

ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

И. Н. ПАРХОМЕНКО¹⁾, Л. А. ВЛАСУКОВА¹⁾,
А. С. КАМЫШАН²⁾, Н. С. КОВАЛЬЧУК³⁾, С. А. ДЕМИДОВИЧ³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

³⁾«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

Для оценки воздействия ультрафиолетовой части солнечного спектра в диапазоне длин волн 185–400 нм на оптические параметры диэлектрических слоев проанализировано изменение спектров отражения тонких (11–25 нм) нестехиометрических пленок нитрида (SiN_x), оксида (SiO_x) и оксинитрида (SiO_xN_y) кремния. Пленки наносились на кремниевые подложки методом химического осаждения из газовой фазы при активации индуктивно связанной плазмой. Установлено, что воздействие ультрафиолетового излучения с плотностью потока энергии, в 20 раз превышающей соответствующий параметр естественного солнечного излучения, в течение 6 ч приводит к увеличению показателя преломления пленок SiN_x и SiO_x , характеризующихся избыточным содержанием кремния, в среднем на $\Delta n = 0,03\text{--}0,09$, тогда как изменения показателя преломления пленки SiO_xN_y после ультрафиолетового облучения незначительны ($\Delta n < 0,01$). Как показал анализ инфракрасных спектров, химический состав пленок после ультрафиолетового воздействия не изменялся. Обсуждена природа влияния ультрафиолетового облучения на оптические свойства диэлектрических пленок на основе кремния различного элементного и структурного состава. Полученные результаты могут быть использованы при выборе диэлектриков для приборов, работающих в условиях открытого космоса на низких околоземных орбитах.

Ключевые слова: нитрид кремния; оксид кремния; оксинитрид кремния; ультрафиолетовое облучение; отражение.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Конвергенция-2025» (задание 3.07.1.2, № гос. регистрации 20211910).

Образец цитирования:

Пархоменко И.Н., Власукова Л.А., Камышан А.С., Ковальчук Н.С., Демидович С.А. Воздействие ультрафиолетового излучения на оптические свойства диэлектриков на основе кремния. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2024;1:57–64.
EDN: VVPFEJ

For citation:

Parkhomenko IN, Vlasukova LA, Kamyshan AS, Kovalchuk NS, Demidovich SA. Effect of ultraviolet exposure on the optical properties of silicon-based dielectrics. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024;1:57–64. Russian.
EDN: VVPFEJ

Авторы:

Ирина Николаевна Пархоменко – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Людмила Александровна Власукова – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Александр Степанович Камышан – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории элионики.

Наталья Станиславовна Ковальчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель генерального директора, главный инженер.

Сергей Александрович Демидович – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Authors:

Irina N. Parkhomenko, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies.

parkhomenko@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-0982-3938>

Liudmila A. Vlasukova, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies.

vlasukova@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-8273-6908>

Alexander S. Kamyshan, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of elionics.

kamyshana@mail.ru

Natalya S. Kovalchuk, PhD (engineering), docent; deputy general director and chief engineer.

nkovalchuk@integral.by

Sergey A. Demidovich, leading engineer at the branch laboratory of new technologies and materials.

sdemidovich@integral.by

EFFECT OF ULTRAVIOLET EXPOSURE ON THE OPTICAL PROPERTIES OF SILICON-BASED DIELECTRICS

I. N. PARKHOMENKO^a, L. A. VLASUKOVA^a,
A. S. KAMYSHAN^b, N. S. KOVALCHUK^c, S. A. DEMIDOVICH^c

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatava Street, Minsk 220045, Belarus

^c«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinka Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: L. A. Vlasukova (vlasukova@bsu.by)

The effect of ultraviolet range of solar spectrum (185–400 nm) exposure for 6 h with an energy flux density 20 times higher than the corresponding parameter of natural solar radiation on the optical properties of silicon-based dielectric layers on silicon was studied. Silicon nitride (SiN_x), oxide (SiO_x) and oxynitride (SiO_xN_y) films with thicknesses of 11–25 nm were deposited by inductively coupled plasma chemical vapor deposition method. The reflectance spectra of thin dielectric films were analysed before and after ultraviolet exposure. It has been shown that ultraviolet irradiation results in an increase of the refractive index of the silicon-rich SiN_x and SiO_x films by $\Delta n = 0.03$ – 0.09 , while the refractive index of the SiO_xN_y film remains almost unchanged ($\Delta n < 0.01$). Analysis of the infrared spectra did not reveal any changes in the chemical composition of the dielectric films after ultraviolet irradiation. The origin of the effect of ultraviolet exposure on the optical properties of silicon-based dielectric films of various elemental and structural compositions is discussed. The reported results can be used when choosing dielectrics for devices operating in outer space in low Earth orbits.

Keywords: silicon nitride; silicon oxide; silicon oxynitride; ultraviolet exposure; reflectance.

Acknowledgements. This work was supported by the state programme of scientific research «Convergence-2025» (project 3.07.1.2, state registration No. 20211910).

