

УДК 621.384

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ЛИТОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТИСПЕЙСЕРА

© 2025 г. Е. Д. Тихонова*, Е. С. Горнев**

АО «НИИМЭ», Москва, Россия

*E-mail: etikhonova@niime.ru

**E-mail: egornev@niime.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

После доработки 20.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

В настоящей работе рассматривается метод двойной литографии с использованием антиспейсера, позволяющий сформировать структуры критических слоёв с суб-193-нм литографическими размерами, выходящими за пределы одиночной экстремальной ультрафиолетовой литографии. Исследован комплекс ключевых параметров, влияющий на производительность процесса, и представлен способ оптимизации литографического процесса.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, ЭЦР-плазма, вторая циклотронная гармоника, КВЧ интерферометрия, плазменный зонд

DOI: 10.31857/S0544126925010017, **EDN:** GILVCD

1. ВВЕДЕНИЕ

По мере развития и улучшения характеристик полупроводниковых приборов, становится более сложной и трудоёмкой технология их производства [1, 2]. Литография играет основополагающую роль в улучшении разрешающей способности технологического процесса. Вплоть до ввода экстремальной ультрафиолетовой (УФ) литографии, работающей на длине волны 13.5 нм, в 2019 году в массовое производство [3] центральное место в масштабировании занимала иммерсионная 193-нм литография [1]. Благодаря использованию различных передовых техник улучшения разрешающей способности, таких как многократная литография (МЛ), удалось достичь масштабирования до технологической нормы 14 нм [2].

Последние пять лет ускоренных достижений в области экстремальной УФ-литографии позволили перейти отрасли к крупносерийному производству чипов по технологиям 7 нм и менее [3]. Однако даже после введения 13.5-нм литографии техника многократной литографии продолжала реализовываться в большинстве воспроизводимых слоёв [2]. Кроме того, реализация технологических норм 3 нм и менее требует задействования многократной экстремальной УФ-литографии (рис. 1) [3], что подчёркивает актуальность исследования данных техник.

Также стоит отметить, что, несмотря на сохраняющийся спрос на дальнейшее улучшение технологии вплоть до суб-1-нм диапазона с задействованием

экстремальной УФ-литографии, в мире наблюдается взрывной всплеск интереса к иммерсионной 193-нм литографии в связи с активной разработкой чиплетов и аналоговых устройств [4]. Поскольку переход к экстремальной УФ-литографии достаточно трудоёмкий, финансово затратный и долгосрочный проект (рис. 2), возникает необходимость в усовершенствовании способов формирования структур методами многократной иммерсионной 193-нм литографии.

В отечественной микроэлектронике в настоящее время также активно развивается импортозамещение фотолитографического оборудования: ведётся разработка и изготовление опытного образца установки проекционного переноса изображений топологического рисунка ИС на пластину и источника излучения с длиной волны 193 нм, а также постановка базовых технологических процессов (БТП) проекционного переноса изображений на пластину, в рамках которых допускается возможность использования многократной литографии [5]. В связи с этим в сегменте Российской микроэлектроники для дальнейшего масштабирования также возникает необходимость исследования техник многократной литографии.

В настоящей работе обсуждается технология двойной 193-нм иммерсионной литографии (ДЛ) с использованием антиспейсера, благодаря которой становится возможным получить структуры с размерами меньшими, чем при однократной экстремальной УФ-литографии.

