

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЛИТОГРАФИИ В ГЛУБОКОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

Д.А. Баклыков

dima301096@mail.ru

SPIN-код: 7531-2920

М.И. Громов

advokatad@yandex.ru

SPIN-код: 8969-5330

Р.А. Тащев

tashev.roman@yandex.ru

SPIN-код: 5175-1701

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод фотолитографии в глубоком ультрафиолете, являющийся одним из самых перспективных на данный момент. Показаны основные преимущества и недостатки данного метода, характерные материалы фоторезистов и оптической системы. Подробно описана система передачи изображения на подложку с выделением функции каждого покрытия, используемого в ней. Приведена конструкция установки для воспроизведения метода фотолитографии в глубоком ультрафиолете, а также подробно рассмотрены отдельные компоненты системы с выделением требований к каждому из них. Показаны современные области применения метода и его производственные ограничения.

Ключевые слова

Фотолитография в глубоком ультрафиолете, числовая апертура, критерий Рэлея, капельный источник плазмы, высокотемпературная плазма, многослойная оптическая система, фотошаблон, фоторезист

Поступила в редакцию 24.09.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Полупроводниковые интегральные схемы (ИС), широко распространенные в различных электронных устройствах, изготавливают с применением различных методов литографии. Уменьшение длины волны экспонирования в литографии является эффективным методом улучшения качества изображения [1].

Метод фотолитографии в глубоком ультрафиолете (англ. EUVL — Extreme Ultraviolet Lithography) представляет собой технологию, при которой используется излучение на длине волны около 13,5 нм для передачи рисунка от отражающей маски на подложку со светочувствительным материалом, называемым фоторезистом [2].

Одним из движущих факторов для активного внедрения EUVL в производство является высокая разрешающая способность, которая описывается фундаментальным отношением, называемым критерием Рэлея [1]:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{N_A}, \quad (*)$$

где λ — оптическая длина излучения; N_A — числовая апертура проекционной системы.

Параметр k_1 определяют эмпирическим путем. Он зависит от технологии производства. На основе критерия Рэля (*) можно сделать вывод, что при уменьшении длины волны экспонирования и изготовлении оптической системы с высокой числовой апертурой возможен переход к более низким топологическим нормам.

В связи с тем, что в EUV-литографии длина волны излучения равна примерно 13,5 нм, оно легко поглощается. Таким образом, процесс литографии должен осуществляться при условии высокого вакуума и с использованием специальных отражающих материалов в оптической системе, в отличие от обычной литографии, где активно используют преломление лучей. Рассмотрим основные конструктивные элементы установки для реализации данного метода.

Источник излучения. Для генерации мощного излучения на длине волны 13,5 нм при фотолитографии в глубоком ультрафиолете применяют высокотемпературную плазму (с энергией около 30 эВ) «топливного материала». Для высокопроизводительного производственного процесса в качестве «топлива» используют такие материалы, как ксенон, олово и литий. Генерация плазмы осуществляется посредством электрического импульса (англ. DPP — Discharge produced plasma) или интенсивного лазерного излучения (англ. LPP — Laser produced plasma) [3].

В настоящее время олово является ведущим целевым «топливом» для высокопроизводительных источников из-за более эффективного преобразования частоты лазерного излучения (англ. Conversion efficiency (CE) — КПД преобразования) по сравнению с ксеноном и литием. Параметр CE представляет собой отношение генерируемой энергии источника плазмы (олова) на длине волны 13,5 нм к подводимой энергии источника плазмы (лазеру). Схема источника излучения представлена на рис. 1.

