

DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(2)-12



## Решение задачи предобработки данных для изготовления фотошаблонов методом электронно-лучевой литографии

<sup>1</sup> А.В. Коршунов, ORCID: 0000-0002-2470-5836 <a.korshunov@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> Д.И. Рыжова, ORCID: 0009-0005-1975-6195 <d.ryzhova@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> Д.А. Булах, ORCID: 0000-0002-6270-8616 <d.bulakh@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> Е.Д. Зубарева, ORCID: 0009-0000-0338-6285 <e.zubareva@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> И.Д. Салахов, ORCID: 0009-0000-8609-0294 <i.salahov@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> И.И. Швеи, ORCID: 0009-0007-2943-5939 <i.shvets@istc-miet.ru>

<sup>2</sup> Д.А. Климушкин, ORCID: 0009-0005-4401-4185 <klimushkin.daniil@yandex.ru>

<sup>1</sup> Международный научно-технологический центр МИЭТ,

Россия, 124527, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 10, стр. 1.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет МИЭТ,

Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.

**Аннотация.** Решая задачу изготовления фотошаблонов с применением электронного луча, зачастую бывает недостаточно провести только выходной с точки зрения проектирования интегральной схемы контроль топологии стандартными средствами САПР. Особенности, связанные с механизмами управления лучом и физикой его взаимодействия с веществом, предписывают проводить дополнительный входной контроль топологических данных для верификации геометрических характеристик, связанных именно с особенностями применения электронной литографии, а также для обеспечения воспроизводимости рисунка. В данной работе представлены результаты разработки программного модуля, предназначенного для контроля топологических данных, являющихся входными для задачи изготовления фотошаблонов с применением электронного луча. Приведён перечень требований к топологии, которые должны выполняться для решения поставленной задачи, даны примеры решения задачи проверки соответствия топологии перечисленным требованиям.

**Ключевые слова:** интегральная схема; топология интегральной схемы; фотошаблон интегральной схемы; программное обеспечение; электронно-лучевая литография.

**Для цитирования:** Коршунов А.В., Рыжова Д.И., Булах Д.А., Зубарева Е.Д., Салахов И.Д., Швеи И.И., Климушкин Д.А. Решение задачи предобработки данных для изготовления фотошаблонов методом электронно-лучевой литографии. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 2, 2026 г., стр. 183–194. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(2)-12.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-40001.

## Solving the task of the data preprocessing for photomasks manufacturing using electron-beam lithography

<sup>1</sup> A.V. Korshunov, ORCID: 0000-0002-2470-5836 <a.korshunov@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> D.I. Ryzhova, ORCID: 0009-0005-1975-6195 <d.ryzhova@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> D.A. Bulakh, ORCID: 0000-0002-6270-8616 <d.bulakh@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> E.D. Zubareva, ORCID: 0009-0000-0338-6285 <e.zubareva@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> I.D. Salakhov, ORCID: 0009-0000-8609-0294 <i.salahov@istc-miet.ru>

<sup>1</sup> I.I. Shvets, ORCID: 0009-0007-2943-5939 <i.shvets@istc-miet.ru>

<sup>2</sup> D.A. Klimushkin, ORCID: 0009-0005-4401-4185 <klimushkin.daniil@yandex.ru>

<sup>1</sup> International Science and Technology Center,

Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya Alley, 10, bld. 1, 7th floor.

<sup>2</sup> National Research University of Electronic Technology (MIET),

Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, bld. 1.

**Abstract.** When solving the photomasks manufacturing problem using electron beam lithography, it is often insufficient to perform only the final layout check using standard EDA CAD tools. The specifics of the electronic beam control mechanisms and the physics of its interaction with matter require additional input layout control procedures to verify geometric characteristics associated with the specific application of electron beam lithography and to ensure pattern reproducibility. This paper presents the results of a software module development designed to verify layout data used as input for electron beam photomask fabrication. A list of layout requirements that must be met to solve this problem is also provided, along with examples of solutions for verifying layout compliance with these requirements.