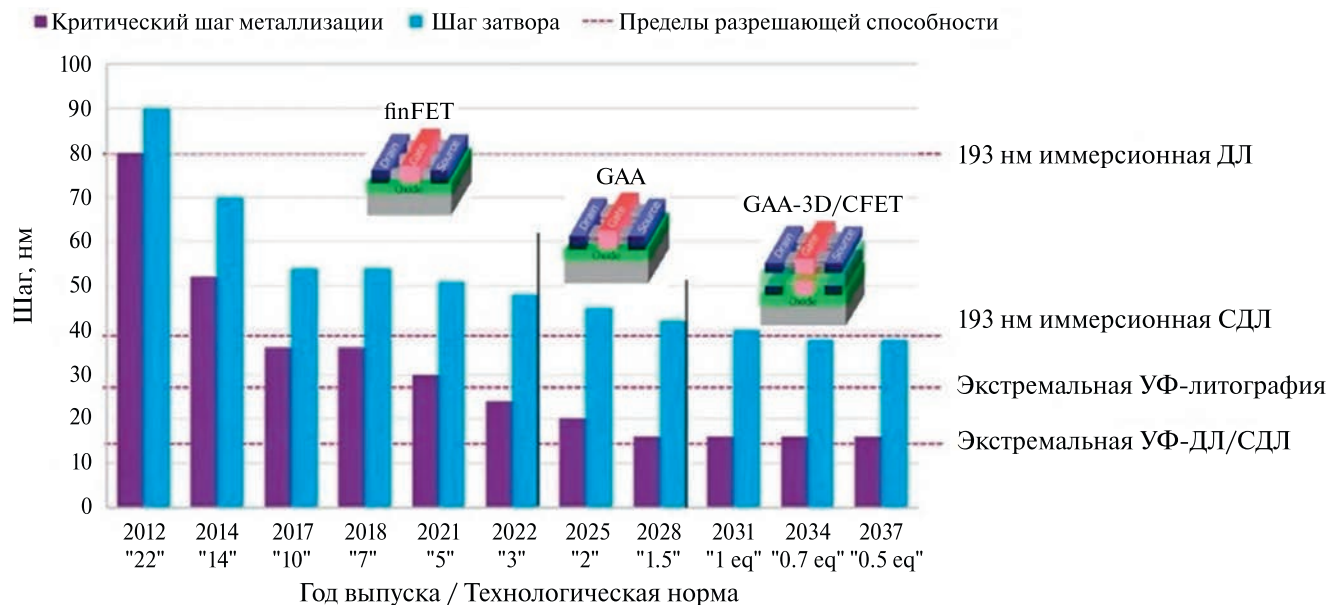


Рис. 1. Дорожная карта развития литографического техпроцесса в зависимости от критических шагов: металлизации и затвора [3]