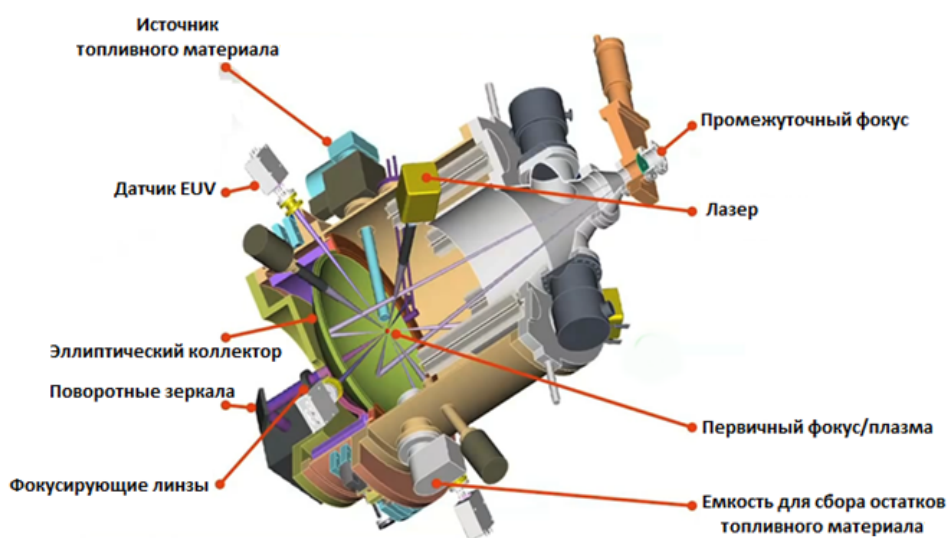


Рис. 1. Схематичное изображение источника излучения системы EUVL [3]

Для фокусировки излучения применяют специальную оптическую систему, представляющую собой эллиптический коллектор. Точку, в которой свет фокусируется, называется промежуточным фокусом (*англ.* IF — Intermediate focus) и соединяет модульный источник-коллектор с системой проекционных зеркал EUVL-сканера. Только часть излучения от источника передается на IF из-за геометрических ограничений в конструкции коллектора, эффективности отражающей системы коллектора и поглощения остаточными газами [4, 5].

Основными характеристиками источника являются пропускная способность, стоимость владения и качество изображения. Например, для производства большого объема изделий в 100 пластин/ч необходимо обеспечить мощность в 115...180 Вт в зависимости от чувствительности фоторезиста. Также необходимо реализовать энергетическую стабильность и надежность работы.

Оптическая система. Оптическая система EUVL включает отражающую поверхность, используемую для эффективной передачи света на фотошаблон, и отражающую проекционную оптику для воспроизведения топологии на фоторезисте [6]. Светоотражающая оптика состоит из повторяющихся двухслойных пар, которые предназначены для создания многослойного зеркального материала.

Двухслойный стек в многослойной системе, отражающий EUV-излучение, состоит из металла (материал с высоким атомным числом Z) и спейсера (материал с низким Z). Исторически сложилось, что наиболее часто используют системы Mo/Be и Mo/Si, поскольку они демонстрируют наилучшие показатели отражающей способности на длинах волн в диапазоне 11,3...11,6 и 13,3...13,6 нм соответственно. Типичное количество слоев, например, для системы Mo/Si равно 40. Данный вид зеркал показал максимальную отражающую способность в 70 % при длине волны 13,5 нм. Качество многослойного покрытия зависит в первую очередь от метода осаждения и определяет отражательную способность зеркал. Самым распространенным методом формирования данного рода покрытий является магнетронное распыление благодаря его относительно высоким скоростям распыления, воспроизводимости процессов, а также способности покрывать большие площади. Схематичное изображение оптической системы представлено на рис. 2.

Такие загрязнения, как углеводороды и вода, при попадании на них фотонов приводят к окислению или загрязнению поверхности, что вызывает потерю отражающей способности. Молекулярное загрязнение поверхности в первую очередь связывают с разрушением адсорбированных молекул на поверхности зеркала вторичными электронами. Небольшое образование (менее 1,5 нм) окси-

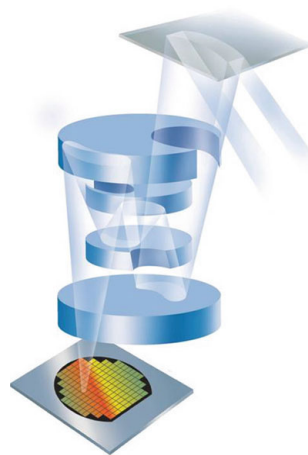


Рис. 2. Схематичное изображение оптической системы EUVL [1]

