



УДК 535.317

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА «ИМИТАЦИИ ОТЖИГА» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ОСВЕЩЕНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Т.В. Иванова<sup>а</sup>, А.В. Жадин<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: alexsander\_zhadin@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 29.11.16, принята к печати 25.01.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-242-248

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Иванова Т.В., Жадин А.В. Использование алгоритма «имитации отжига» для оптимизации параметров источника освещения фотолитографической установки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 242–248. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-242-248

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены методы повышения разрешающей способности, стабильности и повторяемости фотолитографического процесса с применением источника освещения сложной формы. Показаны пути оптимизации формы источника освещения фотолитографической установки для использования с конкретными масками или группами масок. **Методы.** Для оптимизации «имитации отжига» применен стохастический алгоритм для периодических масок с различным периодом. В качестве оценочных функций оптимизации использованы контраст периодических масок с различным периодом (включая «запрещенный»), а также площадь эллиптического окна процессов фотолитографической установки. Исследования выполнены с использованием программы Sentauros Lithography (Synopsys Inc). **Основные результаты.** В качестве примера показан процесс оптимизации масок с периодом 150–300 нм при длине волны 193 нм и апертуре оптической системы 0,93. Рассмотрен случай работы алгоритма оптимизации при добавлении различных значений расфокусировки и дозы экспозиции. Показано, что предложенный способ оптимизации формы источника освещения позволяет повысить контраст для масок различного периода, а также площадь окна процессов фотолитографической установки. Исследование сходимости алгоритма показало, что для оптимизации источника с заданной маской периодом 600–800 нм достаточно 100 итераций, а дальнейшее увеличение количества итераций не приводит к увеличению контраста. **Практическая значимость.** Предложенный алгоритм может быть использован в качестве замены более сложным алгоритмам оптимизации источника с целью уменьшения минимального размера элемента и повышения стабильности процесса. Алгоритм обладает высокой сходимостью.

### Ключевые слова

фотолитография, источник освещения сложной формы, оптимизация источника освещения, алгоритм «имитации отжига», окно процессов фотолитографической установки

## "SIMULATED ANNEALING" ALGORITHM FOR LIGHT SOURCE PARAMETRIC OPTIMIZATION IN PHOTOLITHOGRAPHY

T.V. Ivanova<sup>а</sup>, A.V. Zhadin<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: itv-aco@yandex.ru

### Article info

Received 29.11.16, accepted 25.01.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-242-248

Article in Russian

**For citation:** Ivanova T.V., Zhadin A.V. "Simulated annealing" algorithm for light source parametric optimization in photolithography. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 242–248 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-242-248

### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with methods of resolution enhancement, as well as stability and repeatability of photolithographic process with the use of complex shape light source. Possibilities of source shape optimization to be used with specific patterns or pattern groups are shown. **Methods.** We applied "Simulated annealing" stochastic algorithm for source optimization for periodic patterns with a various pitch. The periodic patterns contrast with a various pitch (including

"forbidden" pitch) was used as a merit function, as well as the area of elliptical process window for photolithographic setup. Research was carried out with the aid of Sentaurus Lithography program (Synopsys Inc). **Main Results.** Optimization of periodic patterns with 150-300 nm pitch, 193 nm wavelength and optical system numerical aperture equal to 0.93 is shown as an example. The case of optimization algorithm with focus-expose matrix is considered. It is shown, that proposed source optimization with the use of the algorithm allows increasing image contrast for various pitches, as well as the area of process window for photolithographic setup. The convergence study shows that 100 iterations are enough for the source optimization for 600-800 nm mask pitch and further increasing of iteration number has no impact to the contrast. **Practical Relevance.** The studied algorithm can be used as a replacement for more complex algorithms of source optimization for reducing the minimum element size and the process stability enhancement. The algorithm has high convergence.

#### Keywords

photolithography, complex shape light source, light source optimization, "simulated annealing" algorithm, process window for photolithographic setup

### Введение

Основной этап процесса производства полупроводниковых микросхем – литография, т.е. процесс переноса топографической картины шаблона на поверхность полупроводниковой пластины. Существуют различные технологии литографии, но в серийном производстве в основном используется оптическая литография – фотолитография. Именно процесс фотолитографии определяет минимальный размер элементов на полупроводниковом кристалле, степень интеграции микросхем, а значит, ее размеры и быстрейшее действие при эксплуатации.

