

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА

В.А. Стратанович<sup>1)</sup>, Л.Ф. Иванов<sup>1)</sup>, Е.М. Толстопятов<sup>1)</sup>, В.А. Шелестова<sup>1)</sup>, П.Н. Гракович<sup>1)</sup>,  
В.М. Макаренко<sup>1)</sup>, В.А. Ломач<sup>1)</sup>, Д.В. Брель<sup>1)</sup>, А.Н. Деревяго<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси,  
ул. Кирова 32а, Гомель 246050, Беларусь, [vitalystratanovich.mpri@gmail.com](mailto:vitalystratanovich.mpri@gmail.com),  
[etolstopy@mail.ru](mailto:etolstopy@mail.ru), [sheles\\_v@mail.ru](mailto:sheles_v@mail.ru), [grapn@rambler.ru](mailto:grapn@rambler.ru)

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь

Методами РЭМ и ЭДС изучены морфология и состав фторуглеродных покрытий, синтезируемых на кремниевых подложках в разрядной плазме пониженного давления в среде октафторциклобутана. Установлено, что регулирование мощности позволяет достичь минимальной полярности и низкой поверхностной энергии покрытий, предельно близкой к ПТФЭ. Результаты исследований могут быть использованы для создания барьерных, защитных и антифрикционных покрытий в микроэлектронике и наноаппретирования наполнителей композиционных материалов.

**Ключевые слова:** плазменная полимеризация; тлеющий разряд; фторполимерные покрытия; октафторциклобутан; поверхностная энергия; сканирующий электронный микроскоп (СЭМ); энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС).

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THIN FILMS SYNTHESIZED IN OCTAFLUOROCYCLOBUTANE DISCHARGE PLASMA

V.A. Stratanovich<sup>1)</sup>, L.F. Ivanov<sup>1)</sup>, E.M. Tolstopyatov<sup>1)</sup>, V.A. Shelestova<sup>1)</sup>, P.N. Grakovich<sup>1)</sup>,  
V. M. Makarenko<sup>1)</sup>, V.A. Lomach<sup>1)</sup>, D.V. Brel<sup>1)</sup>, A.N. Dzeraviah<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,  
32a Kirov Str., 246050 Gomel, Belarus, [vitalystratanovich.mpri@gmail.com](mailto:vitalystratanovich.mpri@gmail.com), [etolstopy@mail.ru](mailto:etolstopy@mail.ru),  
[sheles\\_v@mail.ru](mailto:sheles_v@mail.ru), [grapn@rambler.ru](mailto:grapn@rambler.ru)

<sup>2)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus

Fluorocarbon coatings were synthesized by plasma polymerization of octafluorocyclobutane in a low-pressure glow discharge on silicon substrates. The morphology and chemical composition of the coatings were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), confirming the presence of carbon, fluorine, and silicon from the substrate.

Wettability analysis via contact angle measurements revealed hydrophobic behavior. Optimizing the discharge power leads to a reduction in fluoropolymer films polarity, resulting in surface energy values similar to polytetrafluoroethylene (PTFE).

The findings suggest that the obtained fluorocarbon films exhibit promising barrier, anti-friction, and dielectric properties, making them suitable for applications in microelectronics, composite materials, protective coatings and other high-performance industrial applications.

**Keywords:** plasma polymerization; glow discharge; fluoropolymer films; octafluorocyclobutane; surface energy; scanning electron microscope (SEM); energy-dispersive spectroscopy (X-ray EDS).

### Введение

Вакуумные методы позволяют формировать тонкие функциональные слои различной природы с высокими барьерными, защитными, антифрикционными, диэлектрическими и другими свойствами [1-3]. Вакуумно-плазменные процессы, использующие фторсодержащие соединения,

нашли широкое применение в различных областях науки и техники: от травящих и полимеризующихся агентов [4] для электроники [5] до наноаппретов для наполнителей в процессах производства композиционных материалов на основе фторкаучуков и фторполимеров [6]. В этой связи изучение особенностей плазмохимиче-

ской полимеризации фторсодержащих соединений и свойств синтезируемых покрытий представляет собой актуальную научно-прикладную задачу.

### Материалы и методы исследования

Покрытия формировали на поверхности полированных кремниевых пластин в тлеющем разряде пониженного давления в среде октафторциклобутана ( $c\text{-C}_4\text{F}_8$ , фреон R318, ОФЦБ). Скорость расхода регулировали с помощью системы напуска «СНА-2». Давление остаточного воздуха не превышало 5 Па.

Поверхностную энергию (ПЭ) определяли по методу *van Oss-Chaudhry-Good* [7], измеряя краевые углы смачивания покрытий тестовыми жидкостями: дистиллированной водой, глицерином ЧДА, 1 ( $\alpha$ )-бромнафталином.