дной пленки на поверхности этих многослойных зеркал приводит к потере отражающей способности больше, чем на 1 %, что неприемлемо. Такое загрязнение оптики уменьшает пропускную способность экспонирующего инструмента и равномерность передачи изображения. Одним из способов для сокращения загрязнений является использование защитных покрытий, таких как рутений, которые устойчивы к окислению, улучшение условий вакуума и использование методов очистки от углеродных и кислородных образований на поверхности оптики без ее повреждения [7].

Фотошаблон. Фотошаблон для EUV-литографии, который содержит требуемую топологию для воспроизведения на пластине, должен быть отражающим для того, чтобы избежать поглощения коротковолновой длины волны света, таким образом, это его главное отличие от обычных оптических масок. Производство фотошаблона можно разделить на два основных этапа — изготовление шаблона и формирование изображения на нем. Для изготовления заготовки для шаблона необходима плоская, жесткая и бездефектная подложка с низким коэффициентом теплового расширения материала и с минимальными искажениями. На такой подложке происходит осаждение отражающей многослойной структуры, состоящей из чередующихся слоев Mo/Si, и покрывается специальным слоем для предотвращения окисления [8]. Многослойность покрытия (40 слоев Mo/Si) обеспечивает шаблону высокую отражательную способность на длине волны 13,5 нм (рис. 3).

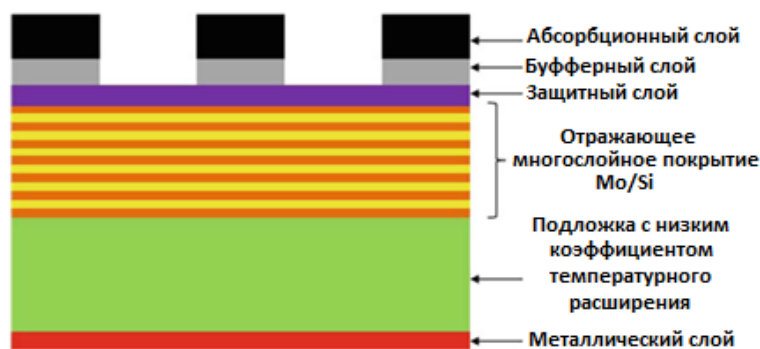


Рис. 3. Схематичное изображение структуры шаблона [1]

Слой абсорбционный эффективно поглощает падающее на него излучение. Для таких целей обычно используют нитрид тантала (TaN). Материал буферного слоя, например, SiO₂ или рутений, применяют для защиты многослойной структуры во время травления или восстановления абсорбирующего слоя. Проводящее покрытие на обратной стороне заготовки шаблона предназначено для совмещения с электростатическим патроном, который используется для закрепления и выравнивания маски в инструменте экспонирования, а также других технологических инструментов. Воспроизведение на поверхности топологии осуществляется посредством ионно-лучевой литографии и плазменного травления. Процесс литографии для EUV-шаблона аналогичен процессу для оптического шаблона, но с более жесткими ограничениями на технические характеристики.

Зачастую дефекты шаблона возникают в слое абсорбера, многослойном покрытии или на самой подложке. Поверхностные дефекты могут распространяться через многослойное покрытие и вызывать фазовый дефект, который является возмущением фронта отраженной волны. Амплитудные дефекты могут быть вызваны частицами в верхней части отражающего покрытия и непосредственно «в теле». К другому типу явных дефектов можно отнести отсутствие в нужном месте слоя абсорбера или присутствие (дефект непрозрачности) там, где его быть не должно. Чтобы избежать дефектов на рабочей пластине, шаблон EUV должен проходить без дефектов в процессе производства и оставаться таким в процессе работы. Необходима надежная и точная проверки шаблона для оценки дефектности на всех этапах его производства.