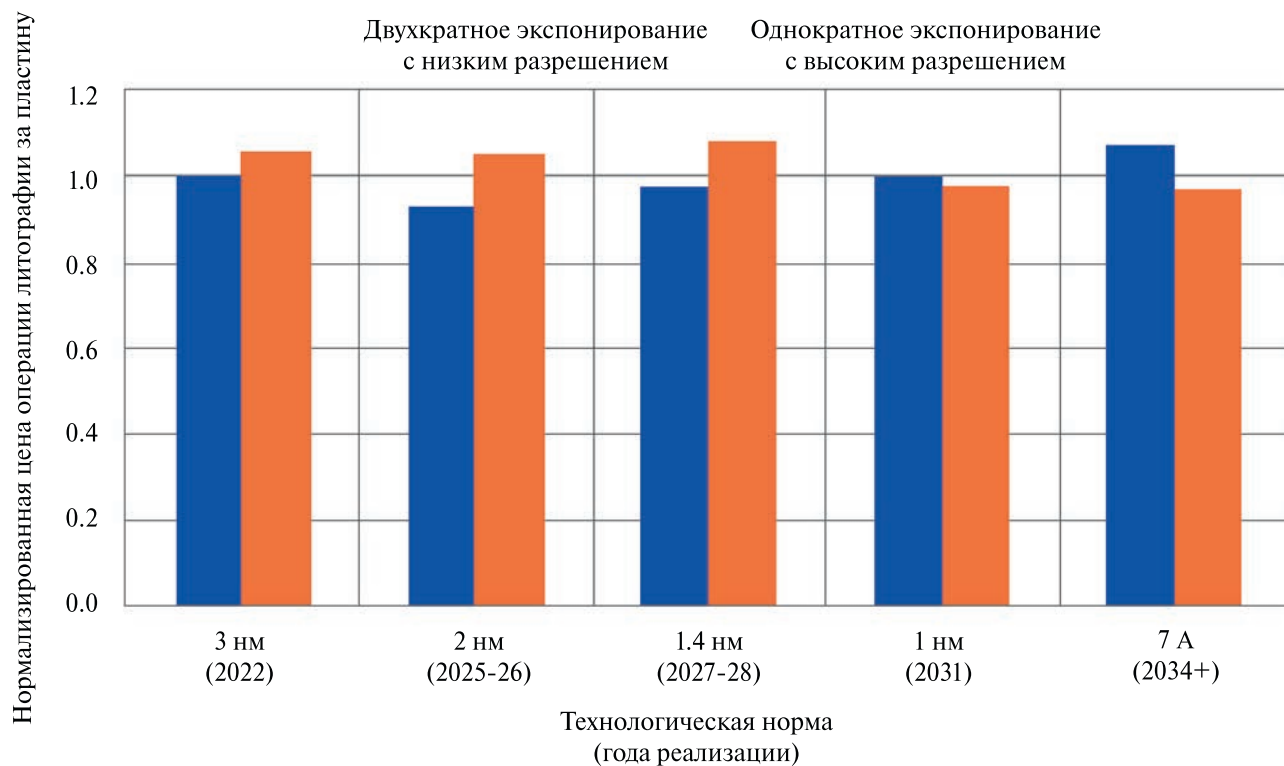


Рис. 2. Сравнение нормализованной цены операции литографии за пластину в зависимости от технологической нормы [4]

2. МЕТОД ДВОЙНОЙ ЛИТОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТИСПЕЙСЕРА

Самым распространённым методом многократной литографии является двойная. Её основная проблема — ошибка совмещения, роль которой становится критичной при конструировании словес, структура которых схожа с массивом параллельных линий [6]. В таких случаях прибегают к использованию самосовмещённых методов литографии [6, 7].

Рассмотрим традиционный метод самосовмещённой двойной литографии (СДЛ) с использованием спейсера и метод двойной литографии (ДЛ) с использованием антиспейсера. На рис. 3 представлены фотолитографические маршруты данных методик.

В традиционном методе СДЛ с помощью сканера литографией формируется изображение в фоторезисте, которое впоследствии на установке травления переносится на жёсткую маску, в результате чего формируются исходные линии с первоначально заданным шагом (мандрелы). Затем методом атомно-слоевого осаждения наносится спейсер — диэлектрик, как правило, SiO_2 , в зависимости от толщины которого будет определяться размер конечных линий. Потом спейсер травится до вскрытия мандрел, чтобы впоследствии селективно их вытравить.

Процессы АСО и травления спейсера должны быть жёстко контролируемы, поскольку в реаль-

ных условиях профиль мандрел способен подвергаться серьёзным изменениям на этапе осаждения. Характер этих изменений влияет при последующем травлении на критический размер и профиль итоговых линий [8], в связи с чем задействуются весьма сложные технологические приёмы и высокое прецизионное оборудование для осаждения и травления, которые требуют грамотной оптимизации всех процессов.

В методе ДЛ с использованием антиспейсера, напротив, в исходном фоторезистивном слое создаётся незащищённая от облучения область, при проявлении которой получаются нужные нам структуры [9]. Вначале, после процесса фотолитографии наносится верхнее покрытие 1 (жертвенный слой), содержащий высокую концентрацию кислоты, которая при выбранных времени и температуре сушки затем диффундирует в глубь позитивного резиста с химическим усилением (ПХУ-резиста). Возникает реакция снятия защиты (деблокирования), меняющая растворимость продиффундированных областей. Таким образом задаются критические размеры элементов структур.

Следующим шагом идёт удаление (промывка) кислотного слоя для подготовки к нанесению верхнего покрытия 2. Данный этап требует тщательного контроля, поскольку полимерное покрытие 2, как и фоторезист, выступают в качестве основных линий. После нанесения и сушки покрытия 2 следует контролируемое проявление, в процессе которого удаляется незащищённая от облучения область

