

ДВУХЭТАПНАЯ ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ХРУПКИМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

© 2025 г. С. Г. Марганов^а, Е. В. Таркаева^а, В. А. Иевлева^{а, б}, А. Ю. Кунцевич^{а, *}

^а Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^б Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
Россия, 101000, Москва, Мясницкая ул., 20

* e-mail: alexkun@lebedev.ru

Поступила в редакцию 22.08.2024 г.

После доработки 18.09.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Представлено дополнение к электронному литографу на основе оптического микроскопа для быстрого паттернирования крупномасштабных элементов методом контактной масочной фотолитографии в ультрафиолетовом излучении на электронном резисте. Прибор ускоряет создание контактных площадок к твердотельным микро- и наноструктурам и уменьшает риск потери образца при работе с хрупкими структурами.

DOI: 10.31857/S0032816225020189, EDN: GLIMIK

1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении транспортных свойств наноструктур, таких как нанопровода, нанотрубки, отдельные чешуйки и ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, необходимыми элементами являются подводящие электроды или контакты. Характерный размер исследуемых объектов может составлять сотни нанометров, поэтому контакты к ним изготавливаются с помощью электронной литографии, но при этом также необходимо изготовить подводящие контактные площадки, размер которых, как правило, составляет сотни микрон. Поэтому вместо того, чтобы паттернировать контакты целиком с помощью электронной литографии, обычно прибегают к двухступенчатому процессу.

Маленькая область вблизи структуры паттернируется с высоким пространственным разрешением при помощи электронной литографии, в то время как внешние элементы, например подводящие электроды с контактными дорожками, выполняются при помощи более дешевой и быстрой фотолитографии.

Большинство электронных резистов на основе полиметилметаакрилата (ПММА) допускают также экспонирование ультрафиолетовым (УФ) светом [1]. Уменьшить количество литографий возможно, засвечивая один резист поочередно электронами для создания субмикронной части электродов и УФ-светом — для контактных площадок.

Реализовать экспонирование УФ-светом в лаборатории при помощи сканирующей проекционной [2–4] или лазерной [5] литографии дорого из-за стоимости оптики для данного диапазона. Бюджетной альтернативой является контактная масочная литография с использованием ртутной лампы.

Стандартные коммерчески доступные устройства совмещения-экспонирования оснащены прецизионными механическими компонентами, рассчитанными на достаточно большие подложки, поэтому они тоже являются дорогостоящими. В то же время для большинства лабораторных задач достаточно экспонировать сравнительно малую область — до одного квадратного сантиметра, что снижает требования

к механике и позволяет сделать установку совмещения-экспонирования на основе микроскопа, см., например, [6].

В настоящей работе мы реализуем оптическую часть данного двухступенчатого процесса литографии — самодельную установку, оборудованную микроскопом и манипулятором для совмещения контактных масок с возможностью ультрафиолетовой засветки. Фактически данный прибор является уменьшенной лабораторной версией установок совмещения-экспонирования. Мы демонстрируем созданные структуры. Разработанные решения являются естественным дополнением к электронному литографу, они расширяют возможности лабораторий, ведущих исследования в области наноструктур.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На оптической плите размером $20 \times 30 \text{ см}^2$ был закреплен стержень, на котором был установлен компактный металлографический микроскоп

(Radical, Индия) с возможностью вращения на 180° . Также на микроскопе были установлены камера и монитор, что обеспечивало возможность трансляции на него изображения образца. На той же плите была установлена система подвижных столиков с микрометрическими винтами. Благодаря этому появилась возможность перемещения маски и столика с образцом как вместе, так и относительно друг друга, в частности, возможность вращения и наклона столика с образцом. Образец был закреплен на столике при помощи двухстороннего скотча. Маска удерживается прижимными лапками для предметных стекол. Фотографии установки в положениях совмещения и засветки приведены на рис. 1а, 1б соответственно.