**Keywords:** integrated circuit; integrated circuit layout; photomask; software; electron-beam lithography.

**For citation:** Korshunov A.V., Ryzhova D.I., Bulakh D.A., Zubareva E.D., Salakhov I.D., Shvets I.I., Klimushkin D.A. Solving the task of the data preprocessing for photomasks manufacturing using electron-beam lithography. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 2, 2026, pp. 183-194 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(2)-12.

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 25-71-40001.

### 1. Введение

Процесс проектирования полупроводниковых устройств заканчивается созданием файла топологии в одном из технологических форматов. После получения файла топологии прекращается стадия подготовки данных об интегральной схеме (ИС) и моделирования; наступает стадия выполнения технологических процессов для её изготовления (рис. 1) [1-2].

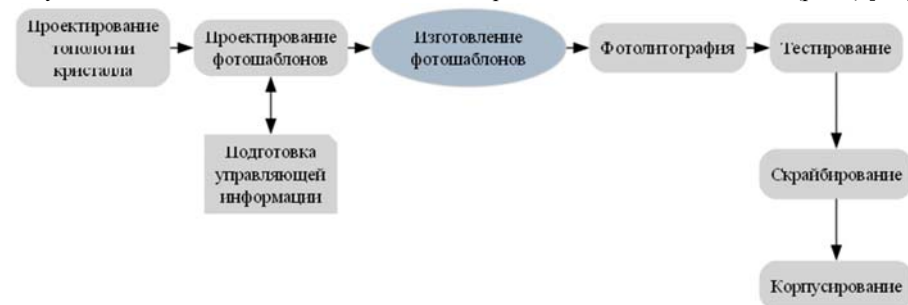


Рис. 1. Место изготовления ФШ в маршруте разработки и производства ИС.

Fig. 1. The place of the photomasks manufacturing process in the IC design and manufacturing flow.

Производство интегральных схем подразумевает формирование физического рисунка в виде послойного набора геометрических областей, получаемых из файлов топологии, на поверхности кремниевой подложки. При использовании классической проекционной литографии ключевым элементом в этом процессе является фотошаблон (ФШ), поскольку именно он является основным источником информации для формирования изображения на поверхности кремниевой пластины из топологического представления. По этой причине от качества изготавливаемого ФШ сильно зависит корректность получаемых в итоге создания интегральной схемы физических характеристик.

## 2. Обоснование требований к геометрия топологических объектов для достоверного воспроизведения рисунка на ФШ

К исходной топологии, на основе которой выполняется изготовление ФШ, предъявляется ряд требований для повышения качества изготовления ФШ и уменьшения количества дефектов [3]. Часть таких требований перекрывается предварительными проектными процедурами, выполняемыми ещё на этапе топологического проектирования. К ним, помимо, непосредственно DRC и LVS, можно отнести также и методы повышения разрешающей способности, такие как, например, OPC [1] и DPT/MPT [4-5].

Однако в зависимости от применяемого способа производства ФШ и для повышения надёжности могут потребоваться дополнительные виды анализа.

В данной работе рассматривается процесс нанесения рисунка на поверхность ФШ с помощью электронного луча.

### 2.1 Процесс нанесения рисунка на ФШ

При формировании рисунка с помощью электронного луча обычно реализуется схема, показанная на рис. 2 [6-7].

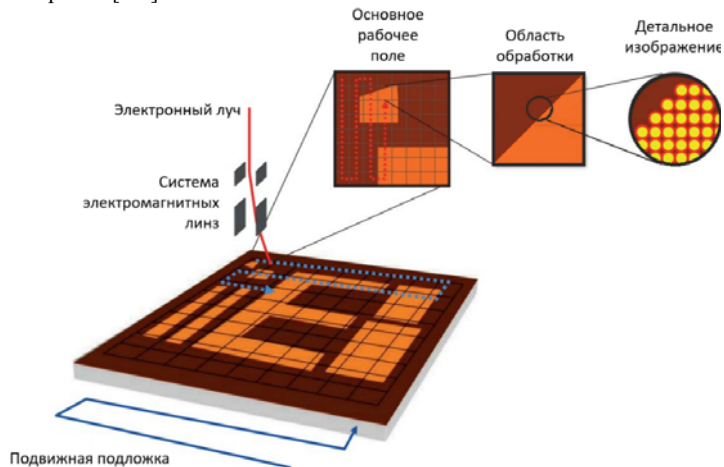


Рис. 2. Процесс формирования изображения электронным пучком.  
Fig. 2. The process of an image formation on a substrate with the electron beam.