Фоторезист. В EUV-литографии механизм взаимодействия излучения отличается от экспонирования по технологии с длинами волн 248 и 193 нм. Высокая энергия фотона (92 эВ) ионизирует компоненты фоторезиста, генерируя вторичные электроны, которые способствуют нежелательным химическим реакциям в процессе экспонирования. Таким образом, фоторезисты не могут использоваться в данном методе, поскольку имеют слишком высокую чувствительность и будут разрушаться в процессе экспонирования. Путем регулирования концентрации элементов в резисте, отвечающих за переструктурирование в процессе экспонирования (фотокислот), удается достичь оптимального коэффициента поглощения [9].

Свойства резистов зависят от генератора фотокислот (*англ.* photoacid generator — PAG) и полимера, который используется в составе. Все это влияет на характеристики разрешения, шероховатости края линии и чувствительности.

Чувствительность для резиста в EUV-литографии определяется еще мощностью источника. Одной из проблем использования фоторезистов EUV в вакуумной среде является выделение гидроуглеродных загрязнений, которые содержатся в полимере (рис. 4), во время экспонирования, что уменьшает время жизни оптики. Общая схема EUV-литографии представлена на рис. 5.

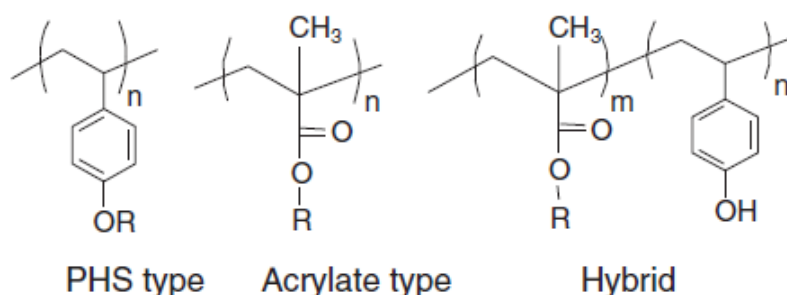


Рис. 4. Основные полимеры, используемые в EUVL [9]

Современное состояние метода. В настоящее время метод литографии в глубоком ультрафиолете позволяет обеспечивать производство топологий минимальных размеров. Так, компания Samsung Electronics использует его для по-

лучения оперативной памяти на основе полупроводниковых материалов или, так называемая, статическая память с произвольным доступом (*англ.* SRAM — Static random access memory) с размерами элементов 7 нм [10]. Кроме того, компания Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) также активно использует эту технологию для производства 7 нм чипов.

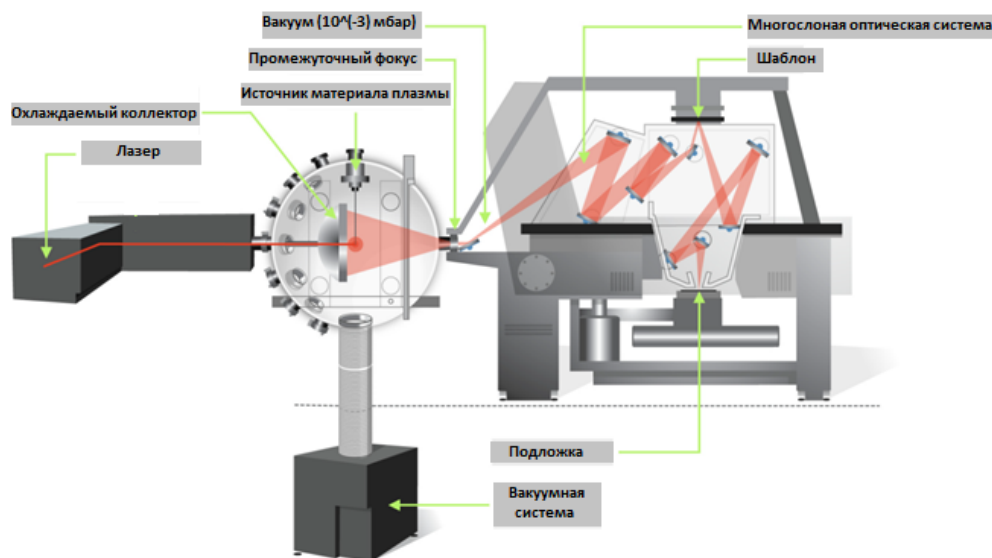


Рис. 5. Схематичное изображение системы EUVL [3]

