
ЛИТОГРАФИЯ

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*i*-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, работящей 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 задействия 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-1нм диапазона с задействием

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 длинной 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.

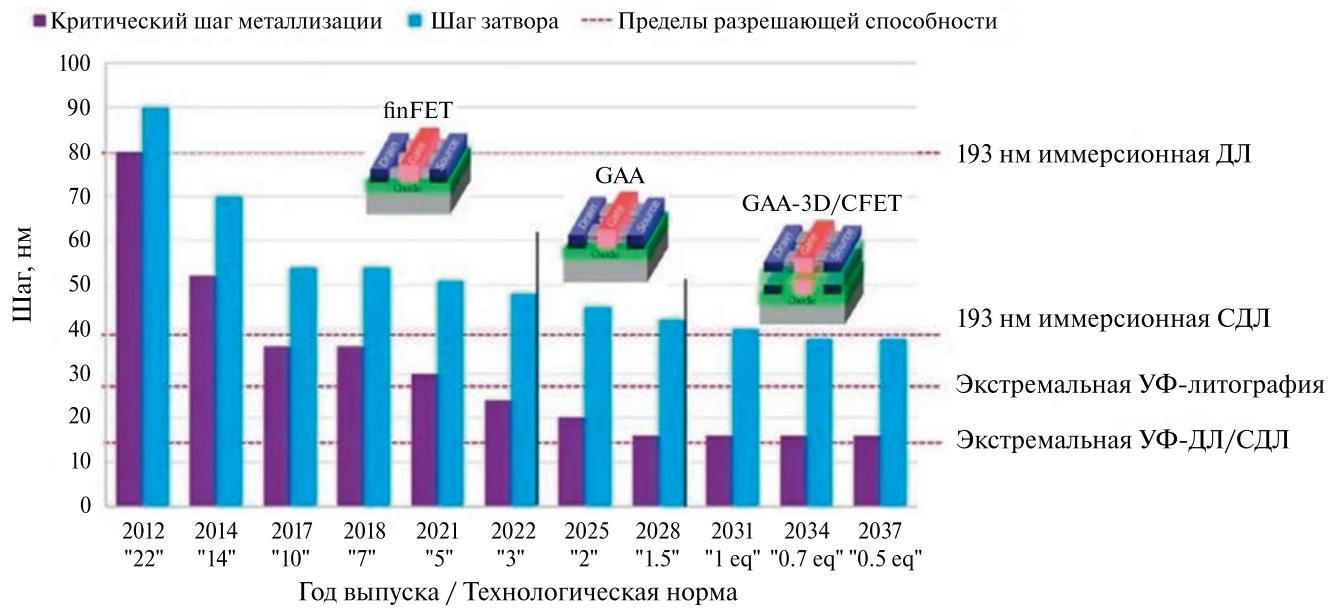


Рис. 1. Дорожная карта развития литографического техпроцесса в зависимости от критических шагов: металлизации и затвора [3]