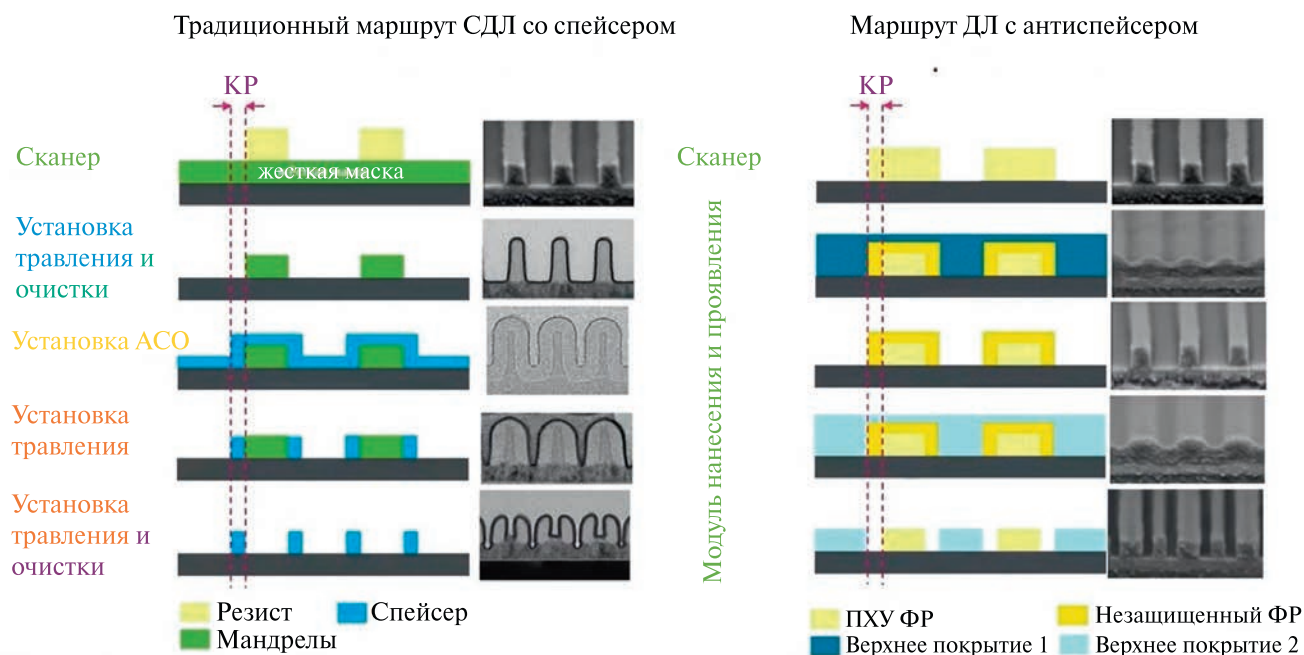


Рис. 3. Технологические маршруты методов: самосовмещённой двойной литографии (СДЛ) с использованием спейсера (слева) и двойной литографии (ДЛ) с использованием антиспейсера (справа) [7, 9]

фоторезистивного покрытия. Итоговые промежутки между линиями после процесса травления становятся желаемыми нами структурами.

Одним из преимуществ применения метода ДЛ с использованием антиспейсера является то, что все этапы после литографии происходят в одном кластере для нанесения и проявления фоторезиста и антиотражающего покрытия, благодаря чему повышается производительность процесса и появляется возможность оптимизации различных этапов процесса. В ранних работах исследование процесса ДЛ с использованием антиспейсера проводилась для стандартных фоторезистов с задействованием новых тяжело разрабатываемых материалов, в связи с чем данный метод широко не распространялся [10].

В настоящее время широко исследованы ПХУ-резисты [11], активно ведутся экспериментальные работы по импортозамещению такого типа фоторезистов в России [12], в связи с чем исследование ДЛ с антиспейсером и ПХУ-резистом становится актуальной задачей. Кроме того, предложенный технологический маршрут может быть совместим с различными позитивными резистами с химическим усилением, что продемонстрировано в работе [13], поскольку изменение растворимости в таких резисторах происходит за счёт поэтапных процессов: диффузии кислоты фотогенератора и последующего деблокирования с части функциональных групп полимерной основы.

Также критически важным является контроль и оптимизация отдельных шагов процесса ДЛ с антиспейсером. На рис. 4 приведены ключевые параметры и варианты улучшения этапов процесса ДЛ. Для контроля диффузии кислоты верхнего слоя 1 во время сушки требуется выбрать наименьшие из возможных параметров времени и температуры.

При удалении данного слоя для улучшения гладкости предлагается использовать двукратную отмывку и добавить процесс сушки.