Подложка размещается на подвижной платформе. Вся полезная площадь платформы делится на области, в пределах которой может отклоняться электронный луч и смещение платформы осуществляется с шагом, близким к размеру такой области.

В пределах выбранной области благодаря системе электромагнитных линз электронный луч отклоняется по заданной траектории и, в соответствии с топологическим рисунком

геометрических объектов в слое, формирует требуемое изображение путём импульсных воздействий электронного пучка на поверхность с определённой длительностью и определённой интенсивностью. Отклонение происходит с некоторым фиксированным шагом (рис. 3), формируя тем самым сетку, состоящую из так называемых «пикселей» или «точек машинной сетки» [8].

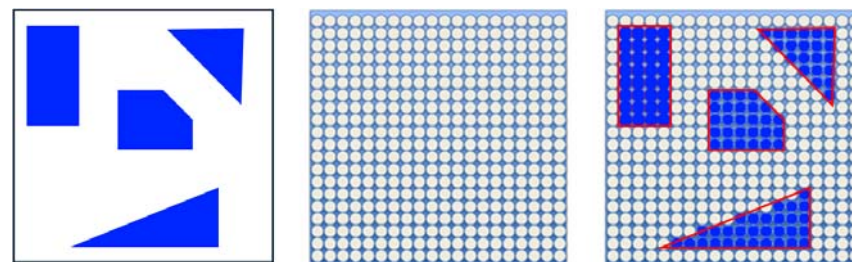


Рис. 3. Вид исходной топологии (слева), растеризованного рабочего поля (по центру) и результат формирования топологического рисунка электронным лучом (справа).

Fig. 3. A set of layout geometries to be exposed (on the left), rasterized working field of a beam (on the center), the result of the exposure with the electron beam (on the right).

Из рис. 3 видно, что для некоторых типов геометрий формируемый рисунок получается близким, но не идентичным. Возможны также фигуры, когда рисунок не может быть воспроизведён в пределах требуемой точности.

Для того, чтобы оборудование могло достоверно воспроизвести требуемый топологический рисунок, ко входной топологии предъявляются определённые требования, обусловленные механизмом перемещения электронного луча. Программное обеспечение, используемое для входного контроля, должно обеспечивать проверку выполнения требований и оповещать оператора установки в случае, если в передаваемой для производства ФШ топологии имеются фигуры, не удовлетворяющие входным критериям качества.

Разработке именно такого программного модуля посвящена данная работа.

### 2.2 Требования к предварительному анализу топологии

В соответствии с описанным в п.2.1 процессом формирования рисунка фотошаблона были сформированы требования к программному модулю предварительного анализа топологических данных для изготовления ФШ методом электронно-лучевой литографии.

Программный модуль должен решать следующий ряд задач:

- проверка того, что входная топология содержит только 45- и 90-градусные элементы;
- проверка того, что грани полигонов являются параллельными/перпендикулярными с заданным допуском по точности;
- проверка того, что минимальное расстояние между гранями в пределах полигона не менее заданной величины;
- проверка того, что минимальное расстояние между полигонами в пределах одного слоя не менее заданной величины;
- проверка длин граней полигонов на кратность заданному размеру;
- проверка на отсутствие геометрий, длина граней которых менее заданной величины.

Ниже каждый из этих пунктов рассмотрен подробнее.

