

3. *Xiao Y., Agrawal G. P.* Reflection and transmission of electromagnetic waves at a temporal boundary // *Optics Letters*. 2014. Vol. 39 (3). P. 574–577.
4. *Zhang R. Y.* Time Circular Birefringence in Time-Dependent Magnetolectric Media // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. DOI: 10.1038/srep13673.
5. *Lin S. R.* Electromagnetic wave propagation in time-dependent media with antisymmetric magnetolectric coupling // *Physics Letters A*. 2016. Vol. 380, № 33. P. 2582–2587.
6. *Zurita-Sanchez J. R.* Reflection and transmission of a wave incident on a slab with a time-periodic dielectric function $\varepsilon(t)$ // *Phys. Rev. A*. 2009. Vol. 79. P. 053821.
7. *Барковский Л. М., Фурс А. Н.* Операторные методы описания оптических полей в сложных средах. Минск, 2002.
8. *Borzdov G.* Frequency domain wave-splitting techniques // *J. Math. Phys.* 1997. Vol. 38. P. 6328–6366.
9. *Furs A. N., Alexeeva T. A.* Reflection and transmission of weakly inhomogeneous anisotropic and bianisotropic layers calculated by perturbation method // *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*. 2008. Vol. 41, № 6. P. 065203.

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ZRSiN, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

А. Д. Подобед

Белорусский государственный университет, г. Минск;

seregka_13@mail.ru;

науч. рук. – В. В. Углов, д-р физ.-мат. наук, проф.

Данная работа посвящена исследованию влияния концентрации кремния (структуры нанокompозита) и дозы облучения ионами He^+ с энергией 30 кэВ на процессы эрозии поверхности нанокompозитной пленки ZrSiN.

Ключевые слова: радиационный блистеринг; нанокompозитное покрытие; пострадиационный отжиг.

ВВЕДЕНИЕ

Образование блистеров (дефектов на поверхности материала в виде пузырей) при облучении ионами He^+ является одним из наиболее важных процессов, приводящих к изменению поверхностных физико-химических свойств и потере структурной целостности материала, что в конечном итоге ухудшает характеристики самого материала [1–2]. Под действием облучения ионами He^+ в пленках, как и в массивных материалах, формируются блистеры благодаря зарождению и росту газовакансионных кластеров [3]. Наличие дополнительных стоков (границ зерен) в покрытиях может существенным образом повлиять на механизмы, приводящие к образованию блистеров. Таким образом, формирова-

ние нанокompозитных пленок с малым (менее 10 нм) размером зерен, может обеспечить повышение их радиационной стойкости.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Покрyтия были сформированы методом реактивного несбалансированного магнетронного распыления. Для получения нанокompозитных покрyтий ZrSiN с различной микроструктурой варьировалась мощность на подложке Si от 40 до 150 Вт при постоянной мощности 300 Вт на подложке Zr. Толщина покрyтий составила ~ 300 нм.

При облучении образцов ионами He⁺ с энергией ионов 30 кэВ интегральные дозы варьировались от 1×10^{15} см⁻² до 8×10^{16} см⁻². Энергетические параметры облучения были выбраны таким образом, чтобы глубина распределения имплантированных примесей He, рассчитанная по программе SRIM-2013, не превышала толщины покрyтия. После облучения пленки подвергались отжигу в вакууме (2×10^{-4} Па) при 600 °С в течение 2 часов.

Микроструктура поверхности облученных пленок до и после термического отжига изучалась с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критическая доза блистерообразования при низкотемпературном облучении ионами гелия (30 кэВ) составляет 4×10^{17} см⁻² [4] и превышает дозу облучения, используемую в данной работе (8×10^{16} см⁻²).

Интенсификация процессов блистеринга (образование блистеров на поверхности) обычно происходит при повышенных температурах облучения [5]. В радиационном материаловедении имитация этих процессов возможна при пострadiационном отжиге. В связи с вышеуказанным, все сформированные пленки были подвергнуты пострadiационному термическому отжигу в вакууме при 600 °С.

