

Information about the author

Arman Miniyaazov – PhD, deputy director of the branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK, branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: Miniyaazov@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2188-8075>.

Mazhyn Skakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: skakov@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3716-8846>.

Nuriya Mukhamedova* – PhD, Head of the Laboratory of Advanced Materials, branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: bakayeva@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4189-6539>.

Ospan Oken – laboratory technician of the laboratory of advanced materials, branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: oken@nnc.kz.

Mikhail Skopchenko – Head of the group of the laboratory of advanced materials, branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: skopchenko@nnc.kz.

Редакцияға енуі 01.07.2025
Өңдеуден кейін түсуі 14.08.2025
Жариялауға қабылданды 18.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-59](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-59)

MPHTI: 55.22.00



Л.С. Баймолданова^{1*}, А.Д. Погребняк², Баяндинова М.Б.¹, Сакенова Р.Е.¹

¹Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, улица Крылова, 72

²Сумский государственный университет,
Украина, Сумская область, Сумы, улица Римского-Корсакова, 2

*e-mail: baimoldals@gmail.com

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НАНОСЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ (TiAlSiY)N/CrN ПОСЛЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНАМИ ЗОЛОТА

Аннотация: В настоящей работе исследовано влияние ионной имплантации ионами золота (Au⁺) с энергией 60 кэВ и флюенсом 1×10^{17} ион/см² на структурно-фазовое состояние многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN, полученных методом магнетронного напыления. С целью комплексного анализа были применены методы grazing-инцидентной рентгеновской дифрактометрии (GIXRD), просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM), вторичного ионного масс-спектрометрического анализа (SIMS), обратного рассеяния ионов (RBS), а также SRIM-моделирования пробега ионов. Показано, что ионная имплантация приводит к аморфизации приповерхностной зоны толщиной ~20 нм, снижению размера кристаллитов с ~8 нм до 4-5 нм и размытому межслойному перемешиванию компонентов. Установлено селективное распыление азота, превышающее в 3-4 раза значения для Ti и Al, что сопровождается локальной нестехиометрией и перераспределением легирующих элементов, таких как Si и Y. Результаты моделирования и экспериментальные данные коррелируют и указывают на существенное разрушение исходной кристаллической структуры в зоне имплантации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке радиационно-стойких, износостойчивых и термически стабильных защитных покрытий для эксплуатации в условиях высокоэнергетического облучения, термомеханических нагрузок и агрессивных сред.

Ключевые слова: нанослоистые покрытия, TiAlSiY(N)/CrN, ионная имплантация, фазовые превращения, XRD, HRTEM, аморфизация, ионное перемешивание.

Введение

Многослойные нанокompозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов являются перспективными материалами для эксплуатации в условиях интенсивного износа, термических и радиационных нагрузок [1, 2]. Благодаря чередованию наномасштабных слоёв с различной химической природой, такие покрытия демонстрируют супертвёрдость, стабильную текстуру роста и повышенную термостабильность [3, 4]. Особенно эффективно проявляют себя покрытия системы (TiAlSiY)N/CrN, сочетающие высокую твёрдость нитрида титана с хорошей термической стабильностью CrN и легирующими добавками Al, Si и Y [5-7].

Имплантация ионов тяжёлых металлов в твёрдые тела используется как эффективный метод модификации структуры без изменения химического состава и морфологии поверхности [8, 9]. В результате ионной имплантации могут формироваться каскады смещений, приводящие к локальному разрушению кристаллической решётки, ионному перемешиванию и аморфизации [10-12]. Эти процессы оказывают значительное влияние на физико-механические свойства покрытия – в частности, на его нанотвёрдость, пластичность и устойчивость к термическому разрушению.

В ряде работ [13, 14] показано, что в многослойных системах типа TiN/CrN или TiAlN/CrN под действием ионного облучения происходит изменение фазового состава, снижение степени кристалличности и образование аморфных прослоек. GIXRD-анализ позволяет фиксировать смещение пиков дифракции, уменьшение параметра решётки и рассеяние текстуры, что интерпретируется как формирование неупорядоченной фазы. TEM и HRTEM-исследования подтверждают уменьшение размера зёрен, появление высокодефектных областей и аморфных сегментов.

