

# Состав, структура и внутренние напряжения в многослойных пленках нк-ZrN/a-ZrCu, облученных ионами гелия и криптона

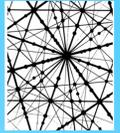
В.В. Углов<sup>1</sup>, С.В. Злоцкий<sup>1</sup>, Г. Абади<sup>2</sup>, И.С. Веремей<sup>1</sup>, А.Е. Рысқұлов<sup>3</sup>,  
Л.А. Козловский<sup>3</sup>, М.В. Здоровец<sup>3</sup>



<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Университет Пуатье, Пуатье, Франция

<sup>3</sup>Институт ядерной физики МЭ РК, Нур-Султан, Казахстан



51-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 24-26 мая 2022 г.

## Введение

В настоящее время разработка новых радиационно-стойких материалов является актуальной проблемой, особенно актуальной для ядерной/термоядерной промышленности, аэрокосмической техники и т. д., где объекты подвергаются сильному облучению ионами, нейтронами, электронами. Многослойные системы перспективны для исследований, поскольку межслоевые границы могут влиять на удаление радиационных дефектов. Они имеют значительные межфазные области, которые могут выступать в качестве устойчивых стоков дефектов. Нанокристаллические покрытия с интерфейсом кристалл/аморфный (например, системы пс-MeN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) обладают высокой радиационной устойчивостью наряду с кристаллическими/кристаллическими системами [1-2]. В данной работе предложена идея замены аморфных слоев а-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> аморфными металлическими слоями а-ZrCu для многослойных радиационно-стойких кристаллических/аморфных пленок.

## Экспериментальная часть

### Осаждение

(реактивный несбалансированный магнетрон)

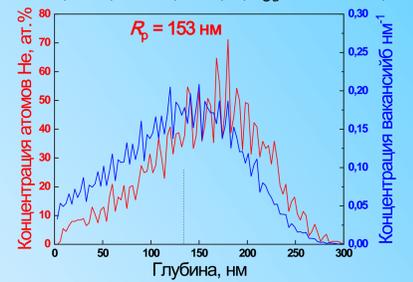
- Базовое давление:  $p_0 \leq 6 \cdot 10^{-6}$  Па
- Две отдельных мишени: **Zr, Cu**
- **Zr, Cu**: постоянный ток
- Расстояние до подложки:  $d = 18$  см
- Ar+N<sub>2</sub> плазма
- Рабочее давление Ar : 0,20 Па
- Потенциал на подложке : -60 В
- Температура подложки: 300°C
- Толщина пленки: ~300 нм
- Концентрация Cu в слое а-ZrCu варьировалась путем изменения тока медной мишени от 40 до 52 Вт и источника тока циркониевой мишени от 45 до 294 Вт.



### Облучение

(ДЦ-60 ускоритель тяжелых ионов)

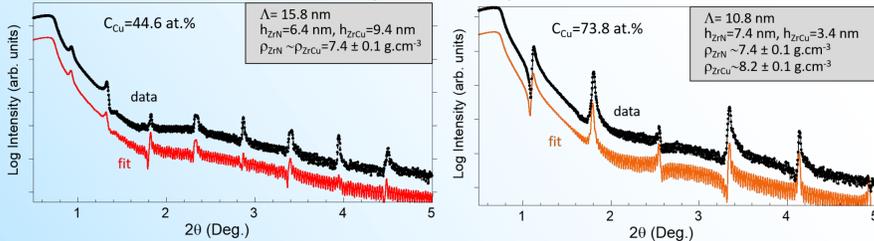
He<sup>2+</sup> (40 кэВ) и Kr<sup>14+</sup> (280 кэВ) ионы, дозы: до  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> (He) и до  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (Kr), КТ ZrN(5 нм)/ZrCu(5 нм) (C<sub>Cu</sub>=52.3 ат.%)