### 2.2.1 Проверка топологии на отсутствие углов, отличающихся от 45 и 90 градусов

Исходя из изображения, данного на рис. 3 справа, можно увидеть, что наибольшую погрешность имеют фигуры, имеющие в составе своих геометрий углы, отличающиеся от кратных 45 градусам. Так, наименьшая степень достоверности будет получена для фигуры, показанной снизу (остроугольный треугольник).

В зависимости от градусов острого угла такая фигура может быть воспроизведена с различной степенью достоверности, и, следовательно, сформированная с помощью электронного луча структура может по своим оптическим характеристикам сильно отличаться от требуемых.

По этой причине требуется выполнять анализ топологии на существование таких полигонов и выдавать предупреждение в случае их обнаружения для предупреждения о возможных уходах от требуемых характеристик.

### 2.2.2 Проверка на параллельность сторон полигона

Геометрические объекты, которые должны иметь прямоугольную форму, могут быть нарисованы в топологии несколькими способами. На рис. 4 они рассмотрены на примере создания геометрий в открытом топологическом редакторе KLayout.

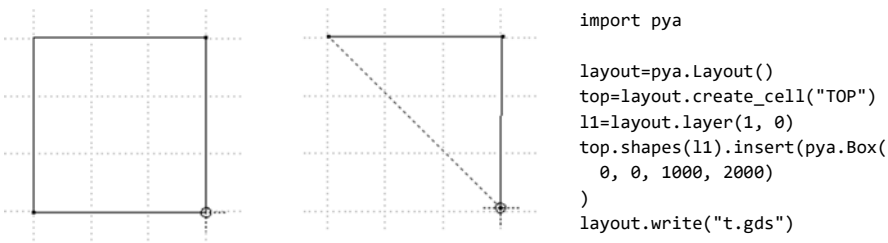


Рис. 4. Создание прямоугольника с помощью элемента BOX (слева),

POLYGON (по центру) кодом на языке Python (справа).

Fig. 4. A rectangle creation using BOX (on the left), POLYGON (on the center), or Python code (on the right).

Фигура может быть задана в виде объекта BOX, при этом разработчик указывает две координаты: начала и конца прямоугольника.

Также фигура может быть задана в виде POLYGON, тогда проектировщик вводит фигуру, расставляя точки каждой из вершин в плоскости.

Последним способом является программная генерация фигуры с помощью кода на поддерживаемом интерпретируемом языке программирования (для этих целей программа KLayout поддерживает языки Python и Ruby).

Если при создании фигуры с помощью элемента BOX невозможно ошибиться и получить не ровный прямоугольник, то ошибиться вполне возможно, создавая фигуру с помощью полигона или программного кода в случае, если координаты фигуры были вычислены неверно. Ошибку не всегда можно увидеть визуально (рис.5). Если в процессе рисования фигуры на рис.4 (по центру) можно увидеть уход от вертикальной линии, то на уже нарисованной этой же самой фигуре никаких визуальных подтверждений нарушения параллельности уже нет. Хотя из рис. 5 (справа) можно увидеть, что у последней точки имеется уход по координате X на 0.004 единицы.

При этом, наличие ошибки (нарушения параллельности сторон) не обязательно будет приводить к неправильным физическим характеристикам. Так, если уход происходит на незначительную по сравнению с шагом машинной сетки величину хода электронного луча, то никакой опасности он не представляет.

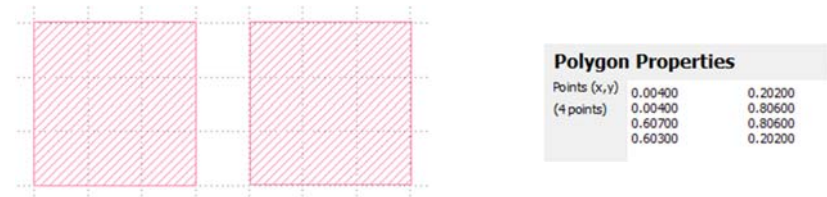


Рис. 5. Два полигона (слева), один из которых является прямоугольником, а другой – нет, и подтверждающий это список координат правого полигона (справа).