При подборе материалов для верхнего слоя 2 необходимо тщательно следить за толщиной и скоростью вращения. Поддержание оптимальной скорости даёт наилучшую производительность при работе с выбранным материалом. Время проявления незащищенных от облучения областей в зависимости от исходных параметров процесса рекомендовано выбрать минимальным, чтобы обеспечить наилучшее значение амплитуды неровности края.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе был продемонстрирован метод двойной литографии с антиспейсером, позволяющий улучшить разрешающую способность фотолитографического процесса. Внедрение этой технологии вместо самосовмещённой литографии даёт возможность существенно повысить производительность и уменьшить сложность процесса за счёт уменьшения количества операций травления и осаждения.

Поскольку все этапы данного метода протекают на фотолитографической установке для нанесения и проявления фоторезиста и антиотражающего покрытия, возникает возможность контроля и оптимизации отдельно взятых шагов процесса. Оптимизация каждого шага способствует улучшению качества конечных структур и минимизации ошибок неровности и шероховатости краёв, что особенно важно при создании сложных микроструктур.

Кроме того, растущий интерес к ПХУ-резистам и усилия по их импортозамещению создают благоприятные условия для широкого внедрения предлагаемых технологий в России. С учетом возможностей совместимости метода с различными позитивными ПХУ-резистами, будущие исследования и разработки в этой области имеют все шансы значительно продвинуть литографию на новые горизонты и обеспечить создание более сложных устройств в отечественной полупроводниковой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красников Г.Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5–1(102). С. 13–19.
2. Ann B. Kelleher Evolution of advanced lithography and patterning in the system technology co-optimization era of Moore's law // Proc. SPIE PC12953, Optical and EUV Nanolithography XXXVII, PC1295302 (10 April 2024).



Рис. 4. Ключевые параметры для улучшения и оптимизации этапов процесса ДЛ с антиспейсером

3. *Mansfield E., Barnes B., Kline R., Vladar A., Obeng Y., Davydov A.* International roadmap for devices and systems 2023 edition metrology, International Roadmap for Devices and Systems (IRDS™), [online], https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=956664, <https://irds.ieee.org/editions/2023> (Accessed November 12, 2024);
4. *J.G. Santaclara, Rudy Peeters, Rob van Ballegoij, Sjoerd Lok, Jan van Schoot, Paul Graeupner, Peter Kuerz, Joerg Mallmann, Greet Storms, Peter Vanoppen.* The next step in Moore's law: high-NA EUV introduction at the customer // Proc. SPIE12953, Optical and EUV Nanolithography XXXVII, 129530P (10 April 2024).
5. *Крошилин И.С.* Подходы к созданию литографа для российских предприятий в условиях импортозамещения / И.С. Крошилин, С.В. Крошилин // Информационный обмен в междисциплинарных исследованиях III. Взгляд начинающих ученых: Специальный сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Липецк, 15 ноября 2023 года. — Липецк: Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского, 2023. — С. 8–12.
6. *Гущин О.П.* Некоторые аспекты самосовмещенного паттернирования в иммерсионной литографии / Г.Я. Красников, О.П. Гущин, М.В. Литаврин, Е.С. Горнев // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. — 2018. — № 1(169). — С. 42–53.
7. *Тихонова Е.Д.* Исследование процессного окна Fin-слоя в процессе самосовмещенного двойного паттернирования / Е.Д. Тихонова, Е.С. Горнев // Наноиндустрия. — 2024. — Т. 17, № S10–1(128). — С. 205–207.
8. *Тихонова Е.Д.* Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования / Е.Д. Тихонова, Е.С. Горнев // Наноиндустрия. — 2020. — Т. 13. — № S5–3(102). — С. 859–861.
9. Patent US: US2014/0054756A1, 27.02.2014. Antispacer process and semiconductor structure generated by the antispacer process // Patent US: US2014/0054756A1, 27.02.2014. / Michael Hyatt, Richard Housley, Anton de Villiers.
10. Michael Hyatt, Karen Huang, Anton DeVilliers, Mark Slezak, Zhi Liu Anti-spacer double patterning // Proc. SPIE9051, Advances in Patterning Materials and Processes XXXI, 905118 (27 March 2014).
11. *Hassaan M., Saleem U., Singh A., Haque A.J., Wang K.* Recent Advances in Positive Photoresists: Mechanisms and Fabrication. Materials 2024, 17, 2552.
12. *Литаврин М.В.* Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением / М.В. Литаврин, А.А. Шарапов, А.В. Шишлянников, Е.С. Горнев // Наноиндустрия. — 2024. — Т. 17, № S10–2(128). — С. 710–718.
13. *Michael Murphy, Jacob Dobson, Jodi Grzeskowiak, David Power, Charlotte A. Cutler, Andrew Weloth, David Conklin* Breaching high-NA EUV dimensions with 193i anti-spacer multipatterning // Proc. SPIE12957, Advances in Patterning Materials and Processes XLI, 1295711 (10 April 2024).