Перемещение всего микроскопа в вертикальном направлении позволяло последовательно фокусироваться на маске и на образце, добиваясь совмещения с точностью до 5 мкм. После совмещения маски с образцом и приведения их в механический контакт микроскоп развора-

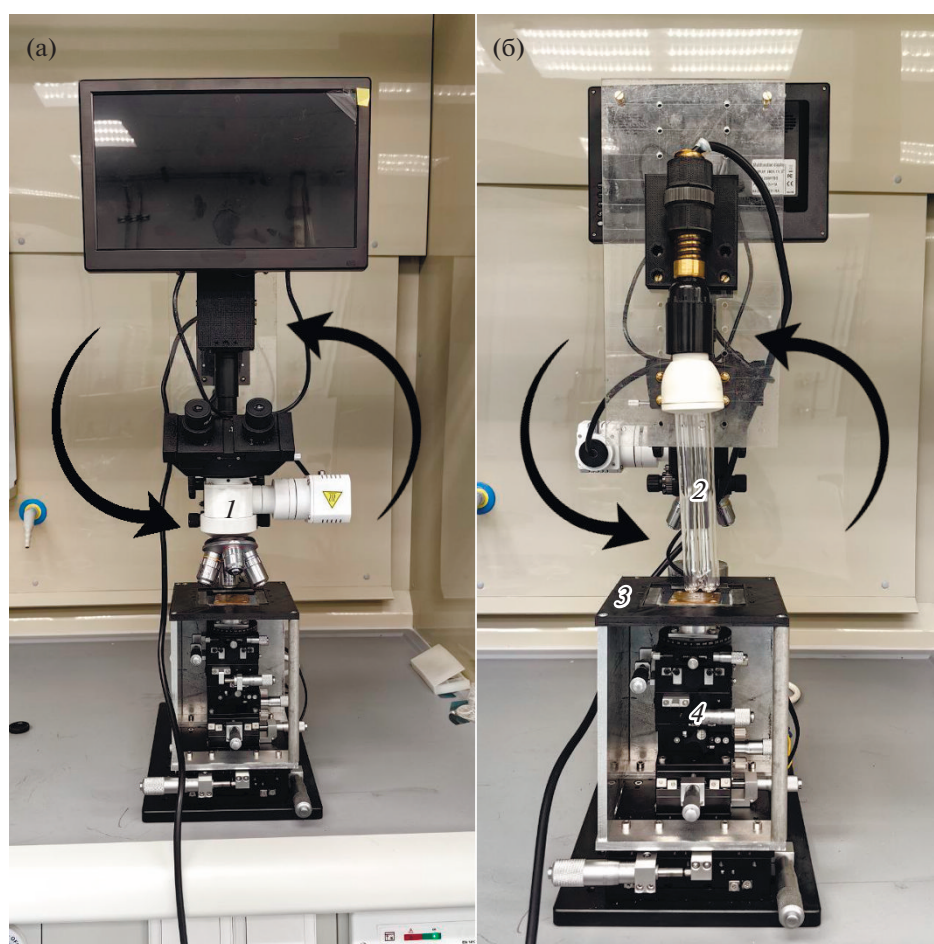


Рис. 1. Фотография установки для масочной УФ-литографии: а — положение совмещения, б — положение засветки: 1 — микроскоп, 2 — лампа, 3 — столик, 4 — система микрометрических подвижек.

чивался и над образцом размещалась УФ-лампа для засветки.

В качестве источника засветки использовались стандартная ртутная лампа для кварцевания помещений с цоколем E27 и переменное напряжение 220 В мощностью 20 Вт. Время засветки составляло около 10–15 мин. Было установлено, что для засветки важно наличие в спектре лампы линии с длиной волны 185 нм. Лампы, в спектре которых не было данной длины волны, не засвечивали резист за столь малое время. Установку приходилось располагать в вытяжном шкафу, так как при работе УФ-лампы выделялся озон.

Изготовление маски (фотошаблона) в данной работе осуществлялось при помощи взрывной литографии на ванадии, напыленном электронным лучом на плавленное кварцевое стекло КУ-1 (толщина ванадия – 200 нм, толщина стекла – 1 мм). Топографический рисунок наносился на поверхность фоторезиста AZ1512HS при помощи литографа с прямой лазерной записью Heidelberg muPG101 на длине волны 405 нм.