Кроме того, теоретическое моделирование с использованием программы SRIM демонстрирует, что пробег ионов золота при энергиях порядка 60 кэВ составляет 20-25 нм, что соответствует толщине одного-двух нанослоёв [15]. Это подтверждает возможность ионного перемешивания и локальной нестехиометрии, особенно на границах между слоями (TiAlSiY)N и CrN [16]. В сочетании с экспериментальными данными RBS, SIMS и STEM такой подход позволяет комплексно охарактеризовать фазовые преобразования, вызванные радиационным воздействием.

Таким образом, изучение структурно-фазовых изменений в многослойных покрытиях (TiAlSiY)N/CrN под действием ионной имплантации представляет собой актуальную задачу технической физики и материаловедения, направленную на создание терморadiационно-стойких наноматериалов.

Материал и методы исследования

В качестве подложек использовались пластины из нержавеющей стали размером 2,2 × 2,0 см и толщиной 2 мм. Перед нанесением покрытий подложки прошли механическую и ионно-плазменную очистку. Многослойные покрытия (TiAlSiY)N/CrN были сформированы методом вакуумно-дугового испарения с использованием чередующихся катодов высокой чистоты (не менее 99,8 %) на установке ионно-плазменного напыления. В качестве реактивного газа использовался высокочистый азот. Толщина каждого элементного слоя составляла около 18–20 нм, а суммарная толщина покрытия превышала 4 мкм. Нанесение велось в импульсном режиме с чередованием катодов TiAlSiY и Cr. Образцы после осаждения были отполированы до средней шероховатости $R_a = 0,02-0,15$ мкм.

Ионная имплантация проводилась на ускорителе Nissan High Voltage Co. Ltd при энергии 60 кэВ и дозе 1×10^{17} см⁻². В качестве ионов-имплантатов использовались ионы золота Au⁺. Ток ионного пучка не превышал 4 мА. Имплантация осуществлялась на второй группе образцов, в то время как первая группа использовалась в качестве контроля (без имплантации).

Структурный анализ проводился методом гребневой рентгеновской дифракции (GIXRD) на установке с углом падения 15°, в диапазоне 2θ от 30° до 80°. Для определения размеров кристаллитов использовалась формула Дебая-Шеррера.

Микроструктура покрытий изучалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии (HRTEM и STEM) на микроскопе JEOL JEM-F200 (200 кВ), с использованием режимов тёмнопольного контрастирования (HAADF) и анализа зонной дифракции (FFT).

Анализ глубинного распределения элементов выполнялся методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) на установке Hiden Analytical SIMS Workstation с ионным источником O₂⁺ (2 кэВ), при дозированном введении кислорода в камеру до давления 1×10^{-6} Торр. Область сканирования составляла 300×300 мкм и 500×500 мкм.

Моделирование пробега ионов выполнялось с помощью программного пакета SRIM 2013 по методу Монте-Карло, с учётом плотности и состава покрытий.

RBS-анализ (обратное упругое рассеяние) осуществлялся с использованием ионов гелия ⁴He⁺ с энергией 1,4 МэВ на электрооптическом генераторе, для оценки глубинного распределения атомов и подтверждения результатов SIMS и TEM.

Результаты и обсуждения

На дифрактограмме покрытия (TiAlSiY)N/CrN, приведенной на рисунке 1, полученного методом вакуумно-дугового осаждения до ионной имплантации, наблюдаются выраженные дифракционные максимумы, соответствующие кубической фазе нитрида титана. Наиболее интенсивный пик зафиксирован в области $2\theta \approx 36,5^\circ$, что соответствует отражению по плоскости (111) кристаллической решетки NaCl-типа. Это указывает на наличие доминирующей текстуры роста TiN по направлению [111], что характерно для нитридных покрытий с высокой плотностью упаковки атомов в данной плоскости. Дополнительные пики при $2\theta \approx 43^\circ$ и $2\theta \approx 63^\circ$ также относятся к TiN и соответствуют отражениям от плоскостей (200) и (220), соответственно. Наличие сразу нескольких рефлексов указывает на хорошую кристалличность покрытия и поликристаллическую структуру с предпочтительной ориентацией.

