

## ВОЗДЕЙСТВИЕ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ И УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЙ-ОЛОВО НА СТЕКЛЕ

И.Н. Пархоменко<sup>1)</sup>, Л.А. Власукова<sup>1)</sup>, А.С. Камышан<sup>2)</sup>, И.Д. Парфимович<sup>2)</sup>, В.Н. Черник<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030,  
Беларусь, parkhomenko@bsu.by, vlasukova@bsu.by

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем  
имени Севченко, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь,  
kamyshana@mail.ru, parfimovich@bsu.by

<sup>3)</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Москва 119991, Россия, vlachernik@yandex.ru

Исследована стойкость пленок оксида индия-олова (ИТО) толщиной 25 нм, нанесенных на стекло, к воздействию факторов космического пространства на низких околоземных орбитах. Изучено изменение спектрального коэффициента пропускания оптического стекла с тонким покрытием ИТО при воздействии УФ-части солнечного спектра в диапазоне (185-400 нм) и потока кислородной плазмы. Воздействие УФ-излучения приводит к уменьшению пропускания в ИК-области на ~3 %, после экспозиции в кислородной плазме наблюдается деградация пленки ИТО и появление дефектов на поверхности стекла. При флюенсе атомарного кислорода  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  толщина пленки ИТО уменьшается, тогда как при флюенсе  $20 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  пленка ИТО полностью стравливается, что сопровождается увеличением пропускания в области (2-5) мкм.

**Ключевые слова:** УФ облучение; кислородная плазма; ИТО на стекле; ИК пропускание; отражение.

## OXYGEN PLASMA AND UV-RADIATION EFFECT ON OPTICAL PROPERTIES OF INDIUM TIN OXIDE FILMS ON GLASS

Irina Parkhomenko<sup>1)</sup>, Liudmila Vlasukova<sup>1)</sup>, Alexander Kamyshan<sup>2)</sup>,  
Ivan Parfimovich<sup>2)</sup>, Vladimir Chernik<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
parkhomenko@bsu.by, vlasukova@bsu.by

<sup>2)</sup>Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,  
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, kamyshana@mail.ru, parfimovich@bsu.by

<sup>3)</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,  
119991 Moscow, Russia, vlachernik@yandex.ru

The resistance of the 25 nm-thickness indium-tin oxide (ITO) films deposited on glass to environmental factors in low earth orbits has been investigated. To estimate a stability of optical properties we studied the change in the spectral transmittance of the samples under exposure of an UV part of solar spectrum in the range of (180-400 nm), and an oxygen plasma flow. It is shown that UV radiation results in a decrease in transmission in the IR range by ~3%. An oxygen plasma treatment leads to a significant degradation of the ITO film and an appearance of defects on the glass surface. In the case of an atomic oxygen fluence of  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ , the ITO film thickness decreases, while at a fluence of  $20 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ , the ITO film is completely etched off, which is accompanied by an increase in transmission in the (2-5)  $\mu\text{m}$  range.

**Keywords:** UV irradiation; oxygen plasma; ITO on glass; IR transmittance; reflectance.

### Введение

Развитие космической техники выдвигает перед разработчиками все новые задачи по обеспечению надежности агрегатов и систем при длительных сроках функционирования космических

аппаратов (КА). Поэтому 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 [1-4]. Сегодня большинство спутников запускаются на низких околоземных орбитах (от 200 до 800 км). На таких высотах критичными для наружной поверхности КА являются высокоскоростные потоки кислородной плазмы (атомарного кислорода ионосферы с энергией 5-20 эВ в разных зарядовых состояниях). Существенное воздействие на аэрокосмические материалы оказывает также излучение УФ-части солнечного спектра. Из-за длительности и сложности определения пригодности материалов к длительным срокам эксплуатации на КА в реальном масштабе времени в натуральных условиях полета появляется необходимость проведения ускоренных лабораторных имитационных исследований.

Цель данной работы – оценить степень воздействия негативных факторов околоземной орбиты на пленки ИТО на стекле.