На рис. 2 приведен пример последовательно выполненных этапов изготовления образца. Механически отщепленная чешуйка, в данном

случае речь идет о слоистом материале с волнами зарядовой плотности $1T-TaS_2$, переносится на подложку Si/SiO₂ с толщиной оксида 200 нм, на которую наносятся метки совмещения для электронной литографии (рис. 2а). Далее производится засветка в электронном микроскопе JEOL JSM-64 с приставкой NanoMaker небольшой области, включающей контакты к чешуйке (рис. 2б). Полученная заготовка при помощи установки совмещения-экспонирования совмещается с маской для создания контактных площадок, и проводится УФ-засветка (засвеченные области до проявления видны на рис. 2в). Резист проявляется (рис. 2г), производится термическое напыление металла поверх чешуйки с последующим взрывом резиста в снимателе (рис. 2д). Для того чтобы контакты не претерпевали разрыва, толщина напыленного металла должна быть больше, чем толщина чешуйки. В данном случае толщина напыленного металла составляет 200 нм, в то время как толщина чешуйки около 100 нм. Вид готового образца в электронном микроскопе показан на рис. 2е.

Сравнение предложенного маршрута по созданию контактов к микро- и наноструктурам

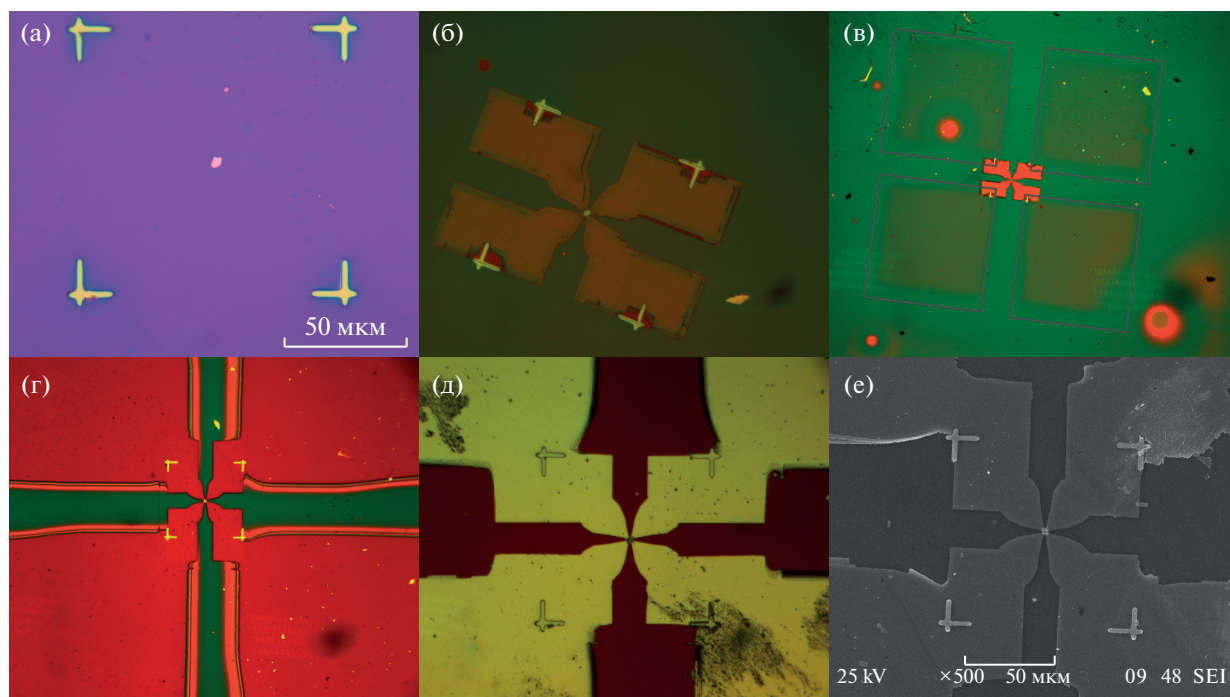


Рис. 2. Пример этапов изготовления образца: **а** – чешуйка и метки для совмещения, **б** – частично проявленный электронный резист после засветки области контактов с образцом, **в** – изображение в микроскопе после засветки УФ-лампой, квадратами показана область засветки, **г** – изображение после полного проявления резиста, **д** – готовый образец после напыления металла и взрывной литографии, **е** – изображение образца в электронном микроскопе. Изображения **а–д** получены с помощью оптического микроскопа, изображение **е** – с помощью электронного микроскопа.