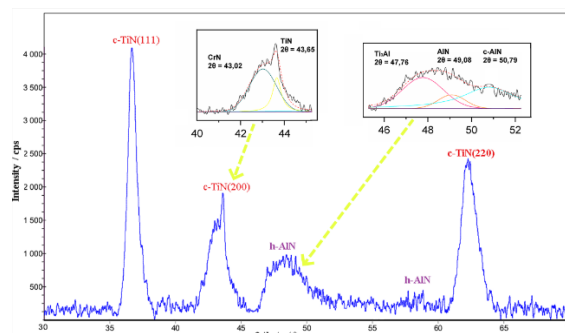


Рисунок 1 – GIXRD-дифрактограмма исходного многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN при угле падения 15°

Особый интерес представляет область $2\theta \approx 43^\circ$, где наблюдается частичное перекрытие дифракционных пиков TiN(200) и CrN(200), что подтверждается деконволюцией, представленной на вставке. Пики TiN и CrN находятся вблизи друг друга, что логично при формировании многослойной структуры с чередованием слоев TiAlSiY(N) и CrN толщиной около 18–20 нм. Это наложение сигналов свидетельствует о тонком распределении фаз и близости их решеточных параметров. Совместное присутствие этих фаз подтверждает, что осаждение проводилось в режиме последовательного чередования катодов, и слоистая архитектура была успешно сформирована.

В интервале углов 2θ от 47° до 51° регистрируются менее интенсивные, но хорошо различимые пики, соответствующие гексагональной фазе нитрида алюминия AlN. Формирование h-AlN свидетельствует о фазовом обособлении алюминия в условиях насыщения структуры, когда его содержание превышает предел растворимости в решетке TiN. В этих же пределах фиксируются сигналы, указывающие на наличие фаз TiAlN и, возможно, кубического AlN, который представляет собой метастабильную модификацию. Присутствие данных фаз подтверждает сложную многокомпонентную природу покрытия и его метастабильную структуру.

Уширение основных дифракционных максимумов свидетельствует о нанокристалличности структуры, а также о наличии внутренних напряжений и дефектов. Расчеты по формуле Дебая-Шеррера показывают, что средний размер кристаллитов составляет около 8 нм. При этом отсутствие посторонних фаз, таких как оксиды или карбонаты, указывает на чистоту процесса осаждения и отсутствие значительного окисления во время формирования покрытия.

Полученные данные рентгеноструктурного анализа подтверждают формирование многослойного наноструктурированного покрытия (TiAlSiY)N/CrN с доминирующей текстурой роста TiN по плоскости (111), присутствием сопутствующих фаз CrN, h-AlN и TiAlN, а также с высокой степенью упорядоченности и мелкозернистой структурой. Такая архитектура обеспечивает основу для стабильных механических свойств и высокой радиационной стойкости, а также играет ключевую роль в механизмах последующих изменений структуры при воздействии ионной имплантации.

Морфологические и микроструктурные особенности многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN подтверждаются результатами сканирующей электронной микроскопии, представленной на рисунке 2. Поперечное сечение (а), полученное при увеличении $\times 6500$, демонстрирует равномерную толщину покрытия, составляющую около 5,14 мкм. Покрытие обладает плотной структурой без признаков пор или включений, с чёткой границей между подложкой и осаждённым слоем, что свидетельствует о хорошей адгезии и стабильности процесса осаждения. Вертикально ориентированные зерна, наблюдаемые в структуре, указывают на столбчатый характер роста, типичный для покрытий, сформированных методом вакуумно-дугового испарения с азотной реакционной атмосферой.

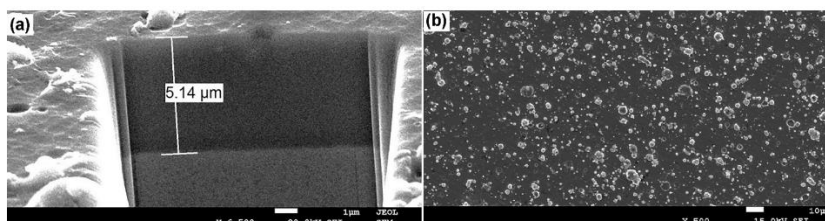


Рисунок 2 – СЭМ-изображения необлученного покрытия (TiAlSiY)N/CrN:
(а) поперечное сечение; (b) морфология поверхности

Микрофотография поверхности (b), снятая при увеличении $\times 500$, демонстрирует распределение округлых микрочастиц различного диаметра, типичных для капельного переноса материала при дуговом осаждении. Несмотря на наличие капель, поверхность сохраняет однородность и не содержит выраженных дефектов или трещин, что подтверждает высокое качество полученного покрытия.