Главной характеристикой фотолитографической установки является разрешение, т.е. минимальный размер элементов, которые эта установка позволяет перенести на поверхность полупроводниковой пластины. Разрешение можно оценить по формуле [1]

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA},$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от технологии процесса (0,25–1 в зависимости от технологии),  $NA$  – числовая апертура объектива,  $\lambda$  – длина волны.

Уменьшение минимального размера элемента возможно за счет увеличения апертуры, уменьшения длины волны, уменьшения коэффициента  $k_1$ .

Кроме того, существуют и другие характеристики фотолитографического процесса, от которых зависят производительность, качество и надежность всего полупроводникового производства [1]. Одной из таких характеристик является размер окна процессов фотолитографической установки, который определяет диапазон допустимых значений экспозиционной дозы и расфокусировки, при которых размер минимального элемента находится в пределах допустимой погрешности, а технологический процесс является стабильным и повторяемым.

На сегодняшний момент увеличение апертуры и уменьшение длины волны подошли к технологическому пределу. В данный момент удается достичь апертуры фотолитографического объектива 0,95 без иммерсии, использование иммерсии позволяет добиться апертуры 1,35.

В настоящий момент в фотолитографии чаще всего используется эксимерный лазер ArF (длина волны 193 нм). Для источников излучения с меньшей длиной волны возникают сложности с выбором оптических сред для оптической системы.

Исходя из этого, одним из актуальных направлений сегодняшней оптической литографии является использование различных способов уменьшения минимального размера элемента при неизменной длине волны и числовой апертуре. Таким способом может быть использование внеосевого освещения с источниками в виде кольца, квадруполь или более сложной формы, применение специально разработанных масок (с фазовыми элементами или дополнительными элементами), а также совместная оптимизация параметров источника и маски [1].

Фазосдвигающие маски (Phase-shift mask, PSM) [2] за счет разности фаз у различных элементов маски позволяют повысить контраст на изображении. Тем самым происходит более точная передача формы и размеров элементов маски. Использование фазосдвигающих масок позволяет не только повысить разрешающую способность, но и увеличить окно процесса.

Метод коррекции оптической близости (Optical Proximity Correction, OPC) [3] за счет добавления на маску дополнительных элементов позволяет более точно воспроизвести исходный вид фотошаблона. При проекции элементов с размерами, близкими к пределу разрешения, изображение претерпевает разного рода искажения: сужение или недоэкспонирование узкой длинной линии, сокращение и округление углов на концах элементов, заплывание узких зазоров и острых углов. С такими искажениями можно бороться, создавая компенсирующие их элементы (серифы) на фотошаблоне.

Использование вспомогательных элементов на маске позволяет увеличить контраст на изображении и, таким образом, разрешающую способность. Также как и при коррекции оптической близости, цель этого метода заключается в том, чтобы все элементы маски были перенесены на кремневую подложку с минимальными искажениями. Вспомогательные элементы присутствуют только на экспонируе-

мой маске, они настолько малы, что не отображаются на кремниевой подложке, но при этом влияют на изображение основного элемента. Благодаря использованию вспомогательных элементов на маске можно существенно повысить качество полученных изображений и уменьшить размер отображаемого элемента [4].

Одним из главных факторов получения фотолитографического изображения является правильный выбор источника освещения. В фотолитографии часто используют внеосевые источники освещения, например, диполь или квадруполь, а для получения изображения на пределе разрешающей способности оптической системы используют источники более сложной формы [5–8].

Целью совместной оптимизации источника (Source Mask Optimization, SMO) и маски является уменьшение минимального размера элемента (за счет автоматического подбора параметров источника освещения для заданной маски или набора масок) с одновременной коррекцией маски (добавление серифов и вспомогательных элементов). Этот метод является комбинацией рассмотренных выше методов внеосевого освещения, коррекции оптической близости и вспомогательных элементов.

Метод совместной оптимизации источника и маски позволяет точнее формировать изображение шаблона маски на пластине, а также повысить стабильность процесса литографии [9, 10].

В большинстве работ для совместной оптимизации источника и маски предлагаются использовать сложные алгоритмы оптимизации с множеством настроечных параметров [11]. В настоящей работе предлагается для совместной оптимизации источника и маски использовать алгоритм «имитации отжига» (Simulated Annealing). Преимуществами этого алгоритма являются быстрая сходимость к наилучшему решению и возможность гибкой настройки алгоритма под конкретную задачу в сочетании с небольшим количеством параметров оптимизации [12, 13].

