$ , Å							
	0 (Si)	100	200	400	600	800	1200	2000
Оптический: = $1050$ (УФ)	3,5	3,0	2,2	1,8	1,6	1,6	1,55	1,55
= $6700$ (кп)	3,4	3,2	3,2	-	3,2	3,0	3,0	3,0
= $10064$ (ИК)	3,1	3,1	3,0	-	-	-	3,0	2,9
СУОЭ	3,35	1,7	1,48	1,52	-	1,43	-	1,45

Значение  $n$ , определенное методом СУОЭ, уже при малых толщинах пленки ( $d \sim 100$  Å) резко отличается от  $n$  для Si и становится характерным для диэлектриков. Некоторое отличие  $n$  пленки толщиной  $d \sim 100$  Å от  $n$  для толстой пленки, по-видимому, обусловлено не только вкладом матрицы в возбуждение межзонных переходов и плазменных колебаний, но и несовершенством стехиометрического состава и кристаллической структуры пленки в следствии влияния подложки. В случае толстых пленок значения  $n$ , полученные методом СУОЭ и оптическим методом, в области ультрафиолетового излучения близки.

## REFERENCES

1. Sugiyama M., Oshima M. // Microelectronics Journal. 1996. V. 27. P. 361-382. *Doi:* [10.1016/0026-2692\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0026-2692(95)00062-3)
2. A.A.Abduvaitov, G.T.Imanova, Kh.Kh.Boltaev, B.E.Umirzakov, D.A.Tashmukhamedova, G. Abdurakhmanov. Advanced Physical Research, 2024, Vol.6, No.1, pp.36-41. <https://doi.org/10.62476/apr61.41>
3. A.A.Abduvayitov, G.Imanova, D.A.Tashmukhamedova, Kh.Kh.Boltaev, B.E.Umirzakov. Scientific Herald of Uzhhorod University. Series “Physics”, 2023, vol. 54, pp.27–35. DOI: 10.54919/physics/54.2023.27
4. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Kurbanov K.K., J. Surface Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech., 2011, vol. 5, no. 4, p. 693.