Введение

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы космических аппаратов играет стойкость их конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. По оценкам экспертов, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры спутников обусловлены неблагоприятным влиянием факторов космического пространства [1]. В связи с этим интенсивно ведутся исследования воздействия факторов космического пространства как на микроэлектронные приборы и схемы, так и на функциональные материалы, в том числе оптические, для космических аппаратов [2–4]. Сегодня большинство спутников запускаются на низких околоземных орбитах (в пределах 200–800 км). Основными факторами среды на таких орбитах, оказывающими негативное влияние на материалы, являются атомарный кислород, ультрафиолетовое (УФ), ионизирующее и электромагнитное излучения, сверхвысокий вакуум, заряженные частицы, резкая смена температур (термоциклы), микрометеориты, искусственные обломки и орбитальный мусор [5]. Из-за длительности и сложности определения пригодности материалов к длительным срокам эксплуатации на космических аппаратах в реальном масштабе времени и натурных условиях полета возникает необходимость проведения ускоренных лабораторных имитационных исследований.

Настоящая работа посвящена изучению воздействия УФ-части солнечного спектра на аморфные пленки нитрида (SiN_x), оксида (SiO_x) и оксинитрида (SiO_xN_y) кремния. Данные материалы являются основными диэлектриками современной кремниевой технологии. Они используются во многих конструкциях зеркал, датчиков космических аппаратов, а также как антибликовые покрытия солнечных батарей [6–8]. В некоторых случаях такие пленки наносятся на поверхности, подвергающиеся воздействию орбитальной среды, в том числе УФ-облучению.

Материалы и методы исследования

Пленки нитрида, оксида и оксинитрида кремния были выращены на кремниевых подложках p -типа с ориентацией $\langle 111 \rangle$ методом химического осаждения из газовой фазы при активации индуктивно связанной плазмой (*inductively coupled plasma chemical vapour deposition*, ICP-CVD) на установке STE ICP200D (*SemiTEq*, Россия). Для очистки подложек предварительно проводилась их последовательная обработка в перекисно-сернокислотной и перекисно-аммиачной смесях. Температура осаждения во всех случаях была 300 °C, мощность высокочастотного разряда находилась в диапазоне

800–1000 Вт. Поток моносилана (100 % SiH_4) поддерживался на уровне 15 стандартных кубических сантиметров в минуту (далее – $\text{см}^3/\text{мин}$) при осаждении всех трех типов диэлектриков. В качестве реагентов для осаждения SiN_x и SiO_x применялись азот (N_2) и закись азота (N_2O), потоки которых составляли 8 и 5 $\text{см}^3/\text{мин}$ соответственно. В случае с SiO_xN_y использовались оба этих газа, смешанных в равных пропорциях ($[\text{N}_2\text{O}] = [\text{N}_2] = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$). Газом-носителем являлась смесь $\text{Ar} + \text{He}$.

Для определения толщин пленок сколы пластин исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе S-4800 (*Hitachi*, Япония). По данным РЭМ, толщины пленок SiN_x , SiO_x и SiO_xN_y составляли 24; 11 и 25 нм соответственно. Анализ химического состава пленок осуществлялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе MultiProbe XPS (*Omicron*, Германия).

Оценка воздействия УФ-части солнечного спектра (185–400 нм) проводилась на имитационной установке Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ. Источником света служила ртутная лампа с полезной мощностью ~ 40 Вт, помещенная в вакуумную камеру ($6,67 \cdot 10^{-4}$ Па) вместе с образцами. Площадь равномерного облучения составляла $2 \times 2 \text{ см}^2$, время экспозиции – 6 ч. Плотность потока энергии на образце достигала $0,26 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Для сравнения: плотность потока энергии солнечного излучения в диапазоне длин волн 200–400 нм составляет $\sim 0,013 \text{ Вт}/\text{см}^2$ [9]. Таким образом, УФ-облучение проводилось при плотности потока энергии, в 20 раз превышающей соответствующий параметр естественного солнечного излучения.

Спектры отражения в области длин волн 0,2–2,5 мкм регистрировались на спектрометре Lambda-1050 UV/Vis (*PerkinElmer*, США) с использованием приставки зеркального отражения (URA). Абсолютная погрешность спектральных коэффициентов зеркального отражения в исследуемом диапазоне составляет $\pm 0,1$ %. Спектры измерялись в трех различных точках образца. Разница интенсивности между спектрами не превышала допустимой погрешности измерений, что говорит об однородности осажденных пленок по толщине. Спектры отражения в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне (2–25 мкм) регистрировались на ИК-фурье-спектрометре Spectrum-3 Optica (*PerkinElmer*). Для моделирования спектров отражения и дисперсии показателя преломления (n) использовалось программное обеспечение *RefFIT* [10], основанное на модели Друде – Лоренца и алгоритме Левенберга – Марквардта. Моделирование и подгонка экспериментальных спектров зеркального отражения осуществлялись с учетом толщин пленок, полученных методом РЭМ. Относительная погрешность определения показателя преломления составляет ~ 1 %.