Морфологические данные хорошо согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа. До воздействия ионной имплантации в структуре покрытия доминирует текстура роста по плоскости TiN(111), что также соответствует вертикальной ориентации зёрен, наблюдаемой на поперечном сечении. Присутствие дополнительных рефлексов от плоскостей (200) и (220), а также слабо выраженных пиков, соответствующих гексагональному AlN, указывает на поликристаллическую природу структуры и наличие в системе сопутствующих фаз.

После ионной имплантации (Au^+ , 60 кэВ, $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) наблюдается снижение интенсивности основных дифракционных максимумов, их уширение и частичное смещение в область меньших углов. Эти изменения свидетельствуют о разрушении кристаллического порядка, увеличении дефектности, развитии аморфизации в приповерхностной зоне, а также возможном уменьшении параметров решётки вследствие напряжений и нестехиометрии. Расчёты по формуле Дебая–Шеррера показывают уменьшение среднего размера кристаллитов с $\sim 8 \text{ нм}$ до $\sim 4\text{--}5 \text{ нм}$, что подтверждает радиационно-индуцированную фрагментацию зёрен и ионно-обусловленные фазовые преобразования в структуре покрытия.

Структурные особенности покрытия (TiAlSiY)N/CrN до и после ионной имплантации детально изучены с использованием просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM, STEM), а также методом спектроскопии упругого обратного рассеяния (RBS). В исходном состоянии покрытие характеризуется ярко выраженной многослойной наноструктурой с чередованием слоёв (TiAlSiY)N и CrN. Средняя толщина отдельных слоёв составляет порядка 18 нм для (TiAlSiY)N и 13 нм для CrN, что подтверждается прямыми наблюдениями в режиме TEM. Отдельные слои имеют чёткие границы, визуально различимы по контрасту, и демонстрируют упорядоченный столбчатый рост с преобладающей ориентацией. Размер нанозёрен находится в пределах 6–8 нм, структура покрытий в целом сохраняет высокую степень кристалличности.

На рисунке 3 приведен RBS-спектр многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN до ионной имплантации: сравнение экспериментальных данных с симуляцией и распределение основных элементов по глубине, где отчётливо прослеживаются пиковые сигналы от всех основных элементов, входящих в состав покрытия, включая N, Al, Si, Cr, Ti и Y. Симулированная модель (синяя линия) демонстрирует хорошее соответствие экспериментальной кривой (красная линия), что указывает на корректную аппроксимацию

элементного состава и однородное распределение элементов по глубине. Пик азота в области 140-150 канала подтверждает его равномерное присутствие в нитридной матрице. Пики алюминия и кремния в районе 260-300 каналов соответствуют включению легирующих компонентов в кубическую решётку TiN. Отдельно фиксируются элементы Cr и Ti на границе 350-360 каналов, а пик Y в правой части спектра свидетельствует о его устойчивом присутствии, несмотря на его низкое содержание. Отсутствие заметного сигнала кислорода указывает на стабильность состава и отсутствие поверхностного окисления.

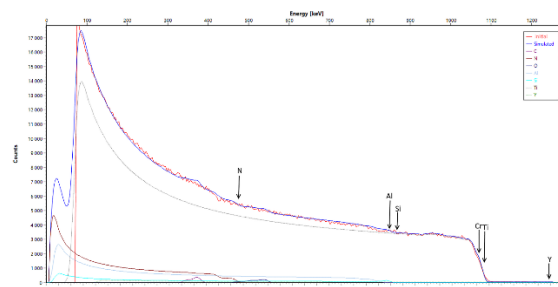


Рисунок 3 – RBS-спектр многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN до ионной имплантации: сравнение экспериментальных данных с симуляцией и распределение основных элементов по глубине

После ионной имплантации ионами золота (60 кэВ , $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) в верхней части покрытия, на глубине до 20 нм, наблюдается формирование аморфных участков размером до 5 нм. Эти зоны характеризуются размытым контрастом, локальной потерей периодичности и отсутствием чёткой дифракционной картины в локальном FFT-анализе. Аморфизация вызвана воздействием каскадов смещений, инициированных ионными ударами, что приводит к перемешиванию границ между слоями (TiAlSiY)N и CrN. Размывание границ хорошо согласуется с данными SRIM-моделирования и SIMS-профилей, указывающих на перемещение атомов и частичную диффузию компонентов.