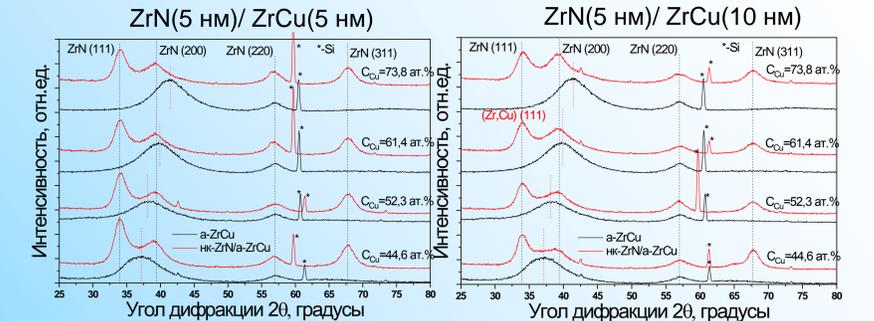
### Исходные пленки

Мощность на Zr мишени (Вт)	Мощность на Cu мишени (Вт)	Концентрация Cu, ат.%	Толщина пленок, нм		СЭМ
			ZrN(5 нм)/ZrCu(5 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(10 нм)	
294	40	44,6	298	302	
243	52	52,5	296	300	
164	51	61,4	299	301	
88	51	73,8	292	296	

### Рефлектометрия

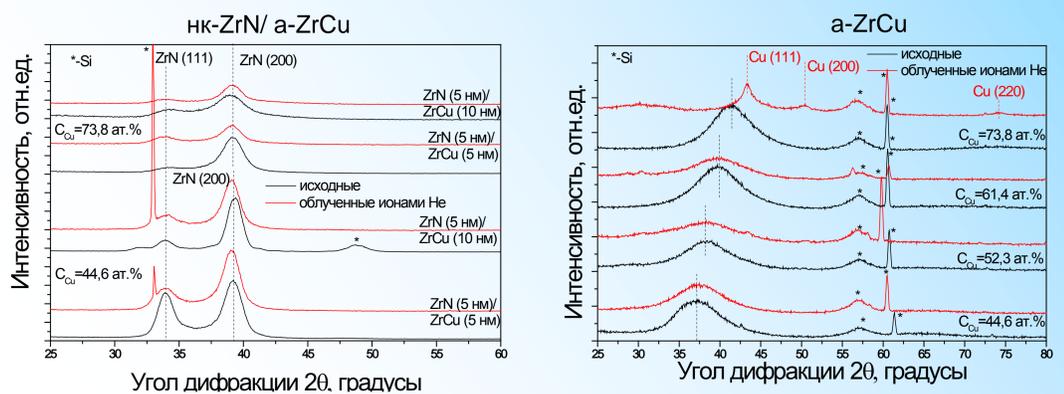


### Рентгеноструктурные исследования



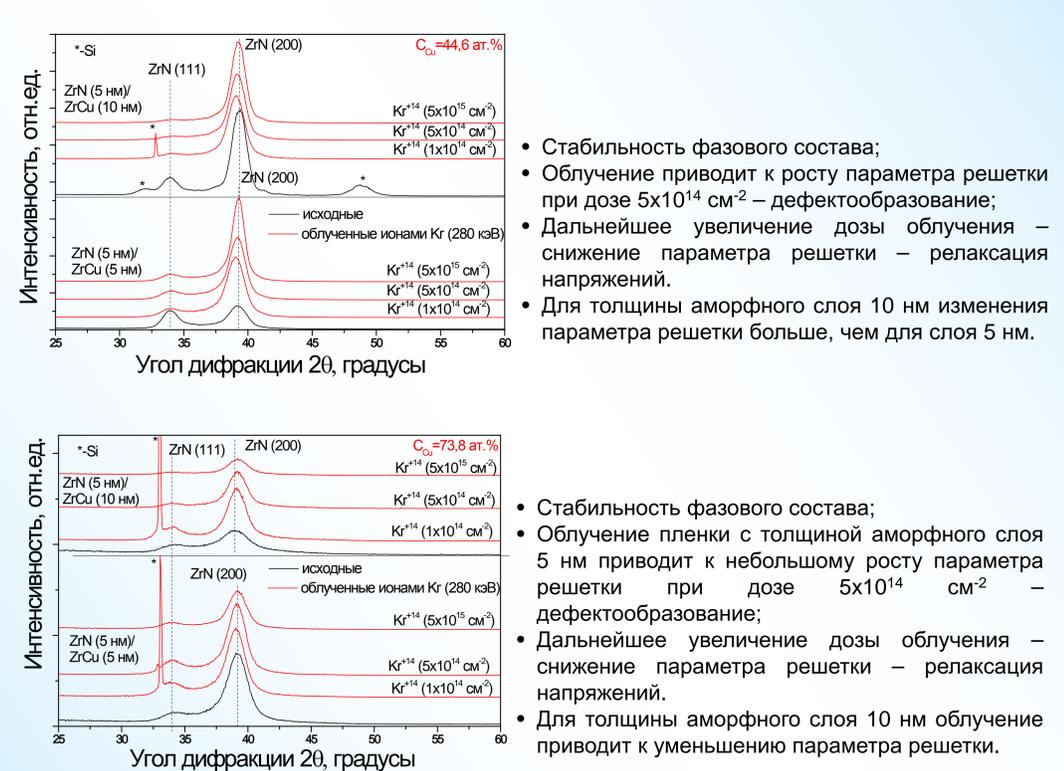
- Концентрация Cu изменяется в а-ZrCu от 44,6 до 73,8 ат.%. (сдвиг центра тяжести аморфного пика);
- Формирование кубических ZrN и аморфных (Zr,Cu) слоев;
- Толщина аморфного слоя и концентрация Cu не влияют на параметр решетки слоев ZrN.