Результаты и их обсуждение

Методом РФЭС установлено, что исходные пленки нитрида и оксида кремния характеризуются избыточным содержанием кремния. Подробный анализ структуры данных пленок методом РФЭС изложен в работе [11]. С учетом стехиометрического соотношения для нитрида кремния ($[\text{N}]/[\text{Si}] = 1,3$) и оксида кремния ($[\text{O}]/[\text{Si}] = 2$) избыток Si для исходных пленок SiN_x и SiO_x составляет 34 и 57 % соответственно. Для пленок оксинитрида кремния рассчитано соотношение $[\text{O}]/([\text{O}] + [\text{N}])$. Согласно работе [12] значение этого параметра ниже (выше) 0,4 указывает на нитридоподобную (оксидоподобную) структуру. В рассматриваемом случае осажденная пленка SiO_xN_y имеет коэффициент 0,6, т. е. обладает оксидоподобной структурой.

На рис. 1 представлены спектры отражения тонких пленок нитрида, оксида и оксинитрида кремния. Как видно из рис. 1, после УФ-облучения интенсивность спектров снижается для всех типов пленок на $\sim 0,5$ –1,0 %. Исключением является лишь УФ-область для оксида кремния (около 240 нм), где отражение увеличивается на $\sim 1,5$ %. Отметим, что регистрируемые изменения превышают допустимую погрешность измерений.

С учетом толщин пленок по данным РЭМ-измерений и экспериментальных спектров отражения с помощью программы *RefFIT* были смоделированы спектры показателя преломления диэлектрических слоев. Результаты моделирования приведены на рис. 2, а. Для большей наглядности на рис. 2, б, представлены разности спектров до и после УФ-облучения. Для пленок нитрида и оксида кремния увеличение показателя преломления в видимом и ближнем ИК-диапазонах характерно в большей степени, чем для пленки оксинитрида кремния. Изменение показателя преломления для нитрида кремния составляет $\Delta n = 0,03$ –0,09, для оксида кремния – $\Delta n = 0,05$ –0,06. В то же время для оксинитрида кремния изменение показателя преломления после УФ-воздействия находится в пределах погрешности ($\Delta n < 0,01$). Стоит отметить, что в диапазоне длин волн 0,2–0,3 мкм наблюдаются более интенсивное увеличение значений n для оксида кремния и, напротив, снижение значений n для нитрида и оксинитрида кремния. Для нитрида и оксинитрида кремния в данной области проявляется фундаментальное поглощение, для оксида кремния – поглощение посредством «хвостовых» состояний у края зоны. Следовательно, наблюдаемые изменения могут быть обусловлены изменением плотности «хвостовых» состояний у края зоны и смещением основной полосы поглощения.

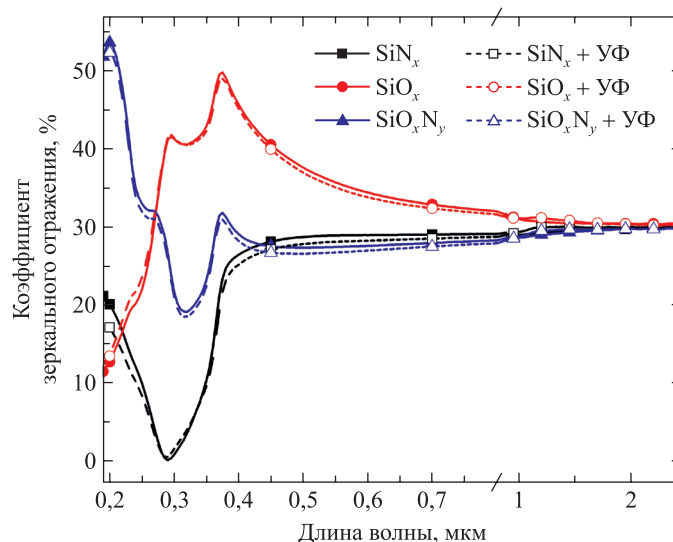


Рис. 1. Спектры зеркального отражения образцов SiN_x , SiO_x , SiO_xN_y до и после УФ-воздействия

Fig. 1. Specular reflectance spectra of SiN_x , SiO_x , SiO_xN_y samples before and after ultraviolet (UV) exposure