Морфологию покрытий изучали на электронном микроскопе (СЭМ) «VEGA II LSH» с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD.

### Результаты и их обсуждение

Проанализированы СЭМ-снимки (рис. 1) покрытий, синтезированных при постоянном напряжении питания силового каскада и различной длительности горения разряда. Энергодисперсионный спектр изучаемого покрытия показан на рисунке 2. Исследование фазового контраста, проведенное в режиме BSE («Backscattered Electrons» – детектирования отраженных электронов), указывает на некоторую разницу в контрасте, что может свидетельствовать о различии атомных весов материалов покрытия и подложки. В области покрытия заметны следы деструкции, которые могут быть вызваны воздействием пучка электронов во время анализа.

Спектр покрытия позволяет качественно судить о присутствии углерода, фтора и кремния в анализируемой системе «покрытие-подложка». Идентификацию проводили по базе данных спектрометра.

Увеличение напряжения питания, а следовательно, мощности, подаваемой на силовой каскад генератора, приводит к сни-



Рис. 1. Поперечный скол кремниевой пластины с полимеризованным покрытием (внизу – фазовый контраст)

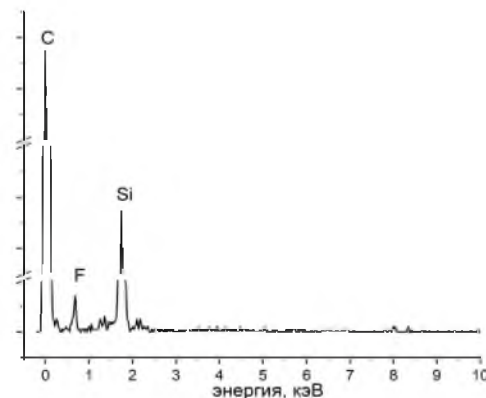


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр покрытия

жению ПЭ и сближению линий полной ПЭ и ее дисперсионной компоненты, как показано на рисунке 3. Это свидетельствует о минимальной полярности формируемых покрытий. Минимума полярная составляющая ПЭ и ее кислотная и щелочные доли достигают при напряжении питания силового каскада равном 135 В. Абсолютные

величины ПЭ не превышают реального разброса значений ПЭ ПТФЭ.

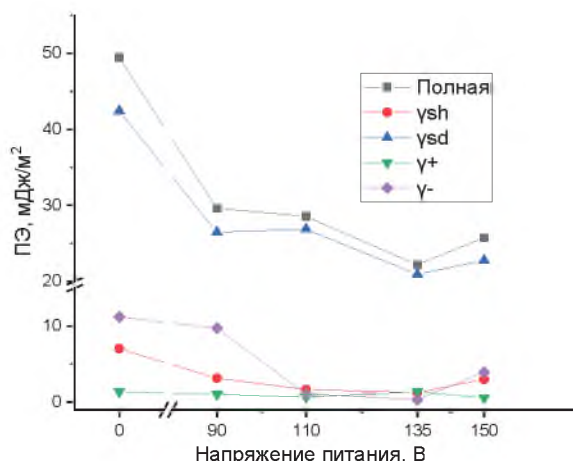


Рис. 3. Зависимость полной поверхностной энергии и ее компонент от напряжения питания силового каскада генератора.

### Заключение

Полимеризация октафторциклобутана в тлеющем разряде является эффективным методом формирования фторуглеродных покрытий с поверхностными свойствами, близкими к ПТФЭ. Поиск оптимальных условий разрядной диссоциации прекурсора позволил получить покрытия с низкой полярностью, что делает их перспективными для защитных, антифрикционных и диэлектрических слоев в различных практических приложениях. Исследования

выполнены в рамках задания 4.2.2 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

### Библиографические ссылки

1. Толстомятов Е.М. Физические закономерности диссоциативного формирования тонких полимерных покрытий: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. Гомель, 2006. 262 с.
2. Гракович П.Н. Разработка плазмохимической технологии поли-п-ксиленовых покрытий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / П. Н. Гракович. Гомель, 1996. 136 с.
3. Рогачев А.А. Функциональные наноразмерные композиционные покрытия на основе продуктов электронно-лучевого диспергирования полимеров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.08. Минск, 2016. 48 с.
4. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. Москва: Мир; 1988. 376 с.
5. Запевалин А. И. Обзор газовой химии, используемой для плазмохимического травления Si, SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Современные научные исследования и инновации* 2014; 6(1): 1-2.
6. Шелестова В. А. Плазменное нанесение фторполимерного покрытия на углеродные волокна для улучшения свойств фторопластовых композитов. *Материалы, технологии, инструменты* 2010; 15(3): 39-51.
7. Oss van C.J., Chaundry M.K. and Good R.J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interaction in Macroscopic Systems. *Chemical Reviews* 1988; 88 (6): 927-941.