INVESTIGATION OF DOUBLE PATTERNING METHOD WITH THE USAGE OF ANTISPACER

© 2025 E. D. Tikhonova*, E. S. Gornev**

JSC "MERI", Moscow, Russia

*E-mail: etikhonova@niime.ru

**E-mail: egornev@niime.ru

In this paper we review double lithography method with the usage of antispacer, which allows to form structures of critical layers with sub-193i lithographic dimensions that go beyond the single extreme ultraviolet lithography limits. We present a set of key parameters affecting the process productivity and a method for optimizing the lithographic process.

Keywords: multipatterning, self-aligned double patterning, antispacer, positive resist with chemical enhancement, EUV

REFERENCES

1. *Krasnikov G.Ya.* Potential of microelectronic technologies with topological dimensions less than 5 nm // Nanoindustry. 2020. V. 13. No. S5-1(102). P. 13–19.
2. *Kelleher A.B.* Evolution of advanced lithography and patterning in the system technology co-optimization era of Moore's law // Optical and EUV Nanolithography XXXVII. 2024. V. PC12953. P. PC1295302.

3. *Mansfield E., Barnes B., Kline R., Vladar A., Obeng Y., Davydov A.* International roadmap for devices and systems 2023 edition metrology, International Roadmap for Devices and Systems (IRDS™) // [online]. 2024. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=956664.
4. *Santaclara J. G., Peeters R., Ballegoij R., Lok S., Schoot J., Graeupner P., Kuerz P., Mallmann J., Storms G., Vannoppen P.* The next step in Moore's law: high-NA EUV introduction at the customer // Optical and EUV Nanolithography XXXVII. 2024. V. 12953. P. 129530P.
5. *Kroshilin I. S.* Approaches to the Creation of a Lithograph for Russian Enterprises in the Context of Import Substitution // Information Exchange in Interdisciplinary Research III. The View of Young Scientists: Special Collection of Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. 2023. P. 8–12.
6. *Gushchin O. P.* Some Aspects of Self-Aligned Patterning in Immersion Lithography // Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics. 2018. No. 1(169). P. 42–53.
7. *Tikhonova E. D.* Study of the Fin-layer Process Window in the Process of Self-Aligned Double Patterning // Nanoindustry. 2024. V. 17. No. S10-1(128). P. 205–207.
8. *Tikhonova E. D.* Use of Spin-on-Carbon Material to Improve the Self-Aligned Double Patterning Method // Nanoindustry. 2020. V. 13. No. S5-3(102). P. 859–861.
9. *Hyatt M., Housley R., Villiers A.* Antispacer process and semiconductor structure generated by the anti-spacer process // Patent US: US 2014/0054756A1. 02/27/2014.
10. *Hyatt M., Huang K., DeVilliers A., Slezak M., Liu Z.* Anti-spacer double patterning // Advances in Patterning Materials and Processes XXXI. 2014. V. 9051. P. 905118.
11. *Hassaan M., Saleem U., Singh A., Haque A. J., Wang K.* Recent Advances in Positive Photoresists: Mechanisms and Fabrication // Materials. 2024. V. 17. P. 2552.
12. *Litavrin M. V.* Extraction of empirical constants of exposure and post-exposure drying for chemically enhanced photoresists // Nanoindustry. 2024. V. 17. No. S10-2(128). P. 710–718.
13. *Murphy M., Dobson J., Grzeskowiak J., Power D., Cutler C. A., Weloth A., Conklin D.* Breaching high-NA EUV dimensions with 193i anti-spacer multipatterning // Advances in Patterning Materials and Processes XLI. 2024. V. 12957. P. 1295711.