Кроме того, в зоне имплантации фиксируется увеличение плотности дислокаций – как винтовых, так и краевых, что проявляется в виде искривлённых межплоскостных расстояний и локальных искажений решётки. В отдельных областях наблюдаются пятна с высокой локальной деформацией и нарушением упорядоченности, что указывает на накопление радиационных дефектов. Эти особенности подтверждаются FFT-анализом: в отличие от чётких точек в исходном состоянии, после имплантации диаграммы становятся диффузными и не содержат выраженной зональности, что указывает на снижение степени кристалличности.

Итак, совокупность TEM- и RBS-данных свидетельствует о существенном влиянии ионной имплантации на микроструктуру покрытия. Наблюдается частичная аморфизация, разрушение слоистой архитектуры в приповерхностной зоне, перераспределение компонентов и накопление дефектов, что в дальнейшем может существенно повлиять на физико-механические и функциональные свойства покрытия.

Для оценки распределения ионов и структурных изменений, вызванных ионной имплантацией, были проведены расчёты методом SRIM, а также экспериментальные исследования с использованием методов SIMS и RBS. SRIM-моделирование показало, что при энергии 60 кэВ ионы Au^+ проникают в покрытие на среднюю глубину около 23,5 нм, что соответствует приблизительно 1,2-1,3 нанослою многослойной структуры. Профиль пробега ионов указывает на максимум распределения золота вблизи границы между слоями (TiAlSiY)N и CrN, что делает эту зону наиболее уязвимой к радиационно-индуцированным модификациям.

Одной из особенностей, выявленных в ходе моделирования, является значительная разница в коэффициентах распыления между компонентами. Азот, обладая меньшей массой и более высокой вероятностью выбивания, демонстрирует в 3-4 раза более высокий коэффициент распыления по сравнению с титаном и алюминием. Это приводит к локальной нестехиометрии, селективной потере азота и развитию дефектных зон с повышенным уровнем вакансий, особенно в области межслойных границ.

Глубинные профили, полученные методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS), представлены на рисунке 4. Диаграмма (а), построенная в линейной шкале, отражает

относительное распределение основных элементов (C, N, O, Al, Si, Ti, Y) по глубине покрытия вплоть до 1000 нм. В верхней приповерхностной области наблюдается резкое изменение содержания углерода и кислорода, что указывает на возможное поверхностное загрязнение или процессы окисления. Азот достигает стабильной концентрации после первых 100-150 нм, при этом содержание Ti и Al сохраняется на относительно постоянном уровне по всей глубине покрытия. Элементы Si и Y демонстрируют низкое, но стабильное присутствие, без выраженных градиентов.

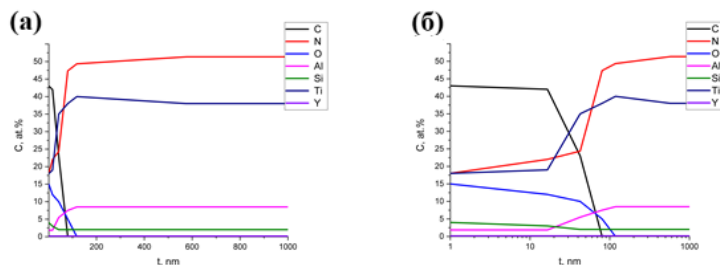


Рисунок 4 – Глубинные профили распределения концентраций элементов в покрытии (TiAlSiY)N/CrN, полученные методом SIMS: (а) в линейной шкале; (б) в логарифмической шкале

В логарифмической шкале (рис. 4 (б)) визуализируется более детализированное поведение элементов вблизи поверхности. Чётко прослеживается рост концентрации азота и спад содержания углерода в пределах первых 10-30 нм, что подтверждает эффект распыления и селективной утраты элементов в зоне ионной имплантации. В этой же области наблюдается нарастание Ti и Al, что может быть связано с их перераспределением вследствие ионного перемешивания и каскадов смещений. Наличие неоднородностей в распределении Si и Y может свидетельствовать о локальной сегрегации, что также подтверждается TEM-исследованием. Присутствие кислорода в приповерхностной области может быть обусловлено пост-имплантационным взаимодействием с атмосферой.