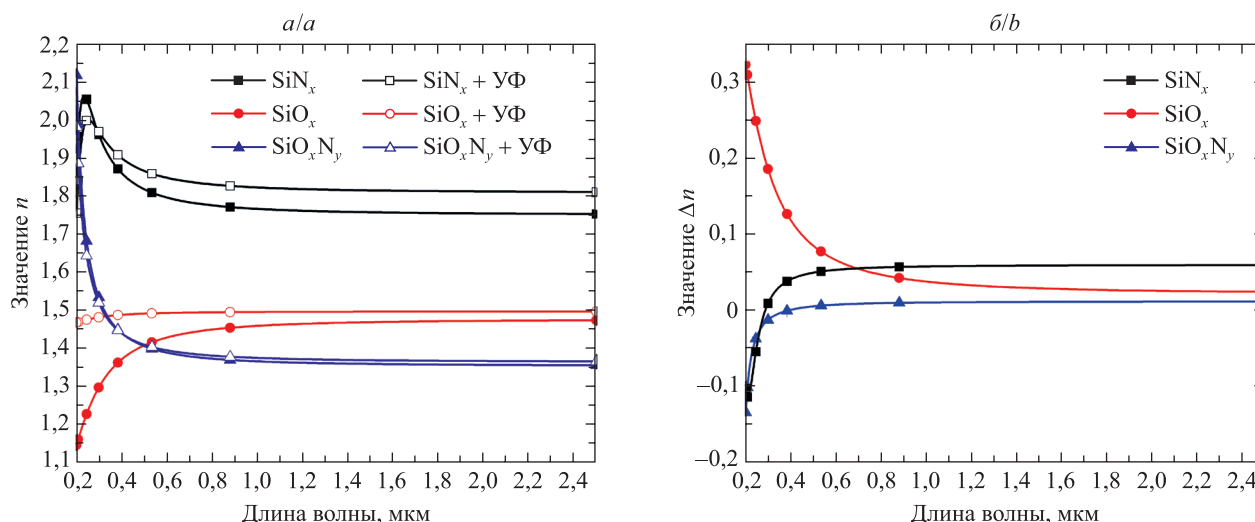


Рис. 2. Дисперсия показателя преломления (а) и разность спектров (б) образцов SiN_x , SiO_x , SiO_xN_y до и после УФ-воздействия

Fig. 2. Dispersion of the refractive index (a) and difference of the spectra (b) of SiN_x , SiO_x , SiO_xN_y samples before and after UV exposure

На рис. 3 представлены спектры ИК-отражения образцов SiN_x , SiO_x , SiO_xN_y до и после УФ-воздействия. В спектре исходного образца нитрида кремния проявились широкая полоса с максимумом при 830 см^{-1} , обусловленная валентными колебаниями связи $\text{Si}-\text{N}$ [13; 14], и плечо при 1100 см^{-1} , связанное с колебаниями связей $\text{Si}-\text{O}$ [14]. В случае с оксидом кремния в спектре также проявляются обе эти полосы, однако отношение интенсивностей полос $\text{Si}-\text{O}$ и $\text{Si}-\text{N}$ в 3 раза выше, чем для нитрида кремния. Сигнал от связи $\text{Si}-\text{N}$ в ИК-спектре оксидной пленки можно объяснить следующим образом. В качестве источника кислорода при ее осаждении используется закись азота. При разложении молекул N_2O образуется не только активный атомарный кислород, но и активные радикалы азота, которые взаимодействуют с продуктами разложения моносилана с формированием связей $\text{Si}-\text{N}$. Следует отметить, что интенсивность обсуждаемых полос для пленки оксида кремния меньше их интенсивности для пленки нитрида кремния. Это связано с меньшей толщиной оксидной пленки. В спектре оксинитридной пленки полоса $\text{Si}-\text{N}$ смещена в высокочастотную область (имеет максимум при 913 см^{-1}), что обусловлено увеличением концентрации кислорода в пленке. Воздействие УФ-облучения не приводит

к видимым изменениям в спектрах ИК-отражения, что свидетельствует о стабильности структурно-химического состава диэлектрических слоев. Отдельно отметим, что зарегистрировать сигнал от водорода или связей Si—H и N—H использованными методами не удалось, вероятнее всего, из-за слишком малой толщины пленок и (или) концентрации водорода ниже уровня обнаружения. Кроме того, выбранные параметры осаждения методом ICP-CVD (высокие значения температуры осаждения и мощности плазменного источника, применение в качестве прекурсора N_2 вместо NH_3) способствуют формированию пленок с низким содержанием водорода [15–17]. Тем не менее наблюдаемые изменения оптических параметров можно объяснить наличием связей Si—H в пленках и их трансформацией под действием УФ-облучения в более устойчивые связи Si—N, Si—O и Si—O—H, что сопровождается уменьшением отражательной способности пленок [18–20]. Рост показателя преломления при снижении концентрации водорода в пленках нитрида и оксида кремния продемонстрирован в работах [21–23]. Таким образом, увеличение показателя преломления под действием УФ-облучения в проведенном эксперименте можно связать с уменьшением концентрации связанного водорода в пленках.