#### Алгоритм нахождения оптимального источника излучения

Для моделирования формирования изображения при частично-когерентном освещении часто используется понятие «эффективный» источник [14, 15], который представляет собой распределение яркости в выходном зрачке осветительной системы. При таком моделировании он представляется как совокупность точек, каждая из которых создает полностью когерентное освещение предмета. При этом когерентные волны от каждой точки источника считаются взаимно некогерентными.

Целью оптимизации является получение «эффективного» источника, который будет давать наилучшее качество изображения для заданной маски или набора масок. В качестве оценочной функции оптимизации выбраны контраст изображения и площадь окна процессов фотолитографической установки. В данной работе оптимизация проводилась с использованием программы Sentaurs Lithography (Synopsys Inc) [16], позволяющей выполнить компьютерное моделирование всего процесса фотолитографии. Данный программный продукт обеспечивает широкий спектр возможностей. В работе использовались API-команды программы Sentaurs Lithography, которые позволяют написать собственную программу оптимизации формы источника и использовать ее в качестве подключаемого модуля.

Для нахождения оптимального источника с лучшими параметрами всей оптической системы использовался следующий алгоритм.

1. Генерация первоначального «случайного» источника и вычисление оценочной функции (контраст на изображении, площадь окна процессов, и т.д.) при помощи Sentaurs Lithography. Полученное значение оценочной функции и параметра источника запоминаются как «эталонные».
2. Цикл от 0 до  $k$ , где  $k$  – настраиваемое количество итераций:
  1. вычисление «температуры», т.е. разницы, на которую увеличивается значение интенсивности каждой точки «эффективного» источника в зависимости от номера текущей итерации;
  2. генерация нового «эффективного» источника, при этом интенсивности каждой случайной точки нового «эффективного» источника отличаются от источника, полученного на предыдущем шаге, на величину, зависящую от «температуры»;
  3. вычисление изображения и оценочной функции для сгенерированного на данном шаге источника при помощи Sentaurs Lithography;
  4. если оценочная функция на данном шаге меньше, чем у «эталонного», то параметры источника и оценочная функция запоминаются и становятся «эталонными».
3. «Эталонный» источник считается наилучшим.

Для работы предложенной программы необходим первоначальный настроечный файл программы Sentaurs Lithography, в котором находятся параметры оптической системы и параметры маски.

#### Оптимизация источника для повышения контраста изображения

Для исследования исследуемого алгоритма оптимизации были рассмотрены простейшие маски (периодическая решетка) с разными периодами (табл. 1). При этом ширина всегда задавалась равной половине периода. В примере рассматривалась оптимизация масок с периодом 150–300 нм при длине волны 193 нм и апертуре оптической системы 0,93. Целью оптимизации было добиться высокого контраста полученных изображений для всех масок с различными периодами. В этот диапазон входят такие значе-

ния периода маски, где контраст изображения существенно снижается. В фотолитографии такой период называется «запрещенным» [4, 17]. Благодаря правильной оптимизации источника удастся существенно повысить значения контраста изображений на «запрещенном» периоде. Источник освещения, полученный в результате такой оптимизации, представлен на рис. 1.

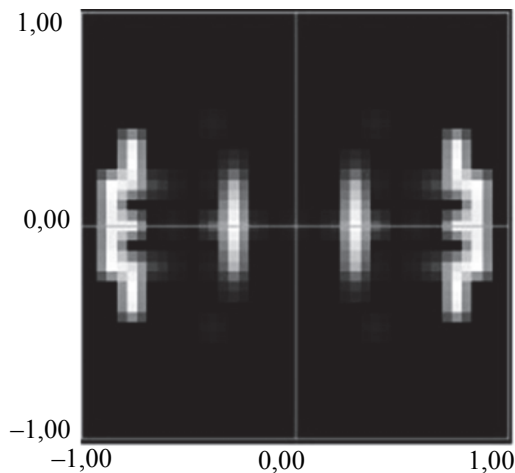


Рис. 1. Оптимизированный источник фотолитографической установки.  
Размер источника указан относительно входного зрачка оптической системы

На рис. 2 представлен график изменения контраста изображения на заданном диапазоне периода маски (150–600 нм).