Fig. 5. Two polygons (on the left), the one is the rectangle and the other is not with the list of the coordinates (on the right) of the right polygon approving it.

Анализ ухода линии от параллельной может осуществляться одним из двух способов: либо по заданному минимально допустимому углу ухода, либо по координатам: осуществляется проверка того, что на заданное расстояние по одной оси уход происходит не более чем на минимально допустимую величину по другой.

Во избежание сильного ухода характеристик ФШ от требуемых требуется выполнять анализ топологии на существование таких отклонений.

### 2.2.3 Проверка на минимальную допустимую толщину фигуры

Беря в расчёт шаг машинной сетки (рис. 3), необходимо проверить, что топология не содержит фигур, которые не смогут быть достоверно воспроизведены из-за того, что толщины некоторых регионов менее диаметра точки машинной сетки.

Для гарантии воспроизводимости подобного рода рисунков на ФШ требуется выполнять анализ топологии на существование таких расстояний.

### 2.2.4 Проверка на минимальное расстояние между полигонами в пределах слоя

Аналогичной причиной обусловлена необходимость выполнить проверку на минимальные расстояния. Конечно, при выпуске топологии с ней проводятся аналогичного рода проверки, такие как, например, DRC-анализ, но прохождение анализа на стороне проектировщика не гарантирует соблюдение требований, специфичных для задачи изготовления ФШ с применением электронного луча.

### 2.2.5 Проверка длин сторон на кратность заданной величине

Важность этого пункта вытекает из дискретности шага машинной сетки (рис.6).

Если размеры фигуры кратны шагу сетки (рис. 6, фигура А), электронный луч сможет её воспроизвести с высокой степенью достоверности. Если же размеры фигуры не кратны шагу машинной сетки (рис. 6, фигура Б – для одной оси и фигура В – для двух осей), фигура будет воспроизведена с низкой степенью достоверности.

Для проверки геометрий на совместимость их габаритов с шагом электронного луча необходимо выполнять подобный анализ топологии.

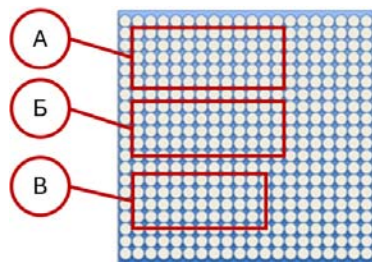


Рис. 6. Размеры фигуры А кратны шагу машинной сетки, а размеры фигур Б и В – нет.  
Fig. 6. The measurements of the figure A are multiples of the machine grid step, but the measurements of the figures B and C are not.

## 2.2.6 Проверка на наличие дефектов, размер которых меньше заданной величины

Входная топология может помимо описанных отклонений по своим геометрическим размерам иметь в составе фигур элементы, геометрический размер которых недостаточен для достоверного воспроизведения. Примерами таких объектов являются незначительные выступы на сторонах фигур.

## 3. Программная реализация предобработки топологии

Обычно для реализации описанных выше задач реализуют отдельные программные модули, каждый из которых решает отдельную задачу. Для их совместной обработки входных для производства ФШ топологических данных необходимо разработать единую программную среду исполнения.

### 3.1 Программная реализация среды исполнения

Существует несколько вариантов решения этой задачи:

- не реализовывать программную среду как таковую, вместо этого реализовать программные модули в виде отдельных динамически или статически подключаемых библиотек и предоставить конечному пользователю решать, каким именно способом он будет интегрировать эти модули в состав своего ПО; очевидно, что такой подход имеет смысл реализовывать, если у пользователя есть своя среда исполнения;
- реализовать программную среду в виде реализованной на интерпретируемом языке программирования обёртки над набором утилит или библиотек, предоставив конечному пользователю понятный интерфейс для взаимодействия с модулями, для их вызова и для передачи между ними данных; так, большинство применяемых сегодня в области САПР интерпретируемых языков (Tcl, Python) представляют возможность интегрироваться с программами на компилируемых языках высокого уровня;
- реализовать программную среду в виде графического приложения с возможностью в том или ином виде в графическом виде манипулировать разработанными программными модулями.