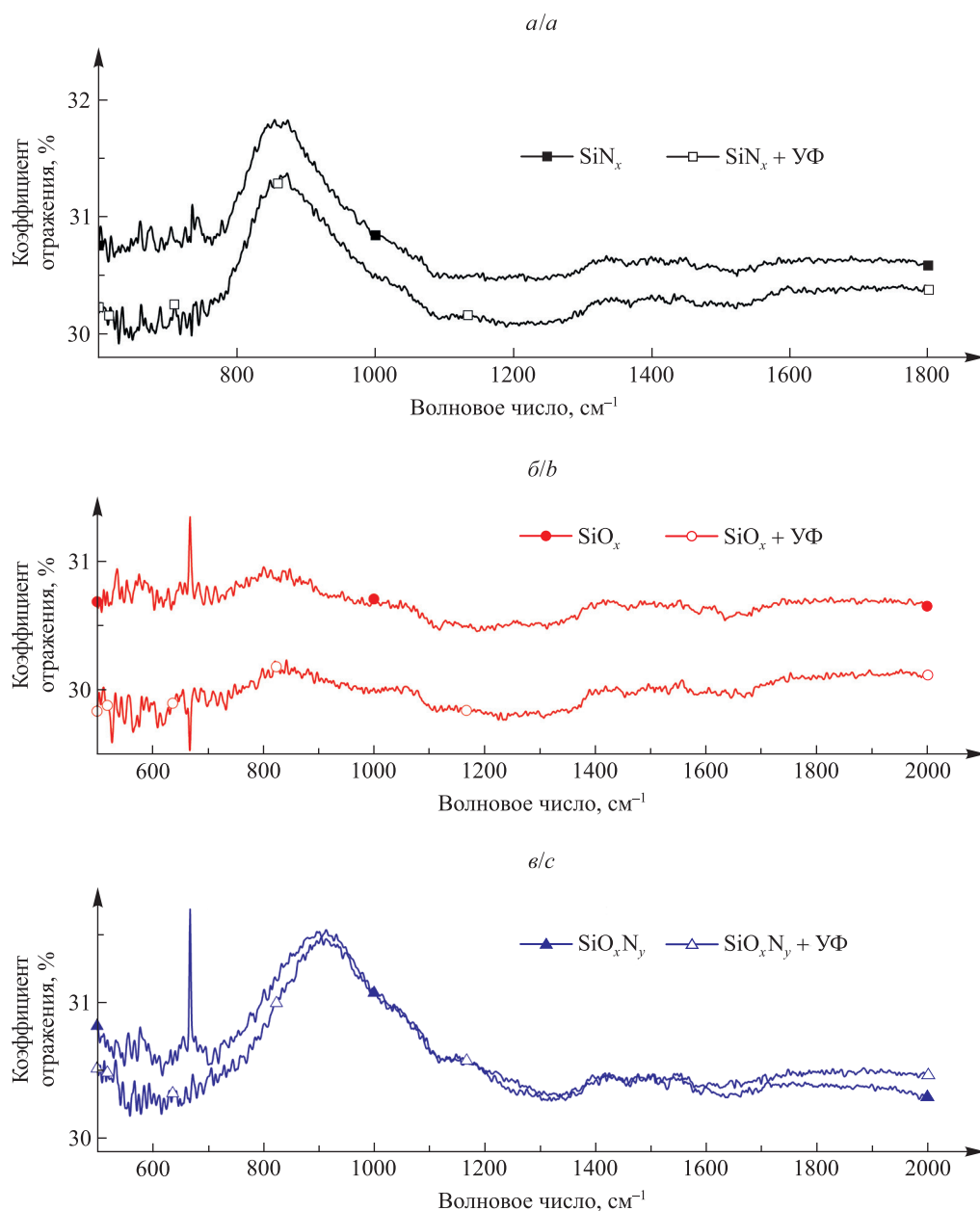


Рис. 3. Спектры ИК-отражения образцов SiN_x (а), SiO_x (б), SiO_xN_y (в) до и после УФ-воздействия

Fig. 3. Infrared reflectance spectra of SiN_x (a), SiO_x (b), SiO_xN_y (c) samples before and after UV exposure

Если принять во внимание вышеизложенное физическое описание воздействия УФ-излучения на оптические свойства диэлектрических слоев, становится понятно, почему для оксинитридной пленки эффект УФ-облучения проявился в меньшей степени. Источником кремния при ее осаждении был моносилан. Логично предположить, что в пленках с избыточным содержанием кремния (в рассматриваемом случае это SiN_x и SiO_x) концентрация связей $\text{Si}—\text{H}$ выше, чем в пленке SiO_xN_y . Этим можно объяснить больший эффект от УФ-воздействия для пленок SiN_x и SiO_x в сравнении с таковым для пленки SiO_xN_y , доля связей $\text{Si}—\text{H}$ в которой значительно меньше ввиду выбранных режимов осаждения. Усиление деградации оксидной пленки под действием УФ-излучения с увеличением избытка кремния также продемонстрировано в работе [24]. Таким образом, при необходимости минимизировать эффект УФ-облучения в диэлектрических пленках на основе кремния следует учитывать концентрацию водорода (которая, в свою очередь, часто коррелирует с избыточным содержанием кремния). Это особенно важно в случае использования пленок в качестве антибликовых покрытий, промежуточных отражателей [8; 19; 25]. Для применений, требующих более высоких значений показателя преломления (например, волноводы [26; 27]), можно порекомендовать дополнительную обработку УФ-излучением.