Повышение разрешающей способности метода также связано со снижением числовой апертуры (согласно уравнению (*)). Так, используя прогрессивную системную архитектуру, удалось достичь значения $N_A = 0,33$, что является важным для перехода на массовое производство [11]. Однако покорению более тонких техпроцессов начинают мешать не только производственные ограничения, но и законы физики.

Заключение. На основании анализа литературных источников было установлено, что метод литографии в глубоком ультрафиолете является одним из самых перспективных благодаря высокой разрешающей способности и уже на сегодняшний день позволяет осуществлять производство 7 нм топологических норм. Однако массовое использование данного метода ограничено не только его стоимостью и трудоемкостью реализации, но и физическими явлениями, которые возникают при размерах, близких к атомному.

Литература

- [1] Mbanaso Ch., Denbeaux G. EUV lithography. College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, Albany, NY, USA.
- [2] Pirati A., Peeters R., Smith D. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9776. DOI: 10.1117/12.2220423 URL: <https://www.spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2220423>

- [3] Abhari R.S., Rollinger B., Giovannini A.Z., et al. Laser-produced plasma source for extreme-ultraviolet lithography applications. *J. Micro Nanolith. MEM.*, 2012, vol. 11, no. 2, art. 0211114. DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021114 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-MicroNanolithography-MEMS-and-MOEMS/volume-11/issue-2/021114/Laser-produced-plasma-light-source-for-extreme-ultraviolet-lithography-applications/10.1117/1.JMM.11.2.021114.short?SSO=1>
- [4] Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., et al. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling. *Adv. Opt. Technol.*, 2017, vol. 6, no. 3-4, pp. 173–186. DOI: 10.1515/aot-2017-0029 URL: <https://www.degruyter.com/view/j/aot.2017.6.issue-3-4/aot-2017-0029/aot-2017-0029.xml>
- [5] Mizoguchi H., Nakarai H., Abe T., et al. Nowak high power LPP-EUV source with long collector mirror lifetime for high volume semiconductor manufacturing. Gigaphoton Inc. Shinomiya Hiratsuka Kanagawa, 2017.
- [6] Canova F., Poletto L. Optical technologies for extreme-ultraviolet and soft X-ray coherent sources. Springer, 2015.
- [7] Dolgov A. Plasma-assisted cleaning of extreme UV optics. PhD Thesis. University of Twente, Netherlands.
- [8] Hellweg D., Perlitz S., Magnusson K., et al. Actinic review of EUV masks: performance data and status of the AIMS EUV system. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10143. DOI: 10.1117/12.2261662 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10143/101430J/Actinic-review-of-EUV-masks--performance-data-and-status/10.1117/12.2261662.short>
- [9] Itani T., Kozawa T. Resist materials and processes for extreme ultraviolet lithography. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 52, no. 1R, art. 010002. DOI: 10.7567/JJAP.52.010002 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.52.010002>
- [10] Song T., Jung J.H., Rim W.J., et al. A 7nm FinFET SRAM using EUV lithography with dual write-driver-assist circuitry for low-voltage applications. *ISSCC*, 2018, pp. 106–108. DOI: 10.1109/ISSCC.2018.8310252 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8310252>
- [11] Pirati A., van Schoot J., Troost K., et al. The future of EUV lithography: enabling Moore's law in the next decade. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10143. DOI: 10.1117/12.2261079 URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2261079?SSO=1>

Баклыков Дмитрий Алексеевич — студент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Громов Михаил Иванович — студент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Тащев Роман Александрович — студент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Цветков Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Баклыков Д.А., Громов М.И., Тащев Р.А. Особенности фотолитографии в глубоком ультрафиолете. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-535>