В данной работе представлен последний из описываемых подходов. За идею реализации была взята программа Veamer компании GenISys-Gmbh [9], которая предназначена для модулирования взаимодействия электронного пучка с веществом.

Программная реализация входных проверок была выполнена в виде графического элемента маршрута интерактивной среды обработки топологических данных для разрабатываемой

программы пост-обработки топологических данных [10]. В перечень визуальных модулей маршрута был добавлен модуль «CHECK» («Проверка») раздела «Photomask Operations» («Операции с фотошаблонами»), в составе которого и были реализованы рассмотренные в п.2.2 проверки (рис. 7).

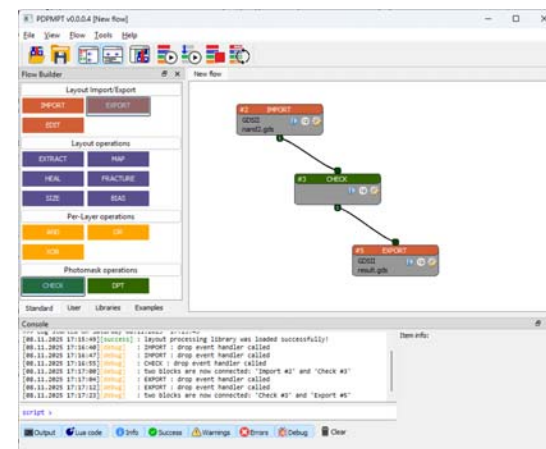


Рис. 7. Интерфейс интерактивной среды обработки топологических данных.  
Fig. 7. The interface of the interactive graphical environment software for layout processing.

Работа модуля реализуется следующим образом. Ему на вход поступает топология, на основе которой должен изготавливаться ФШ; это может быть реализовано путём связывания его входа с выходом одного из визуальных модулей: «IMPORT» («Импорт»), или «EDIT» («Редактирование»).

В результате выполнения проверок выдаётся информация о том, прошла ли проверка успешно, или были обнаружены объекты, не соответствующие заданным требованиям проверки. Информация о них формирует список обнаруженных несоответствий.

Результаты проверки могут быть представлены в двух вариантах: они могут быть выгружены в текстовый файл в формате, удобном для анализа внешними средствами (например, удобном для обработки скриптами на интерпретируемых языках программирования), а также для большей наглядности представляются в графическом виде; интерфейс программы с визуализированными несоответствиями показан на рис. 8.

В результате выполнения проверок выдаётся информация о том, прошла ли проверка успешно, или были обнаружены объекты, не соответствующие заданным требованиям.

Весь проект разрабатывается на языке программирования C++ с использованием фреймворка для кроссплатформенной разработки приложений с графическим интерфейсом пользователя Qt, что позволяет компилировать проект под такие ОС, как Microsoft Window, Linux (включая рекомендованные к применению на российском рынке Astra Linux и Alt Linux), MacOS.

### 3.3 Численные результаты выполнения некоторых видов анализа

В табл. 1 представлены временные характеристики выполнения ряда анализов для различного набора топологий.

Все тесты были взяты из открытых наборов схем OpenLane [11] и OpenROAD [12] MPW. Результаты показывают, что время выполнения анализов возрастает пропорционально числу вершин полигонов в топологиях, но при этом время обработки непропорционально меньше времени считывания топологии.