Заключение

Исследована деградация диэлектрических пленок SiN_x , SiO_x и SiO_xN_y , осажденных на кремниевые подложки методом ICP-CVD, под действием УФ-излучения. УФ-облучение проводилось при плотности потока энергии, в 20 раз превышающей соответствующий параметр естественного солнечного излучения, в течение 6 ч. Исходный элементный состав пленок SiN_x и SiO_x характеризуется избытком кремния, в отличие от элементного состава пленки SiO_xN_y , которая имеет оксидоподобную структуру. Анализ методом ИК-спектроскопии не выявил изменений структурно-фазового состава пленок при УФ-воздействии. Тем не менее после УФ-облучения наблюдается уменьшение отражательной способности диэлектрических слоев. С помощью моделирования спектров в программе *RefFIT* получены дисперсии показателя преломления диэлектрических слоев на кремнии. Установлено, что после УФ-воздействия показатель преломления пленок SiN_x и SiO_x увеличивается в среднем на $\Delta n = 0,03–0,09$, тогда как показатель преломления пленки SiO_xN_y практически не изменяется ($\Delta n < 0,01$). Стабильность пленки оксинитрида кремния, вероятнее всего, обусловлена меньшей концентрацией связей $\text{Si}—\text{H}$. Выявленные закономерности могут быть полезны при выборе диэлектриков на основе кремния для приборов, работающих в условиях открытого космоса.

Библиографические ссылки

1. Новиков ЛС. Настоящее и будущее космического материаловедения. *Вестник Московского университета. Серия 3, Физика. Астрономия*. 2010;4:25–32.
2. Дидык ПИ, Жуков АА. Радиационная стойкость микроэлектронных приборов при совместном воздействии дестабилизирующих факторов космического пространства на этапе конструирования. *Космические исследования*. 2023;61(3):242–247. DOI: 10.31857/S0023420622600209.
3. Xu Xu, He Wenyan, Wang Changjun, Wei Ming, Li Bincheng. SiN_x thickness dependence of spectral properties and durability of protected-silver mirrors. *Surface and Coatings Technology*. 2017;324:175–181. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.078.
4. de O. C. Cintra MP, Santos AL, Silva P, Ueda M, Janke A, Jehnichen D, et al. Characterization of $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ coating on CF/PPS composites for space applications. *Surface and Coatings Technology*. 2018;335:159–165. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.036.
5. de Rooij A. Corrosion in space. In: Blockley R, Shyy W, editors. *Encyclopedia of aerospace engineering. Volume 4, Materials technology* [Internet]. Chichester: John Wiley & Sons; 2010 [cited 2022 March 21]. p. 1–10. Available from: <https://sci-hub.se/10.1002/9780470686652.eae242>. DOI: 10.1002/9780470686652.eae242.
6. Garoli D, Rodriguez De Marcos LV, Larraquert JI, Corso AJ, Proietti Zaccaria R, Pelizzo MG. Mirrors for space telescopes: degradation issues. *Applied Sciences*. 2020;10(21):7538. DOI: 10.3390/app10217538.
7. Karanth SP, Sumesh MA, Shobha V, Sirisha J, Yadav DM, Vijay SB, et al. Electro-optical performance study of 4H-SiC/Pd Schottky UV photodetector array for space applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020;67(8):3242–3249. DOI: 10.1109/TED.2020.3004306.
8. Sinha A, Qian J, Moffitt SL, Hurst K, Terwilliger K, Miller DC, et al. UV-induced degradation of high-efficiency silicon PV modules with different cell architectures. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2023;31(1):36–51. DOI: 10.1002/pip.3606.
9. Новиков ЛС. *Космическое материаловедение*. Москва: Макс-пресс; 2014. 448 с.
10. Kuzmenko AB. Kramers – Kronig constrained variational analysis of optical spectra. *Review of Scientific Instruments*. 2005;76(8):083108. DOI: 10.1063/1.1979470.
11. Parkhomenko I, Vlasukova L, Komarov F, Kovalchuk N, Demidovich S, Zhussupbekova A, et al. Effect of rapid thermal annealing on Si-based dielectric films grown by ICP-CVD. *ACS Omega*. 2023;8(33):30768–30775. DOI: 10.1021/acsomega.3c04997.
12. Chen Kunji, Lin Zewen, Zhang Pengzhan, Huang Rui, Dong Hengping, Huang Xinfan. Luminescence mechanism in amorphous silicon oxynitride films: band tail model or N—Si—O bond defects model. *Frontiers in Physics*. 2019;7:144. DOI: 10.3389/fphy.2019.00144.
13. Rudakov G, Reshetnikov I. IR spectra of ICPCVD SiN_x thin films for MEMS structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;643:012063. DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012063.
14. Liu F, Ward S, Gedvilas L, Keyes B, To B, Wang Q, et al. Amorphous silicon nitride deposited by hot-wire chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(5):2973–2979. DOI: 10.1063/1.1775046.