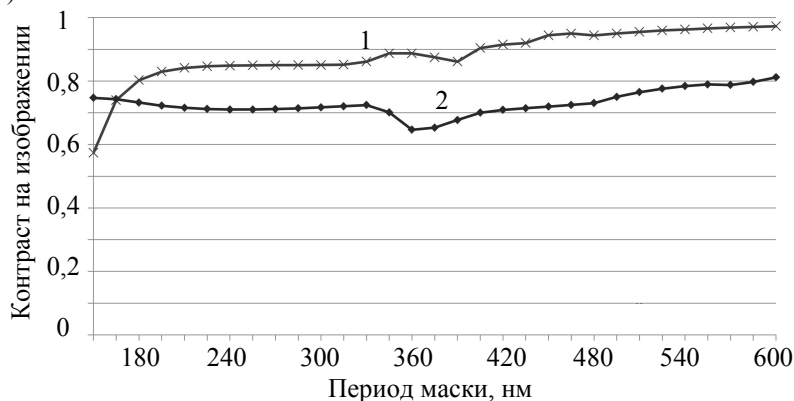


Рис. 2. Зависимость контраста изображений от периода маски  
1 — результат оптимизации 2 — исходный источник

С помощью оптимизации источника удалось существенно повысить контраст изображений, в том числе на участке с «запрещенными» периодами (360 нм). Но при этом, как видно на рис. 2, происходит также существенное снижение контраста при самых маленьких периодах. Проблема решается за счет модификации алгоритма и задания весовых коэффициентов для масок различных периодов. Таким образом, можно определить приоритеты для алгоритма оптимизации под каждую конкретную задачу.

Периоды масок, нм	Средние значения контраста до оптимизации	Средние значения контраста после оптимизации	Увеличение контраста
150–300	0,722	0,794	10%
600–800	0,896	0,998	11%
150–600	0,730	0,884	21%

Таблица 1. Контраст изображений до и после оптимизации для различных групп маски

#### Оптимизация источника для увеличения площади окна процессов

Отдельно рассматривался случай работы алгоритма оптимизации при добавлении различных значений расфокусировки и дозы экспозиции. Целью этого исследования являлось получение окна процессов с наибольшей площадью. В качестве оптимизируемого параметра была выбрана площадь эллиптического окна процессов.

Полученный в результате оптимизации источник представлен на рис. 3.

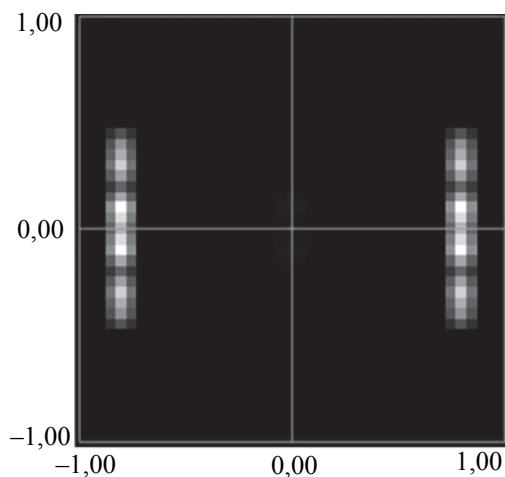


Рис. 3. Оптимизированный источник фотолитографической установки.  
Размер источника указан относительно входного зрачка оптической системы

На рис. 4 представлено окно процессов для первоначального источника, а на рис. 5 – для источника, полученного в результате оптимизации. Пунктирной линией показаны значения расфокусировки и порога интенсивности, соответствующие номинальному значению ширины линии, серая область – участки, соответствующие номинальному значению ширины линии с погрешностью 10%.