Результаты анализа RBS, представленные ранее, демонстрируют хорошую корреляцию с данными SIMS, подтверждая наличие зон с пониженной плотностью и изменённым элементным составом вблизи поверхности. Это свидетельствует о комплексных радиационных изменениях, включающих аморфизацию, перемешивание границ слоёв и локальную модификацию фазового состава.

Таким образом, совокупность данных SRIM, SIMS и RBS позволяет охарактеризовать область ионной модификации как зону глубиной до 25-30 нм, в которой происходят основные структурные и фазовые превращения, вызванные воздействием ионов Au^+ . Эти изменения критически важны для понимания механизмов радиационной устойчивости и для прогнозирования поведения покрытия в экстремальных условиях.

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало значительное влияние ионной имплантации ионами Au^+ ($E = 60$ кэВ, флюенс 1×10^{17} ион/см²) на структурно-фазовое состояние многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN. Комплексный анализ, включавший методы GIXRD, HRTEM, STEM, SIMS, RBS и SRIM-моделирование, позволил установить следующие ключевые эффекты.

По данным GIXRD, после имплантации наблюдается снижение интенсивности дифракционных максимумов и их уширение. Размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Дебая–Шеррера, уменьшается с ~ 8 нм до $\sim 4-5$ нм, что свидетельствует о радиационно-индуцированной аморфизации приповерхностной зоны и фрагментации зёрен.

HRTEM-исследование выявило образование аморфных областей размером до 5 нм в верхнем слое толщиной ~ 20 нм. Зафиксировано размытие границ между слоями (TiAlSiY)N и CrN, наличие дефектных дислокационных структур и нарушение периодичности кристаллической решётки. Исходная толщина слоёв составляла ~ 18 нм и ~ 13 нм соответственно.

Результаты SRIM-моделирования показали, что ионы Au^+ проникают на глубину до $\sim 23,5$ нм, достигая максимума концентрации на границе между слоями, что совпадает с зоной наиболее интенсивных микроструктурных изменений.

Глубинные SIMS-профили подтвердили наличие ионов золота в приповерхностных слоях и неравномерное распределение элементов, в частности сегрегацию Si и Y. Зафиксировано уменьшение содержания азота в зоне имплантации, обусловленное его высоким коэффициентом распыления, превышающим аналогичные параметры для Ti и Al в 3-4 раза.

Анализ RBS выявил снижение плотности ионной упаковки в верхней части покрытия, что указывает на формирование дефектных зон и нарушение исходной периодичности структуры.

Таким образом, ионная имплантация вызывает совокупность эффектов – аморфизацию, дефектообразование, межслойное перемешивание и перераспределение компонентов, определяющих локальные изменения в структурной и фазовой организации покрытия. Полученные данные могут быть использованы при разработке наноструктурированных покрытий с повышенной радиационной и термохимической стойкостью для эксплуатации в условиях интенсивного ионного или нейтронного облучения.