15. Zhou H, Elgaid K, Wilkinson C, Thayne I. Low-hydrogen-content silicon nitride deposited at room temperature by inductively coupled plasma deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006;45(10S):8388. DOI: 10.1143/JJAP.45.8388.
16. Huang XD, Gan XF, Zhang F, Huang QA, Yang JZ. Improved electrochemical performance of silicon nitride film by hydrogen incorporation for lithium-ion battery anode. *Electrochimica Acta*. 2018;268:241–247. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.02.117.
17. Han Sang-Soo, Jun Byung-Hyuk, No Kwangsoo, Bae Byeong-Soo. Preparation of a -SiN_x thin film with low hydrogen content by inductively coupled plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of The Electrochemical Society*. 1998;145(2):652–658. DOI: 10.1149/1.1838318.
18. Левицкий ВС, Леньшин АС, Середин ПВ, Теруков ЕИ. Исследование процессов деградации оптических свойств мезо- и макропористого кремния при воздействии имитатором солнечного излучения. *Физика и техника полупроводников* [Интернет]. 2015 [протитировано 7 июня 2022 г.];49(11):1540–1545. Доступно по: <http://journals.ioffe.ru/articles/42457>.
19. Aouida S, Saadoun M, Boujmil MF, Ben Rabha M, Bessaïs B. Effect of UV irradiations on the structural and optical features of porous silicon: application in silicon solar cells. *Applied Surface Science*. 2004;238(1–4):193–198. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.05.209.
20. Guiheneuf V, Delaleux F, Pouliquen S, Riou O, Logerais P-O, Durastanti J-F. Effects of the irradiance intensity during UV accelerated aging test on unencapsulated silicon solar cells. *Solar Energy*. 2017;157:477–485. DOI: 10.1016/j.solener.2017.08.044.
21. Cai L, Rohatgi A, Yang D, El-Sayed MA. Effects of rapid thermal anneal on refractive index and hydrogen content of plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon nitride films. *Journal of Applied Physics*. 1996;80(9):5384–5388. DOI: 10.1063/1.363480.
22. Perez AM, Santiago C, Renero-Carrillo F, Zuniga C. Optical properties of amorphous hydrogenated silicon nitride thin films. *Optical Engineering*. 2006;45(12):123802. DOI: 10.1117/1.2402493.
23. Putkonen M, Bosund M, Ylivaara OME, Puurunen RL, Kilpi L, Ronkainen H, et al. Thermal and plasma enhanced atomic layer deposition of SiO₂ using commercial silicon precursors. *Thin Solid Films*. 2014;558:93–98. DOI: 10.1016/j.tsf.2014.02.087.
24. Baek S, Ifthiqaq SM, Jang J, Lee S, Kim M, Jung J, et al. Effect of ultraviolet light exposure to boron doped hydrogenated amorphous silicon oxide thin film. *Applied Surface Science*. 2012;260:17–22. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.12.086.
25. Lambert A, Grundler T, Finger F. Hydrogenated amorphous silicon oxide containing a microcrystalline silicon phase and usage as an intermediate reflector in thin-film silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*. 2011;109(11):113109. DOI: 10.1063/1.3592208.
26. Nejadriahi H, Friedman A, Sharma R, Pappert S, Fainman Y, Yu P. Thermo-optic properties of silicon-rich silicon nitride for on-chip applications. *Optics Express*. 2020;28(17):24951–24960. DOI: 10.1364/OE.396969.
27. Bucio TD, Lacava C, Clementi M, Faneca J, Skandalos I, Baldycheva A, et al. Silicon nitride photonics for the near-infrared. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2020;26(2):8200613. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2934127.