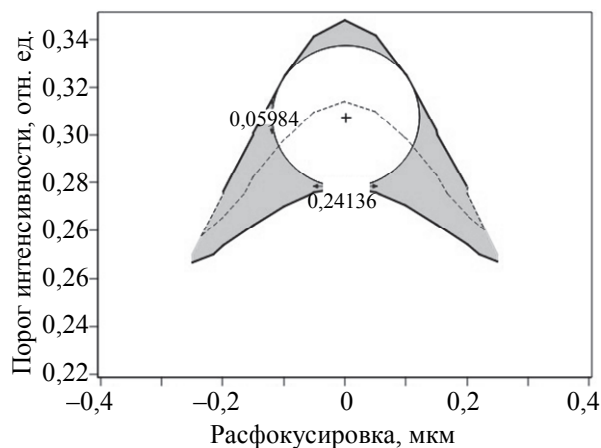


Рис. 4. Окно процессов для исходного источника. Площадь эллипса 0,011 мкм

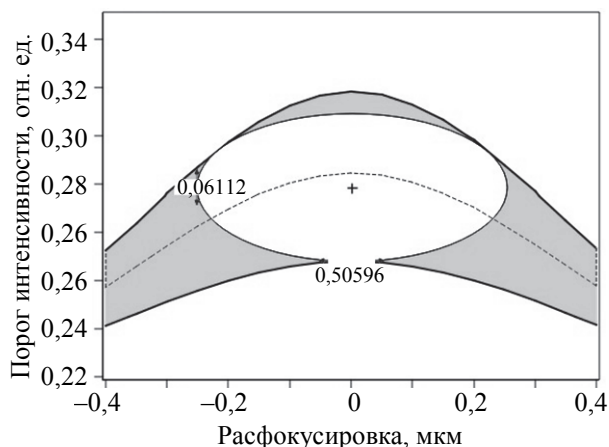


Рис. 5. Окно процессов после оптимизации. Площадь эллипса 0,024 мкм

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что оптимизация исследуемым алгоритмом позволяет увеличить площадь окна процессов более чем в два раза.

### Оценка сходимости алгоритма

Сходимость алгоритмов оптимизации рассматривалась на масках с периодом 600–800 нм (табл. 2). Для оптимизации источника с заданной маской периодом 600–800 нм достаточно 100 итераций. При дальнейшем увеличении количества итераций увеличения контраста не происходит. Для сравнения: в алгоритме «Harmony Search» обычно по умолчанию используется 10000 шагов.

Количество итераций алгоритма	Среднее значение контраста до оптимизации	Среднее значение контраста после оптимизации	Увеличение контраста
10	0,885	0,960	8%
50		0,975	10%
100		0,991	12%
500		0,991	12%

Таблица 2. Сходимость алгоритма оптимизации

### Заключение

Таким образом, в работе предлагается использовать алгоритм «имитации отжига» для оптимизации формы источника фотолитографической установки. В работе показано, что оптимизация источника при помощи данного алгоритма позволяет повысить контраст для масок различного периода, включая «запрещенный» период, а также площадь окна процессов фотолитографической установки. Все это подтверждает, что предлагаемый алгоритм может быть использован в качестве замены более сложным алгоритмам оптимизации источника с целью уменьшения минимального размера элемента и повышения стабильности процесса. Алгоритм имеет высокую сходимость, а значит, и высокую скорость, что позволит получать результаты оптимизации быстрее, чем с использованием более сложных алгоритмов.

### Литература

- Mack C.A. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. Bellingham, USA: Wiley, 2008. 534 p.
- Levenson M.D., Viswanathan N.S., Simpson R.A. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1982. V. 29. N 12. P. 1828–1836. doi: 10.1109/T-ED.1982.21037
- De Bisschop P. How to make lithography patterns print: the role of OPC and pattern layout // *Advanced Optical Technologies*. 2015. V. 4. N 4. P. 253–284. doi: 10.1515/aot-2015-0023
- Shi X., Hsu S., Chen F., Hsu M., Socha R.J. Dusa M. Understanding the forbidden pitch phenomenon and assist feature placement // *Proceedings of SPIE*. 2002. V. 4689. P. 985–996. doi: 10.1117/12.473427
- Moh L.L., Gek S.C., Qunying L., Cho J.T., Chenggen Q. Customized illumination shapes for 193nm immersion lithography. *SPIE Advanced Lithography // Proceedings of SPIE*. 2008. V. 6924. Art. 692435. doi: 10.1117/12.772441
- Leonard J., Carriere, J., Stack, J., Jones, R., Himel, M., Childers, J., Welch, K. An improved process for manufacturing diffractive optical elements (DOEs) for off-axis illumination systems // *Proceedings of SPIE*. 2008. V. 6924. Art. 692420. doi: 10.1117/12.774666
- Bekaert J., Van Look L., D’have K., Laenens B., Vandenberghe G., van Adrichem P., Shao W., Ghan J., Schreel K., Neumann J.T. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7973. Art. 79731I. doi: 10.1117/12.881607
- Mulder M., Engelen A., Noordman O., Streutker G., van Driehuisen B. et. al. Performance of FlexRay: a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems // *Proceedings of SPIE*. 2010. V. 7640. Art. 845984. doi: 10.1117/12.845984
- Granik Y. Source optimization for image fidelity and throughput // *Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems*. 2004. V. 3. N 4. P. 509–522. doi: 10.1117/1.1794708
- Socha R., Shi X., LeHoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO) // *Proceedings of SPIE*. 2005. V. 5853 part I. P. 180–193. doi: 10.1117/12.617431
- Rosenbluth A.E., Melville D.O., Tian K., Bagheri S., Azpiroz