### Эксперимент

В качестве образцов использовались пленки оксида индия-олова толщиной 25 нм, нанесенные на пластины оптического стекла магнетронным распылением. Облучение кислородной плазмой (КП), формируемой в магнитоплазодинамическом ускорителе, проводилось на имитационной установке НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова. Параметры потока: средняя энергия ионов 20-40 эВ, состав – нейтральные частицы и ионы O и O<sub>2</sub>, плазменные электроны, плотность потока атомарного кислорода по полиимидному эквиваленту  $(5-8) \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , флюенсы  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  и  $20 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Температура образцов не превышала 100 °С.

Оценка воздействия УФ-части солнечного спектра (185-400 нм) проводилась на имитационной установке НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ. Источником света служила ртутная лампа с полезной мощностью ~40 Вт, помещенная в вакуумную камеру ( $5 \times 10^{-6}$  мм.рт.ст.) вместе с образцами. Площадь равномерного облучения составляла  $2 \times 2 \text{ см}^2$ , время экспозиции 6 часов. С учетом коэффициента 40 (во

столько раз подводимая мощность излучения превышала мощность воздействия в ближнем космосе) это соответствовало 240 ч пребывания на орбите.

Поверхность образцов изучалась в оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV150. Спектры пропускания в среднем ИК-диапазоне регистрировались на ИК-Фурье спектрометре Spectrum 3 Optica. Спектры отражения в области 0.2–1 мкм регистрировались на спектрометре Lambda 1050 UV-VIS с использованием приставки зеркального отражения (URA).

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены снимки поверхности образцов после облучения потоком КП и после УФ-облучения. Как видно, воздействие УФ-излучения не приводило к видимым изменениям поверхности. После облучения в КП при флюенсе  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  на поверхности наблюдаются редкие дефекты (пузыри), тогда как при флюенсе  $20 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  их концентрация резко возрастает.

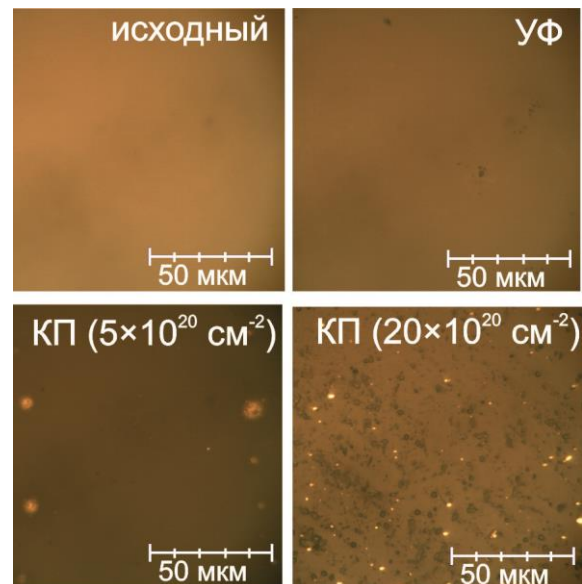


Рис. 1. Снимки оптической микроскопии поверхности ИТО после воздействия УФ излучения и облучения в кислородной плазме

На рисунке 2 представлены спектры ИК-пропускания обсуждаемых структур. Воздействие УФ-излучения привело к уменьшению пропускания образцов во

всем исследованном диапазоне на 3 %, что вероятнее всего связано с возникновением дефектов – центров окраски в самом стекле. Воздействие КП приводило к изменению формы ИК спектра: пропускание в области (2-5) мкм увеличилось с увеличением флюенса кислорода. Это, вероятно, связано со стравливанием пленки ИТО.