References

1. Novikov LS. Space material science in the present and in future. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3, Fizika. Astronomiya*. 2010;4:25–32. Russian.
2. Didyk PI, Zhukov AA. [Radiation resistance of microelectronic devices under combined effect of destabilising factors of outer space at the design stage]. *Kosmicheskie issledovaniya*. 2023;61(3):242–247. Russian. DOI: 10.31857/S0023420622600209.
3. Xu Xu, He Wenyan, Wang Changjun, Wei Ming, Li Bincheng. SiN_x thickness dependence of spectral properties and durability of protected-silver mirrors. *Surface and Coatings Technology*. 2017;324:175–181. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.078.
4. de O. C. Cintra MP, Santos AL, Silva P, Ueda M, Janke A, Jehnichen D, et al. Characterization of Si_xO_yN_z coating on CF/PPS composites for space applications. *Surface and Coatings Technology*. 2018;335:159–165. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.036.
5. de Rooij A. Corrosion in space. In: Blockley R, Shyy W, editors. *Encyclopedia of aerospace engineering. Volume 4, Materials technology* [Internet]. Chichester: John Wiley & Sons; 2010 [cited 2022 March 21]. p. 1–10. Available from: <https://sci-hub.se/10.1002/9780470686652.eae242>. DOI: 10.1002/9780470686652.eae242.
6. Garoli D, Rodriguez De Marcos LV, Larruquert JI, Corso AJ, Proietti Zaccaria R, Pelizzo MG. Mirrors for space telescopes: degradation issues. *Applied Sciences*. 2020;10(21):7538. DOI: 10.3390/app10217538.
7. Karanth SP, Sumesh MA, Shobha V, Sirisha J, Yadav DM, Vijay SB, et al. Electro-optical performance study of 4H-SiC/Pd Schottky UV photodetector array for space applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020;67(8):3242–3249. DOI: 10.1109/TED.2020.3004306.
8. Sinha A, Qian J, Moffitt SL, Hurst K, Terwilliger K, Miller DC, et al. UV-induced degradation of high-efficiency silicon PV modules with different cell architectures. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2023;31(1):36–51. DOI: 10.1002/pip.3606.
9. Novikov LS. *Kosmicheskoe materialovedenie* [Space material science]. Moscow: Maks-press; 2014. 448 p. Russian.
10. Kuzmenko AB. Kramers – Kronig constrained variational analysis of optical spectra. *Review of Scientific Instruments*. 2005;76(8):083108. DOI: 10.1063/1.1979470.
11. Parkhomenko I, Vlasukova L, Komarov F, Kovalchuk N, Demidovich S, Zhussupbekova A, et al. Effect of rapid thermal annealing on Si-based dielectric films grown by ICP-CVD. *ACS Omega*. 2023;8(33):30768–30775. DOI: 10.1021/acsomega.3c04997.
12. Chen Kunji, Lin Zewen, Zhang Pengzhan, Huang Rui, Dong Hengping, Huang Xinfan. Luminescence mechanism in amorphous silicon oxynitride films: band tail model or N—Si—O bond defects model. *Frontiers in Physics*. 2019;7:144. DOI: 10.3389/fphy.2019.00144.
13. Rudakov G, Reshetnikov I. IR spectra of ICPCVD SiN_x thin films for MEMS structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;643:012063. DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012063.
14. Liu F, Ward S, Gedvilas L, Keyes B, To B, Wang Q, et al. Amorphous silicon nitride deposited by hot-wire chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(5):2973–2979. DOI: 10.1063/1.1775046.
15. Zhou H, Elgaid K, Wilkinson C, Thayne I. Low-hydrogen-content silicon nitride deposited at room temperature by inductively coupled plasma deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006;45(10S):8388. DOI: 10.1143/JJAP.45.8388.
16. Huang XD, Gan XF, Zhang F, Huang QA, Yang JZ. Improved electrochemical performance of silicon nitride film by hydrogen incorporation for lithium-ion battery anode. *Electrochimica Acta*. 2018;268:241–247. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.02.117.
17. Han Sang-Soo, Jun Byung-Hyuk, No Kwangsoo, Bae Byeong-Soo. Preparation of a -SiN_x thin film with low hydrogen content by inductively coupled plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of The Electrochemical Society*. 1998;145(2):652–658. DOI: 10.1149/1.1838318.

18. Levitskii VS, Lenshin AS, Seredin PV, Terukov EI. Investigation of degradation of the optical properties of meso- and macro-porous silicon exposed to solar radiation simulator. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Internet]. 2015 [cited 2022 June 7];49(11):1540–1545. Available from: <http://journals.ioffe.ru/articles/42457>. Russian.
19. Aouida S, Saadoun M, Boujmil MF, Ben Rabha M, Bessaïs B. Effect of UV irradiations on the structural and optical features of porous silicon: application in silicon solar cells. *Applied Surface Science*. 2004;238(1–4):193–198. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.05.209.
20. Guiheneuf V, Delaleux F, Pouliquen S, Riou O, Logerais P-O, Durastanti J-F. Effects of the irradiance intensity during UV accelerated aging test on unencapsulated silicon solar cells. *Solar Energy*. 2017;157:477–485. DOI: 10.1016/j.solener.2017.08.044.
21. Cai L, Rohatgi A, Yang D, El-Sayed MA. Effects of rapid thermal anneal on refractive index and hydrogen content of plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon nitride films. *Journal of Applied Physics*. 1996;80(9):5384–5388. DOI: 10.1063/1.363480.
22. Perez AM, Santiago C, Renero-Carrillo F, Zuniga C. Optical properties of amorphous hydrogenated silicon nitride thin films. *Optical Engineering*. 2006;45(12):123802. DOI: 10.1117/1.2402493.
23. Putkonen M, Bosund M, Ylivaara OME, Puurunen RL, Kilpi L, Ronkainen H, et al. Thermal and plasma enhanced atomic layer deposition of SiO₂ using commercial silicon precursors. *Thin Solid Films*. 2014;558:93–98. DOI: 10.1016/j.tsf.2014.02.087.
24. Baek S, Iftiqar SM, Jang J, Lee S, Kim M, Jung J, et al. Effect of ultraviolet light exposure to boron doped hydrogenated amorphous silicon oxide thin film. *Applied Surface Science*. 2012;260:17–22. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.12.086.
25. Lambert A, Grundler T, Finger F. Hydrogenated amorphous silicon oxide containing a microcrystalline silicon phase and usage as an intermediate reflector in thin-film silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*. 2011;109(11):113109. DOI: 10.1063/1.3592208.
26. Nejadriahi H, Friedman A, Sharma R, Pappert S, Fainman Y, Yu P. Thermo-optic properties of silicon-rich silicon nitride for on-chip applications. *Optics Express*. 2020;28(17):24951–24960. DOI: 10.1364/OE.396969.
27. Bucio TD, Lacava C, Clementi M, Faneca J, Skandalos I, Baldycheva A, et al. Silicon nitride photonics for the near-infrared. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2020;26(2):8200613. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2934127.

Получена 18.10.2023 / исправлена 14.11.2023 / принята 15.11.2023.

Received 18.10.2023 / revised 14.11.2023 / accepted 15.11.2023.