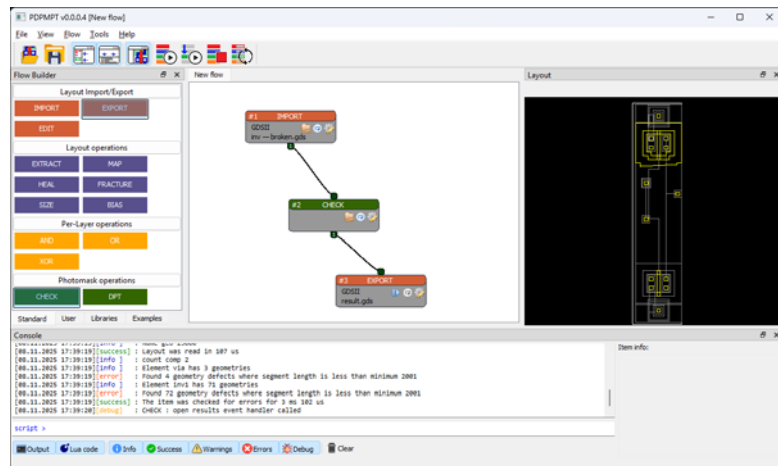


Рис. 8. Интерфейс интерактивной среды с подсвеченными ошибками.  
Fig. 8. The interface of the interactive graphical environment software with the highlighted detected check failures.

Табл. 1. Результаты обработки топологий различного размера.  
Table 1. The results of the analyses of the layout of the different size.

№	Размер, МБ	Кол-во элементов	Кол-во вершин	Время анализа, сек	Время анализа на 90 и 45 град. (п.2.2.1), сек	Время поиска дефектов (п.2.2.6), сек
1	1,092	27	64 758	0,8	0,024	0,059
2	42,354	158	2 969 213	3,2	0,148	0,557
3	79,658	211	5 481 477	6,5	0,194	0,873
4	181,856	2079	13 281 977	60,6	2,020	4,726

#### 4. Выводы

В работе рассмотрены особенности, связанные с изготовлением ФШ с использованием электронного луча. Описаны требования ко входной топологии, сформулированы виды проверок, которые необходимо выполнять для повышения достоверности формирования рисунка на поверхности ФШ. Касательно программной реализации приведены описание интерактивной среды обработки топологии, в состав которой входит разработанный программный модуль, и численные результаты выполнения некоторых из перечисленных видов анализа на тестовых топологиях разного размера.

На основе рассмотренных в работе видов анализа программа формулирует рекомендации о применимости той или иной топологии для использования её при изготовлении ФШ.

Помимо выполнения только анализа геометрий для разработчиков ФШ представляют также интерес методы, позволяющие на основе полученных результатов корректировать входную топологию. Но реализация этих методов требует большего набора эмпирических данных.

#### Список литературы / References

[1]. Иванов В.В., Тельминов О.А. Подготовка управляющей информации для изготовления фотошаблонов: перспективные методы и автоматизация. Научный семинар на тему: "Коррекция

эффектов оптической близости в литографии", Труды научного совета РАН, том 3 (1), 2019, с. 23-39. Доступно по адресу: <https://www.niime.ru/upload/pres/70219/03.pdf> (дата обращения 06.11.2025).

[2]. Лапшина Б.А. Технология литографических процессов. Учебное пособие. Московский государственный институт электроники и математики. М., 2011. 95 с.

[3]. Тумилович, В. В. Возникновение дефектов при изготовлении фотошаблонов = Occurrence of defects the production of masks. Электронные системы и технологии: сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апреля 2025 г. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.], Минск, 2025, с. 66-69.

[4]. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Верстов В.А., Макачук В.В. Система визуализации и аналитической поддержки проектирования топологии СБИС для технологии двойного шаблона. Программные продукты и системы. 30. 100-104, 2016. DOI: 10.15827/0236-235X.114.100-104.

[5]. Yu B., Xu X., Roy S., Lin Y., Ou J., Pan D. Design for manufacturability and reliability in extreme-scaling VLSI. *Science China Information Sciences*, 2016. DOI: 59. 10.1007/s11432-016-5560-6.

[6]. Pala N., Karabiyik M. *Electron Beam Lithography (EBL)*. In: Bhushan, B. (eds) *Encyclopedia of Nanotechnology*. Springer, Dordrecht, 2012. DOI: 10.1007/978-90-481-9751-4\_344.

[7]. Hiroshi Ozawa. Development of JBX-A9, Electron Beam Lithography System. *JEOL NEWS*, vol. 59, no. 1. Доступно по адресу: <https://www.jeol.com/solutions/applications/details/se2024-01.php> (дата обращения 07.11.2025).