### References

- Mack C.A. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. Bellingham, USA, Wiley, 2008, 534 p.
- Levenson M.D., Viswanathan N.S., Simpson R.A. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1982, vol. 29, no. 12, pp. 1828–1836. doi: 10.1109/T-ED.1982.21037
- De Bisschop P. How to make lithography patterns print: the role of OPC and pattern layout. *Advanced Optical Technologies*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 253–284. doi: 10.1515/aot-2015-0023
- Shi X., Hsu S., Chen F., Hsu M., Socha R.J. Dusa M. Understanding the forbidden pitch phenomenon and assist feature placement. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4689, pp. 985–996. doi: 10.1117/12.473427
- Moh L.L., Gek S.C., Qunying L., Cho J.T., Chenggen Q. Customized illumination shapes for 193nm immersion lithography. *SPIE Advanced Lithography. Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6924, art. 692435. doi: 10.1117/12.772441
- Leonard J., Carriere, J., Stack, J., Jones, R., Himel, M., Childers, J., Welch, K. An improved process for manufacturing diffractive optical elements (DOEs) for off-axis illumination systems. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6924, art. 692420. doi: 10.1117/12.774666
- Bekaert J., Van Look L., D’have K., Laenens B., Vandenberghe G., van Adrichem P., Shao W., Ghan J., Schreel K., Neumann J.T. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7973, art. 79731I. doi: 10.1117/12.881607
- Mulder M., Engelen A., Noordman O., Streutker G., van Driehuisen B. et. al. Performance of FlexRay: a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7640, art. 845984. doi: 10.1117/12.845984
- Granik Y. Source optimization for image fidelity and throughput. *Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems*, 2004, vol. 3, no. 4, pp. 509–522. doi: 10.1117/1.1794708
- Socha R., Shi X., LeHoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO). *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5853 part I, pp. 180–193. doi: 10.1117/12.617431
- Rosenbluth A.E., Melville D.O., Tian K., Bagheri S., Azpiroz

- J.T. et al. Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7274. Art. 727409. doi: 10.1117/12.814844
12. Bertsimas D., Tsitsiklis J. Simulated annealing // *Statistical Science*. 1993. V. 8. N 1. P. 10–15. doi: 10.1214/ss/1177011077
13. Jiang H., Xing T., Du M. Source optimization using simulated annealing algorithm // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9282. Art. 928239. doi: 10.1117/12.2069398
14. Hopkins H.H. On the diffraction theory of optical images // *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1953. V. 217. N 1130.
15. Иванова Т.В., Зуева Л.Ю. Исследование способов дискретизации источника при моделировании фотолитографического изображения // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 5. С. 48–52.
16. Sentaurs Lithography. Predictive Modeling of Lithographic Processes [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/mask-synthesis/sentaurs-lithography.html> (дата обращения: 23.01.2017).
17. Smith B.W. Forbidden pitch or duty-free: revealing the causes of across-pitch imaging differences // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 5040 I. P. 399–407. doi: 10.1117/12.485490
- J.T. et al. Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7274, art. 727409. doi: 10.1117/12.814844
12. Bertsimas D., Tsitsiklis J. Simulated annealing. *Statistical Science*, 1993, vol. 8, no. 1, pp. 10–15. doi: 10.1214/ss/1177011077
13. Jiang H., Xing T., Du M. Source optimization using simulated annealing algorithm. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9282, art. 928239. doi: 10.1117/12.2069398
14. Hopkins H.H. On the diffraction theory of optical images. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1953, vol. 217, no. 1130.
15. Ivanova T.V., Zueva L.Yu. Study of methods for discretizing a source when modelling a photolithographic image. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 5, pp. 295–298.
16. *Sentaurs Lithography. Predictive Modeling of Lithographic Processes*. Available at: <https://www.synopsys.com/silicon/mask-synthesis/sentaurs-lithography.html> (accessed: 23.01.2017).
17. Smith B.W. Forbidden pitch or duty-free: revealing the causes of across-pitch imaging differences. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5040 I, pp. 399–407. doi: 10.1117/12.485490

### Авторы

**Иванова Татьяна Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [itv-aco@yandex.ru](mailto:itv-aco@yandex.ru)

**Жадин Александр Владимирович** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [alessander\\_zhadin@mail.ru](mailto:alessander_zhadin@mail.ru)

### Authors

**Tatyana V. Ivanova** – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [itv-aco@yandex.ru](mailto:itv-aco@yandex.ru)

**Alexander V. Zhadin** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [itv-aco@yandex.ru](mailto:itv-aco@yandex.ru)