Исследования показали, что пострadiационный отжиг всех изучаемых пленок, облученных до дозы 1×10^{16} см⁻², не приводит к формированию блистеров, а также к отшелушиванию.

Для сравнения с нанокompозитными пленками предварительно были исследованы особенности блистерообразования в нанокристаллическом ZrN и аморфном нитриде кремния, облученном дозой 5×10^{16} см⁻². Обнаружено, что для кристаллической пленки ZrN характерно формирование преимущественно закрытых блистеров (пузырей с крышкой) малого размера (диаметр 0,67–1,1 мкм) и высокой поверхностной плотностью (до 55 %). На блистерах присутствуют трещины, которые приводят к вскрытию блистеров.

Для аморфного нитрида кремния наблюдаются крупные (диаметр 4,7–5,3 мкм) открытые (вскрытые пузыри с удаленной крышкой) с невысокой поверхностной плотностью (2,6 %), а также закрытые блистеры с поверхностной плотностью 1,4 %. Высота блистеров в пленке ZrN составляет 120 нм, а глубина кратеров в аморфной пленке – 320 нм (увеличение толщины облученной пленки происходит за счет процессов ее радиационного набухания). Высота блистеров и глубина кратеров соответствуют максимуму пробега ионов гелия, рассчитанному с помощью программы SRIM-2013. Последующее увеличение дозы облучения до $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ не приводит к изменению размеров и плотности распределения блистеров в пленках ZrN и a-Si₃N₄.

С целью изучения влияния структуры нанокompозита на радиационный блистеринг пленок были проведены эксперименты на нанокompозитных пленках ZrSiN при изменении в них концентрации кремния.

Обнаружено формирование блистеров для нанокompозитной пленки ZrSiN с малой концентрацией кремния (7,1 ат. %) после пострadiационного отжига (рис. 1). При этом размер и высота блистеров соответствуют высоте и размеру блистеров кристаллического покрытия ZrN, но поверхностная плотность значительно ниже (2 %). На поверхности наблюдается большое число открытых блистеров. При увеличении дозы облучения до $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ пленки ZrSiN (7,1 ат. %) поверхностная плотность блистеров значительно возрастает (до 35 %). При этом большая часть блистеров являются закрытыми (рис. 2).

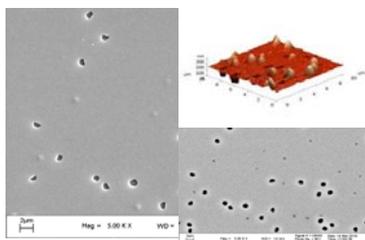


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN (7,1 ат. % Si), облученных ионами гелия (30 кэВ, $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °С

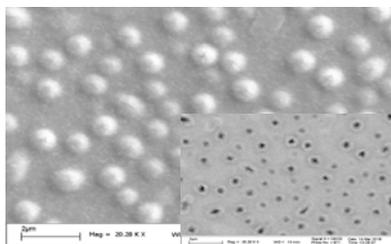


Рис. 2. СЭМ изображения поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN (7,1 ат. % Si), облученных ионами гелия ($8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °С

При увеличении концентрации кремния до 16,3 ат. % доза блистерообразования возрастает до $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3) При этом блистеры характеризуются малыми размерами (диаметр 0,4 мкм, высота 16 нм) и поверхностной плотностью (1 %). Оценки давления, с учетом размеров блистеров, их поверхностной плотности и дозы облучения, показали что давление в блистерах покрытия ZrSiN (7,1 ат. %) кратно выше, чем в ZrN, что и обуславливает вскрытие блистеров (рис. 1). При увеличении дозы облучения число комплексов растет, что обуславливает повышение поверхностной плотности блистеров и формирование закрытых блистеров (уменьшение давления в пузырях).