Список литературы

1. Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings / J. Musil et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 154, № 2-3. – P. 304-313. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01714-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01714-5).
2. Microstructure and physical-mechanical properties of (TiAlSiY)N nanostructured coatings under different energy conditions / K.V. Smyrnova et al // *Metals and Materials International*. – 2018. – Vol. 24, № 5. – P. 1024-1035. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0110-y>.
3. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnjak et al // *Russian Chemical Reviews*. – 2014. – Vol. 83, № 11. – P. 1027-1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>.
4. Influence of implantation of Au⁻ ions on the microstructure and mechanical properties of the nano-structured multielement (TiZrHfVNbTa)N coating / A.D. Pogrebnjak et al // *Physics of the Solid State*. – 2015. – Vol. 57, № 8. – P. 1559-1564. <https://doi.org/10.1134/S1063783415080259>.
5. Bolse W. Ion beam effects in thin films and nanostructures / W. Bolse // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 1994. – Vol. 91, № 1-4. – P. 68-75.
6. Effect of composition and growth mechanism on the structure and mechanical properties of nitride coatings – review / W. Zhao et al // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 827. – Article 153836. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153836>.
7. Ziegler J.F. The stopping and range of ions in matter (SRIM) / J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2010. – Vol. 268, № 11-12. – P. 1818-1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>.
8. Littmark U. Ranges of energetic ions in matter / U. Littmark, J.F. Ziegler // *Physical Review A*. – 1981. – Vol. 23, № 1. – P. 64-74. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.23.64>.
9. Smilgies D.-M. Probing Functional Thin Films with Grazing Incidence X-Ray Scattering: The Power of Indexing / D.-M. Smilgies // *Crystals*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – Article 63. <https://doi.org/10.3390/cryst15010063>.
10. Mahmood A. A review of grazing incidence small- and wide-angle X-ray scattering techniques for exploring the film morphology of organic solar cells / A. Mahmood, J.-L. Wang // *Sol. RRL*. – 2020. – Vol. 4. – Article 2000337. <https://doi.org/10.1002/solr.202000337>.
11. Harrington G.F. Back-to-Basics Tutorial: X-ray Diffraction of Thin Films / G.F. Harrington // *Journal of Electroceramics*. – 2021. – Vol. 47. – Article 108. <https://doi.org/10.1007/s10832-021-00263-6>.
12. How to GIWAXS: grazing incidence wide angle X-ray scattering applied to metal halide perovskite thin films / J.A. Steele et al // *Advanced Energy Materials*. – 2023. – Vol. 13, № 13. – Article 2300760. <https://doi.org/10.1002/aenm.202300760>.
13. Harrington G.F. Intensity corrections for grazing-incidence X-ray diffraction of thin films / G.F. Harrington // *Journal of Applied Crystallography*. – 2021. – Vol. 54.
14. Ziegler J.F. Universal scattering potential method for predicting ion ranges / J.F. Ziegler, J.P. Biersack, J.M. Manoyan // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 1986.

15. Smyrnova K.V. Ion-induced phase transformations in nanostructured nitride coatings / K.V. Smyrnova, A.D. Pogrebnyak, V.M. Beresnev // Vacuum. – 2017. – Vol. 146. – P. 47-54. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.07.023
16. Kelly R., Miotello A. Effects of ion implantation on the phase stability of TiN/CrN multilayers // Applied Physics Letters. – 1993. – Vol. 63, № 12. – P. 1673–1675. <https://doi.org/10.1063/1.109512>.

Л.С. Баймолданова*, А.Д. Погребняк², М.Б. Баяндинова¹, Р.Е. Сакенова¹

¹Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Крылов көшесі, 72

²Сумы мемлекеттік университеті,
Украина, Сумы облысы, Сумы, Римский-Корсаков көшесі, 2

*e-mail: baimoldals@gmail.com

АЛТЫН ИОНДАРЫМЕН ИМПЛАНТАЦИЯЛАҒАННАН KEЙІНГІ (TiAlSiY)N/CrN НАНОҚАБАТТЫ ҚАПТАМАЛАРЫНДАҒЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕР

Бұл зерттеуде магнетронды бүрку әдісімен алынған көпқабатты (TiAlSiY)N/CrN қаптамаларының құрылымдық-фазалық күйіне алтын иондарымен (Au^+) 60 кэВ энергиямен және 1×10^{17} ион/см² флюенсімен иондық имплантация әсері зерттелді. Кешенді талдау жүргізу үшін grazing-инциденттік рентгендік дифрактометрия (GIXRD), жоғары рұқсатты өткін электронды микроскопия (HRTEM), екінші реттік иондық масс-спектрометрия (SIMS), иондардың кері шашырауын талдау (RBS), сондай-ақ SRIM бағдарламасы бойынша иондардың енуін модельдеу әдістері қолданылды. Имплантация нәтижесінде қалыңдығы шамамен 20 нм болатын беттік қабаттың аморфталуы, кристаллит өлшемдерінің ~8 нм-ден 4–5 нм-ге дейін кішіреюі және қабатаралық шекаралардың бұлыңдануы байқалды. Азот атомдарының селективті шашырауы Ti және Al элементтеріне қарағанда 3-4 есе жоғары екендігі анықталды, бұл Si және Y сияқты легирлеуші элементтердің қайта таралуымен және жергілікті стехиометрияның бұзылуымен қатар жүрді. Модельдеу нәтижелері мен эксперименттік деректер бір-бірін растап, имплантация аймағындағы бастапқы кристалдық құрылымның едәуір бұзылатынын көрсетті. Алынған нәтижелер иондаушы сәулеленудің, термомеханикалық жүктемелердің және агрессивті орта жағдайында жұмыс істеуге арналған радиациялық төзімді, тозуға және жоғары температураға шыдамды қорғаныш қаптамаларын жобалауда қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: наноқабатты қаптамалар, TiAlSiY(N)/CrN, иондық имплантация, фазалық түрленулер, XRD, HRTEM, аморфталу, иондық араласу.