FEATURES OF PHOTOLITHOGRAPHY IN A DEEP UV

D.A. Baklykov

dima301096@mail.ru

SPIN-code: 7531-2920

M.I. Gromov

advokatad@yandex.ru

SPIN-code: 8969-5330

R.A. Tashchev

tashev.roman@yandex.ru

SPIN-code: 5175-1701

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The main sources of errors of coordinate information of strapdown inertial navigation systems (SINS) are considered. The requirements to the errors and instabilities of laser gyroscopes as primary information sensors of SINS of the 1-3rd accuracy class are analyzed. An algorithm for selecting laser gyroscopes for precision navigation measuring systems is proposed taking into account the design and accuracy characteristics of a specific laser gyroscope. This approach was tested during experimental studies of the GL-2D device. The test results confirmed the possibility of using GL-2D in the development of SINS of the 2nd accuracy class for solving precision navigation problems by land and aviation objects.

Keywords

Laser gyroscope, angular velocity, information, errors, navigation, strapdown inertial navigation system (SINS), gyrocompassing, testing

Received 24.09.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Mbanaso Ch., Denbeaux G. EUV lithography. College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, Albany, NY, USA.
- [2] Pirati A., Peeters R., Smith D. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9776. DOI: 10.1117/12.2220423 URL: <https://www.spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2220423>
- [3] Abhari R.S., Rollinger B., Giovannini A.Z., et al. Laser-produced plasma source for extreme-ultraviolet lithography applications. *J. Micro Nanolith. MEM.*, 2012, vol. 11, no. 2, art. 0211114. DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021114 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-MicroNanolithography-MEMS-and-MOEMS/volume-11/issue-2/021114/Laser-produced-plasma-light-source-for-extreme-ultraviolet-lithography-applications/10.1117/1.JMM.11.2.021114.short?SSO=1>
- [4] Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., et al. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling. *Adv. Opt. Technol.*, 2017, vol. 6, no. 3-4, pp. 173-186. DOI: 10.1515/aot-2017-0029 URL: <https://www.degruyter.com/view/j/aot.2017.6.issue-3-4/aot-2017-0029/aot-2017-0029.xml>
- [5] Mizoguchi H., Nakarai H., Abe T., et al. Nowak high power LPP-EUV source with long collector mirror lifetime for high volume semiconductor manufacturing. Gigaphoton Inc. Shinomiya Hiratsuka Kanagawa, 2017.

- [6] Canova F., Poletto L. Optical technologies for extreme-ultraviolet and soft X-ray coherent sources. Springer, 2015.
- [7] Dolgov A. Plasma-assisted cleaning of extreme UV optics. PhD Thesis. University of Twente, Netherlands.
- [8] Hellweg D., Perlitz S., Magnusson K., et al. Actinic review of EUV masks: performance data and status of the AIMS EUV system. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10143. DOI: 10.1117/12.2261662 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10143/101430J/Actinic-review-of-EUV-masks--performance-data-and-status/10.1117/12.2261662.short>
- [9] Itani T., Kozawa T. Resist materials and processes for extreme ultraviolet lithography. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 52, no. 1R, art. 010002. DOI: 10.7567/JJAP.52.010002 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.52.010002>
- [10] Song T., Jung J.H., Rim W.J., et al. A 7nm FinFET SRAM using EUV lithography with dual write-driver-assist circuitry for low-voltage applications. *ISSCC*, 2018, pp. 106–108. DOI: 10.1109/ISSCC.2018.8310252 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8310252>
- [11] Pirati A., van Schoot J., Troost K., et al. The future of EUV lithography: enabling Moore's law in the next decade. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10143. DOI: 10.1117/12.2261079 URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2261079?SSO=1>

Baklykov D.A. — Student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Gromov M.I. — Student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Tashev R.A. — Student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Tsvetkov Yu.B., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Baklykov D.A., Gromov M.I., Tashchev R.A. Features of photolithography in a deep uv. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-535.html> (in Russ.).