### Фазовый состав пленок нк-ZrN/a-ZrCu после облучения ионами He



- Стабильность фазового состава;
- Облучение пленки C<sub>Cu</sub>=44,6 ат.% с приводит к увеличению параметра решетки – дефектообразование;
- Для толщины аморфного слоя 10 нм изменения параметра решетки больше, чем для слоя 5 нм;
- Облучение пленки C<sub>Cu</sub>=73,8 ат.% приводит к уменьшению параметра решетки;
- Кристаллизация металлической фазы Cu в аморфной пленке (при C<sub>Cu</sub>=73,8 ат.%).

### Фазовый состав пленок нк-ZrN/a-ZrCu после облучения ионами Kr



- Стабильность фазового состава;
- Облучение приводит к росту параметра решетки при дозе  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> – дефектообразование;
- Дальнейшее увеличение дозы облучения – снижение параметра решетки – релаксация напряжений.
- Для толщины аморфного слоя 10 нм изменения параметра решетки больше, чем для слоя 5 нм.

### Напряжения в пленках нк-ZrN/a-ZrCu

Концентрация Cu, ат.%	Напряжения, ГПа					
	Необлученные		Облученные ионами He (40 кэВ, $2 \times 10^{17}$ см <sup>-2</sup> )		Облученные ионами Kr (280 кэВ, $5 \times 10^{15}$ см <sup>-2</sup> )	
	ZrN(5 нм)/ZrCu(5 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(10 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(5 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(10 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(5 нм)	ZrN(5 нм)/ZrCu(10 нм)
44,6	-1,26	-3,16	-1,32	-3,72	-1,18	-3,28
73,8	-2,08	-2,59	-1,70	-1,43	-1,9	-1,1

- Увеличение уровня сжимающих напряжений с повышением толщины аморфного слоя;
- Облучение ионами He – рост уровня сжимающих напряжений для C<sub>Cu</sub>=44,6 ат.% и уменьшение для C<sub>Cu</sub>=73,8 ат.%;
- Облучение ионами Kr – уменьшение уровня сжимающих напряжений.

## Выводы

- Методом магнетронного распыления сформированы многослойные пленки нк-ZrN/a-ZrCu с различной толщиной элементарных слоев и концентрацией меди в слоях ZrCu. Пленки состоят из чередующихся кристаллических (кубических) слоев ZrN и аморфных слоев ZrCu.
- Установлена устойчивость фазового состава многослойных пленок нк-ZrN/a-ZrCu к облучению ионами He (до  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) и Kr (до  $5 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>).
- Обнаружено формирование сжимающих напряжений в кристаллических слоях многослойных пленок. Выявлено влияние толщины и концентрации меди в аморфном слое на уровень сжимающих напряжений.
- Выявлено, что облучение ионами He и Kr приводит к изменению уровня сжимающих напряжений. При этом для малой концентрации Cu выявлен рост уровня сжимающих напряжений, а для большой концентрации Cu – уменьшение.

### Литература

- [1] V.V. Uglov, G. Abadias et al. / Sur. Coat. Technol., vol. 344, pp.170-176, 2018.  
[2] V.V. Uglov, N. T. Kvasov et al. / Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., vol. 435, pp. 228-235, 2018.



Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Uglov@bsu.by