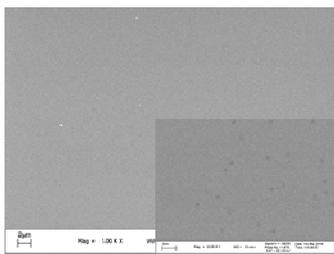


Рис. 3. СЭМ изображения поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN (16,3 ат. % Si), облученных ионами гелия ($8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), подвергнутых пострadiационному отжигу при температуре 600 °C

Микроскопические исследования поверхности пленки ZrSiN с концентрацией кремния 23,1 ат. % не выявили формирования блистеров после пострadiационного отжига. В данном покрытии большая доля дефектов поглощаются аморфной прослойкой, но в отличие от $a\text{-Si}_3\text{N}_4$, зерна ZrN препятствуют перемещению и объединению вакансий, тем самым образованию гелиевых пузырей и блистерообразованию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что пострadiационный отжиг при 600 °C пленки с малой концентрацией Si (7,1 ат. %) приводит к формированию блистеров уже при дозе $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Для этого покрытия формируются блистеры с малой поверхностной плотностью (2 %). При увеличении дозы облучения до $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ поверхностная плотность блистеров значительно возрастает (до 35 %).

Увеличение концентрации Si в нанокompозитной пленке приводит к повышению их радиационной стойкости. При увеличении концентрации Si до 16,3 ат. % доза блистерообразования возрастает до $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При этом блистеры характеризуются малыми размерами и поверхностной плотностью. Обнаружено, что нанокompозитная пленка с наибольшей концентрацией Si (23,1 ат. %) наиболее устойчива к поверхностной эрозии.

Библиографические ссылки

1. Agarwal S., Trocellier P., Serruys Y. Helium mobility in advanced nuclear ceramics // Nucl. Instr. Meth. B. 2014. Vol. 327. P. 117–120.
2. Zinkle S. J. Effect of H and He irradiation on cavity formation and blistering in ceramics // Nucl. Instr. Meth. B. 2012. Vol. 286. P. 4–19.
3. Saladukhin I. A., Abadias G., Uglov V. V. Thermal stability and oxidation resistance of ZrSiN nanocomposite and ZrN/SiN_x multilayered coatings: A comparative study // Surf. Coat. Technol. 2017. Vol. 332. P. 428–439.
4. Uglov V. V., Abadias G., Zlotski S.V. Blister formation in ZrN/SiN multilayers after He irradiation // Surf. Coat. Technol. 2018. Vol. 344. P. 170–176.
5. Liu Z. J., Jiang N., Shen Y. G., Li X. N. Stress-induced surface damages in Ti-Si-N films grown by magnetron sputtering // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. P. 7609–7614.

ФОТОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ МОЛЕКУЛ

А. Д. Пузанова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;
annaruzanova@gmail.com;
науч. рук. – М. П. Самцов, д-р физ.-мат. наук, доц.*

Исследовано влияние объемных заместителей в молекулах индотрикарбоцианиновых красителей на их фотохимическую стабильность. Показано, что присоединение цепочек полиэтиленгликоля к хромофору и замещение полиметиновой цепи ортофениленовым мостиком приводят к существенному уменьшению квантового выхода фотодеструкции.

Ключевые слова: квантовый выход фотодеструкции; фотодинамическая терапия; индотрикарбоцианиновый краситель; полиметиновый краситель; фотосенсибилизатор, фотохимия.

В настоящее время фотодинамическая терапия рака переживает бурное развитие, так как является очень актуальным методом в лечении онкологических заболеваний, основанным на способности фотосенсибилизаторов селективно накапливаться в ткани опухолей и при локальном воздействии светового излучения определенной длины волны вызывать образование синглетного кислорода или радикалов [1], что ведет к гибели опухолевых клеток.

Полиметиновые красители отлично подходят на роль сенсibilизатора для фотодинамической терапии, так как спектры поглощения полиметиновых красителей имеют полосы, которые попадают в терапевтическое окно прозрачности биологических тканей (600–1300 нм), причем коэффициент экстинкции в этих полосах поглощения может достигать довольно большого значения: $5 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ см}^{-1}$ [2]. Однако в настоящее