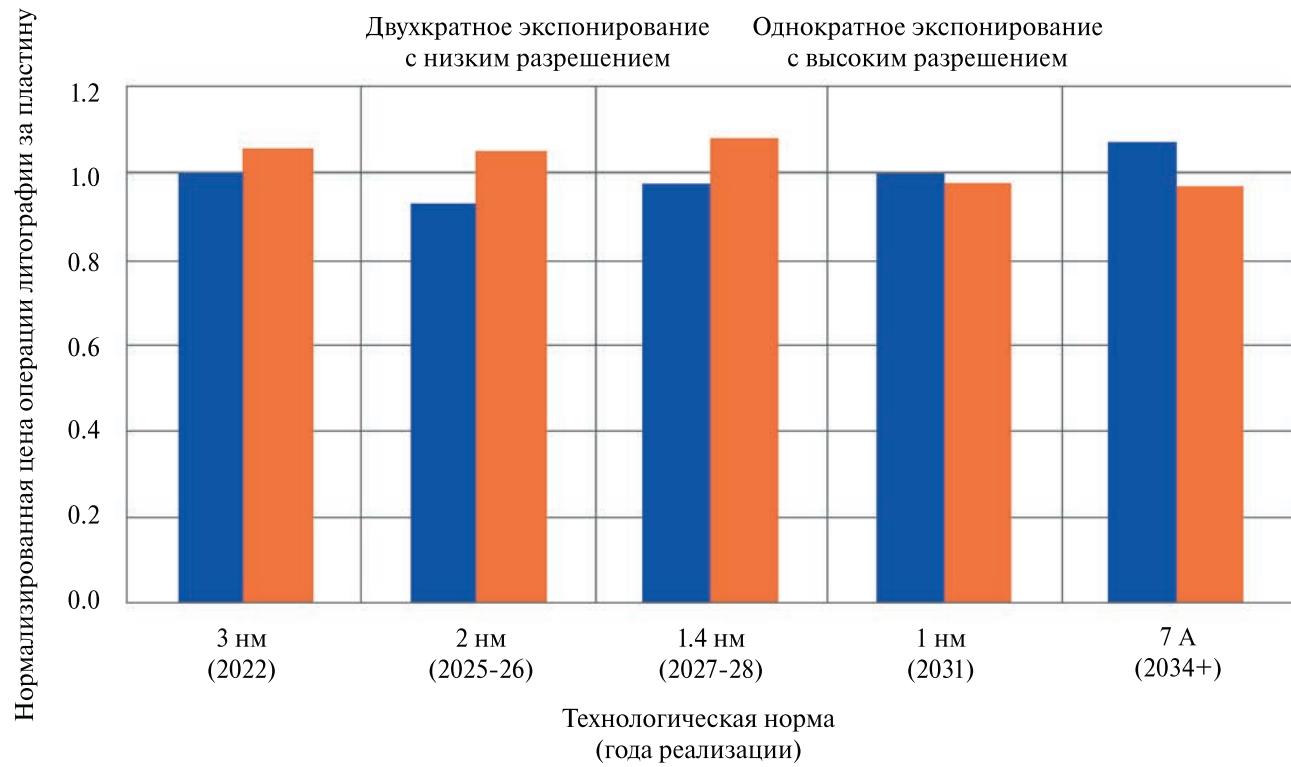


Рис. 2. Сравнение нормализованной цены операции литографии за пластину в зависимости от технологической нормы [4]

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 слоев, 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 литографии 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.

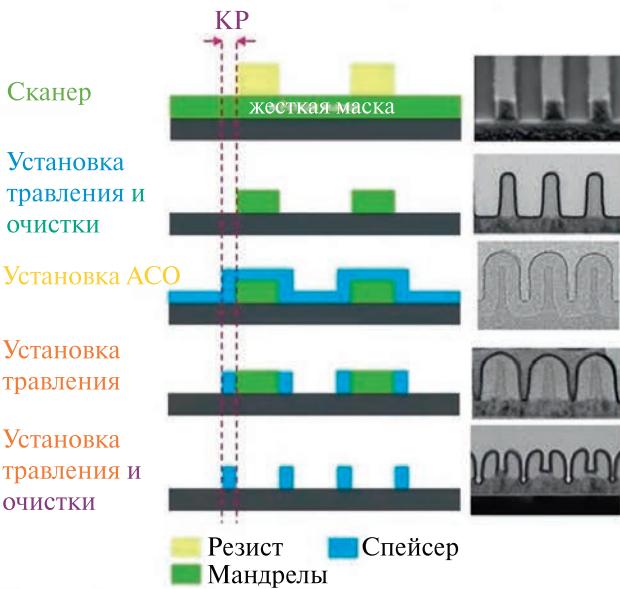
Процессы АСО и травления спейсера должны быть жёстко контролируемыми, поскольку в реаль-

ных условиям 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 про-диффундированных областей. Таким образом создаются 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

Традиционный маршрут СДЛ со спейсером



Маршрут ДЛ с антиспейсером

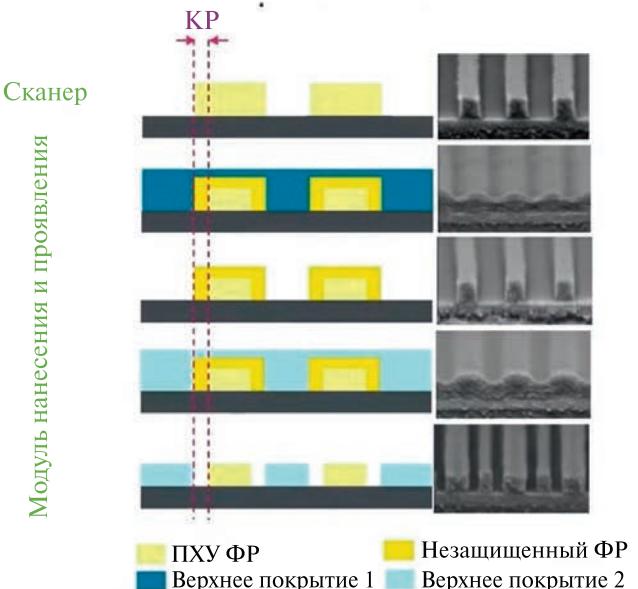


Рис. 3. Технологические маршруты методов: самосовмещённой двойной литографии (СДЛ) с использованием спейсера (слева) и двойной литографии (ДЛ) с использованием антиспейсера (справа) [7, 9]

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 воздействием 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.



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

При удалении данного слоя для улучшения гладкости предлагается использовать двукратную отмычку 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).

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. Pattent US: US2014/0054756A1, 27.02.2014. Antispacer process and semiconductor structure generated by the antispacer process // Pattent 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 усиливением / 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. Santaclaraj. G., Peeters R., Ballegoij R., Lok S., Schoot J., Graeupner P., Kuerz P., Mallmann J., Storms G., Vanoppen 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.