L.S. Baimoldanova*, A.D. Pogrebnyak², M.B. Bayandinova¹, R.E. Sakenova^{1*}

¹Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Krylova Street, 72

²Sumy State University,
Ukraine, Sumy Region, Sumy, 2 Rimskogo-Korsakova Street

*e-mail: baimoldals@gmail.com

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS IN (TiAlSiY)N/CrN NANOLAYERED COATINGS AFTER GOLD ION IMPLANTATION

This study investigates the effect of gold ion (Au^+) implantation with an energy of 60 keV and a fluence of 1×10^{17} ions/cm² on the structural and phase state of multilayer (TiAlSiY)N/CrN coatings deposited by magnetron sputtering. To perform a comprehensive analysis, grazing incidence X-ray diffraction (GIXRD), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), secondary ion mass spectrometry (SIMS), Rutherford backscattering spectrometry (RBS), and SRIM simulation of ion range were employed. The ion implantation led to the amorphization of the near-surface layer (~20 nm thick), a reduction in crystallite size from ~8 nm to 4-5 nm, and blurring of the multilayer boundaries. A significantly higher sputtering yield of nitrogen – 3-4 times greater than that of Ti and Al – was identified, resulting in local non-stoichiometry and redistribution of alloying elements such as Si and Y. The modeling results and experimental data correlate well, revealing substantial degradation of the initial crystalline structure within the implantation zone. These findings may contribute to the development of radiation-resistant, wear-resistant, and thermally stable protective coatings designed for operation under high-energy irradiation, thermomechanical loads, and aggressive environments.

Key words: nanolayered coatings, TiAlSiY(N)/CrN, ion implantation, phase transformations, XRD, HRTEM, amorphization, ion mixing.

Авторлар туралы мәліметтер

Лазат Саркытбекқызы Баймолданова* – «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕАҚ, ЖҒЖІТ ЖМ, физика және технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>.

Александр Дмитриевич Погребняк – доктор физико-математических наук, профессор Сумского государственного университета, г. Сумы Украина; e-mail: a.d.pogrebnyak@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Молдир Болеухановна Баяндинова – «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕАҚ, ЖҒЖІТ ЖМ, физика және технологиялар кафедрасының сениор-лекторы, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: shohmanovamb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>.

Римма Ерболатқызы Сакенова – «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕАҚ, ЖҒЖІТ ЖМ, физика және технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: sakenova_rimma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-0129>.

Сведения об авторах

Лазат Саркытбековна Баймолданова* – ассоциированный профессор кафедры физики и технологий НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», PhD, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>.

Александр Дмитриевич Погребняк – доктор физико-математических наук, профессор Сумского государственного университета, г. Сумы Украина; e-mail: a.d.pogrebnyak@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Молдир Болеухановна Баяндинова – сениор-лектор кафедры физики и технологий, НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: shohmanovamb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>.

Римма Ерболатқызы Сакенова – ассоциированный профессор кафедры физики и технологий НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», PhD, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: sakenova_rimma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-0129>.

Information about the authors

Lazat Sarkytbekovna Baimoldanova* – Associate Professor of the Department of Physics and Technology of the National Academy of Sciences «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», PhD, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>.

Alexander Dmitrievich Pogrebnyak – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor of Sumy State University, Sumy, Ukraine; e-mail: a.d.pogrebnyak@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Moldir Boleukhanovna Bayandinova – Senior Lecturer, Department of Physics and Technology, non-profit joint-stock company «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: shohmanovamb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>.

Rimma Yerbolatkyzy Sakenova – Associate Professor at the Department of Physics and Technology at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, PhD, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sakenova_rimma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-0129>.

Поступила в редакцию 18.07.2025

Поступила после доработки 09.09.2025

Принята к публикации 10.09.2025