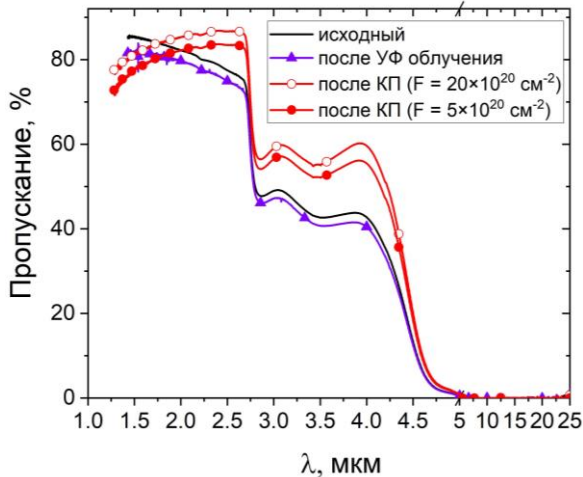


Рис. 2. ИК-спектры пропускания образцов ИТО после воздействия УФ облучения и облучения в кислородной плазме

На рисунке 3 представлены спектры отражения в области (0.2-0.8) мкм. В УФ области исходных образцов наблюдаются характерные максимумы отражения ИТО при 215 и 270 нм. После облучения в КП при флюенсе  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  их интенсивность резко снижается, что говорит об уменьшении толщины пленки ИТО. Увеличение флюенса КП до  $20 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  приводит к исчезновению максимумов в УФ области, что говорит о стравливании пленки ИТО. Уменьшение толщины и сглаживание поверхности ИТО под действием кислородной плазмы – известное явление, используемое для улучшения его поверхностных и электрических свойств [4]. Однако, как показывают наши результаты, поток кислородной плазмы, соответствующий длительному пребыванию на низкой околоземной орбите, сопровождается существенной деградацией пленки ИТО.

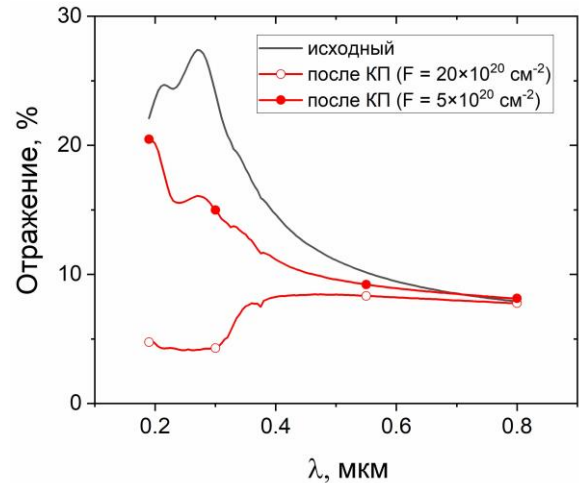


Рис. 3. Спектры отражения образцов ИТО после облучения в кислородной плазме

### Заключение

Исследована деградация пропускания стекло с покрытием ИТО в ИК-диапазоне при воздействии УФ-излучения и кислородной плазмы. Показано, что УФ-излучение незначительно (на 3 %) ухудшает пропускание стекла с ИТО, тогда как при воздействии атомарного кислорода пленка ИТО существенно деградирует. При флюенсе атомарного кислорода  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  толщина пленки ИТО уменьшается. Увеличение флюенса до  $20 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  приводит к полному стравливанию ИТО слоя. При этом на поверхности самого стекла образуются дефекты – пузыри.

### Библиографические ссылки

1. Дидык П.И., Жуков А.А. Радиационная стойкость м/э приборов при совместном воздействии дестабилизирующих факторов космического пространства на этапе проектирования. *Космические исследования* 2023; 61: 242-247.
2. Xu X., He W., Wang Ch., Wei M., Li B. SiN<sub>x</sub> thickness dependence of spectral properties and durability of protected-silver mirrors. *Surface & Coatings Technology* 2017; 324: 175-181.
3. De Cintra M.-P., Santosa A.L., Silva P., Uedac M., Janke A., Jehnichen D., Simon F., Botelho E.C. Characterization of Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>z</sub> coating on CF/PPS composites for space applications. *Surface & Coatings Technology* 2018; 335:159-165.
4. Yahya M., Fadavieslam M.R. Effect of oxygen plasma on ITO surface and OLED physical properties. *Microelectronics Reliability* 2023; 144:114981.