[8]. Greibe T., Anhoj T., Johansen L., Han A. Quality control of JEOL JBX-9500FSZ e-beam lithography system in a multi-user laboratory. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 155, pp. 25-28. DOI: 10.1016/j.mee.2016.02.003.

[9]. Сайт программного обеспечения Beamer компании GenISys-GmbH. Доступно по адресу: <https://www.genisys-gmbh.com/beamer.html> (дата обращения: 04.11.2025).

[10]. Булах Д.А., Коршунов А.В. "Интерактивная среда обработки топологических данных ИС". Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции. под.ред. С.У. Увайсова, М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2025, с. 381-386.

[11]. Shalan M., Edwards T. "Building OpenLANE: A 130nm OpenROAD-based Tapeout-Proven Flow: Invited Paper", 2020 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), San Diego, CA, USA, 2020, pp. 1-6.

[12]. T. Ajayi et al., "INVITED: Toward an Open-Source Digital Flow: First Learnings from the OpenROAD Project", 2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-4.

#### Информация об авторах / Information about authors

Андрей Владимирович КОРШУНОВ – кандидат технических наук, доцент института интегральной электроники, доцент. Сфера научных интересов: исследование и разработка методов проектирования энергоэффективных СБИС и систем на кристалле.

Andrey Vladimirovich KORSHUNOV – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor at the Institute of Integrated Electronics. Research interests: research and development of design methods for energy-efficient VLSI and SoCs.

Дарья Игоревна РЫЖОВА – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории «Перспективные САПР СБИС», доцент института интегральной электроники. Сфера научных интересов: автоматизированные системы проектирования, логический и логико-временной анализ схем, ускоренный анализ пикового тока КМОП схем, характеристика интегральных схем, физический синтез микро- и нанoeлектронных схем.

Daria Igorevna RYZHOVA – Cand. Sci. (Tech.), Head of the Research laboratory «Advanced VLSI CAD», Assistant Professor at the Institute of Integrated Electronics. Research interests: automated design systems, logical and timing analysis of circuits, accelerated peak current analysis of CMOS circuits, integrated circuit characterization, physical synthesis of micro- and nanoelectronics.

Дмитрий Александрович БУЛАХ – кандидат технических наук, доцент института интегральной электроники. Сфера научных интересов: алгоритмы моделирования, обработки и визуализации данных в САПР СБИС.

Dmitriy Aleksandrovich BULAKH – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor at the Institute of Integrated Electronics. Research interests: VLSI EDA data simulation, processing and visualization algorithms.

Екатерина Дмитриевна ЗУБАРЕВА – студентка 3-го курса института интегральной электроники. Сфера научных интересов: алгоритмы обработки данных в САПР СБИС.

Ekaterina Dmitrievna ZUBAREVA – a 3rd-year student at the Institute of Integrated Electronics. Research interests: algorithms of data processing in VLSI CAD.

Иван Дмитриевич САЛАХОВ – студент "НИУ МИЭТ", института интегральной электроники. Сфера научных интересов: разработка и оптимизация алгоритмов моделирования и обработки данных в САПР СБИС.

Ivan Dmitrievich SALAKHOV – a student at NIU MIET, the Institute of Integrated Electronics. Research interests: development and optimization of modeling and data processing algorithms in VLSI CAD.

Илья Игоревич ШВЕЦ – студент направления электроника и наноэлектроника. Сфера научных интересов: разработка и программирование САПР СБИС.

Ilya Igorevich SHVETS – student of the direction of electronics and nanoelectronics. Research interests: development and programming of VLSI CAD.

Даниил Александрович КЛИМУШКИН – инженер-электроник 2 категории Института микроприборов и систем управления. Сфера научных интересов: алгоритмы управления и обработки информации в технологических процессах.

Daniil Aleksandrovich KLIMUSHKIN – electronics engineer of the 2nd category at Institute of Microdevices and Control Systems. Research interests: algorithms for controlling and processing information in technological processes.