Таблица 1. Сопоставление стандартного и предлагаемого технологических маршрутов по производству контактов к наноструктурам

№	Стандартный маршрут	Предлагаемый маршрут
1	Нанесение электронного резиста на подложку с образцом.	Нанесение электронного резиста на подложку с образцом.
2	Электронная литография части контактов субмикронных размеров вблизи образца.	Электронная литография части контактов субмикронных размеров вблизи образца.
3	Проявление электронного резиста.	Масочная УФ-литография подводящих контактных площадок с характерным размером сотни микрометров.
4	Напыление металла с последующей взрывной литографией.	Проявление электронного резиста.
5	Нанесение оптического резиста на подложку с образцом.	Напыление металла с последующей взрывной литографией.
6	Масочная или лазерная литография подводящих контактных площадок с характерным размером сотни микрометров.	
7	Проявление оптического резиста.	
8	Напыление металла с последующей взрывной литографией.	

со стандартным маршрутом приведено в табл. 1. Стандартный маршрут предполагает два процесса нанесения резиста и взрывной литографии, в то время как предлагаемый маршрут (правый столбец) предполагает проводить нанесение и снятие резиста один раз.

Каждое нанесение резиста повышает вероятность загрязнить исследуемые наноструктуры. Кроме того, на этапах взрывной литографии есть вероятность смыть слабо связанные с подложкой наноструктуры. Таким образом, предлагаемый маршрут является более безопасным для образцов, также он экономит время нанолитографа, являющееся ограниченным и ценным ресурсом.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создано дополнение к электронному литографу для реализации двухэтапной литографии: точной – в литографе и грубой – в приставке-дополнении. Использование одного напылительного процесса для создания всей металлизации повышает вероятность сохранить хрупкие образцы, такие как нанотрубки, нанопровода и ван-дер-ваальсовы гетероструктуры. Для некоторых материалов сверхпроводящих контактов (например Al) использование единого процесса позволяет избежать образования нежелательных джозефсоновских переходов на образце. Также

предложенный способ создания контактов экономит время работы и ресурс электронного литографа, поскольку он значительно ускоряет создание наиболее крупного и обязательного элемента любого прибора на чипе – контактных площадок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны С.В. Зайцеву-Зотову за доступ к электронному микроскопу для формирования наноструктур в ИРЭ РАН, А.Г. Коваленко и А.С. Ильину за помощь в работе с данным прибором.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-12-00340) и выполнена в центре коллективного пользования ФИАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carbaugh D.J., Pandya S.G., Wright J.T., Kaya S., Rahman F. // Nanotechnology. 2017. V. 28. P. 455301. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa8bd5>
2. Love J.C., Wolfe D.B., Jacobs H.O., Whitesides G.M. // Langmuir. 2001. V. 17. P. 6005. <http://dx.doi.org/10.1021/la010655t>

3. *Zheng L., Birr T., Zywieta U., Reinhardt C., Roth B.* // *Light: Advanced Manufacturing*. 2023. V. 4. P. 33. <http://dx.doi.org/10.37188/lam.2023.033>
4. *Galiullin A.A., Pugachev M.V., Duleba A.I., Kuntsevich A.Yu.* // *Micromachines*. 2024. V. 15. P. 39. <https://doi.org/10.3390/mi15010039>
5. *Rhee H.-G.* *Direct Laser Lithography and Its Applications* // *Lithography* / Ed. by M.Wang. 2010. <http://doi.org/10.5772/8167>
6. *Pugachev M.V., Duleba A.I., Galiullin A.A., Kuntsevich A.Y.* // *Micromachines*. 2021. V. 12. P. 850. <https://doi.org/10.3390/mi12080850>