

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Тукмаков К. Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

В работе рассмотрены технологические особенности наноструктурирования поверхности для изготовления оптических устройств в алмазе с помощью технологии фокусированных ионных пучков. На примере изготовления фотонно-кристаллического резонатора и массива однофотонных эмиттеров показана возможность эффективного использования данной технологии для быстрого прототипирования широкого класса оптических устройств, в том числе в таком материале, как алмаз. Проведена оптимизация режимов записи структур в зависимости от требований конкретной задачи.

Ключевые слова: наноструктурирование, фотоника, фокусированный ионный пучок, фотонный кристалл, однофотонный эмиттер.

Введение

Разработка твёрдотельных квантовых оптических устройств является актуальной задачей для изучения фундаментального взаимодействия света с веществом, а также для прикладных задач квантовой информатики. Уникальные свойства алмаза и его модификаций с внедрёнными центрами окраски определяют его как перспективный материал для создания интегральных квантовых информационных систем, например, ярких однофотонных излучателей и квантовых битов на основе спиновых систем [1, 2]. Для реализации таких устройств необходимы технологии создания микро- и наноканалов в тонких плёнках. Разработка и оптимизация таких технологий является актуальной на сегодняшний день задачей. В данной работе представлен метод наноструктурирования алмаза с помощью фокусированного ионного пучка (ФИП) для создания оптических устройств.

1. Способы изготовления фотонных устройств

При изготовлении дифракционных оптических элементов, фотонных кристаллов и других оптических устройств часто применяются технологии, основанные на литографии [3]. Для структурирования приповерхностного слоя подложки, например, для создания дифракционной решётки в кремнии, на поверхности пластины методами литографии создаётся защитная маска, которая повторяет контур линий решётки. Через эту маску производится травление кремниевой подложки в таком режиме, при котором скорость травления подложки по сравнению со скоростью травления маски велика. После травления подложки маска удаляется обычно химическим травлением.

Очевидно, что для производства оптических элементов видимого диапазона недостаточно разрешения оптической литографии. В этом случае прибегают к использованию электронной литографии, когда для создания маски используется экспонирование полимерного слоя с помощью пучка электронов. Через полученную таким способом маску в большинстве

случаев производится химическое травление другого, более стойкого масочного слоя, и уже через последний – травление собственно материала подложки с помощью плазменных технологий.

Большое распространение получил метод взрывной литографии, который используется для наноструктурирования тонких плёнок на поверхности подложки. Суть метода заключается в создании полимерной маски на поверхности подложки методом оптической или электронной литографии (выбор определяется требуемым разрешением) и нанесении требуемого (часто многослойного) покрытия на маску и открытые участки подложки. После получения такого покрытия производится растворение полимерного слоя, приводящее к удалению покрытия с защищённых участков, при этом покрытие на незащищённых участках остается.

Таблица 1. Сравнение технологий изготовления оптических наноструктур

Особенность	Электронная литография	ФИП
Стоимость оборудования	Высокая	Очень высокая
Возможность прямой записи структур	Нет	Есть
Возможность многоуровневого структурирования	Очень слабая	Есть
Требование дополнительных операций	Обязательно	Нет
Контроль толщины структур	Зависит от травления	Затруднён
Контроль вертикальности стенок	Есть	Затруднён
Скорость записи	низкая	Очень низкая

Локальное травление с помощью фокусированного ионного пучка в последнее время все чаще используется для создания наномасштабных оптических элементов [4] в исследовательских задачах. Этот инструмент обладает широчайшими возможностями по наноструктурированию приповерхностного слоя

практически любых материалов. Его выгодно отличает от ранее описанных способов отсутствие многостадийного производства с применением разнородных технологий, что обеспечивает высокую чистоту процесса и определяет его как наиболее подходящий инструмент для быстрого изготовления оптических элементов для исследовательских задач. Также этот способ отличает относительная простота получения многоуровневого и даже трёхмерного нерегулярного профиля травления.

2. Изготовление фотонно-кристаллического резонатора на алмазной мембране

На рис. 1 приведено изображение фотонно-кристаллического резонатора, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Резонатор представляет собой массив сквозных отверстий диаметром 140 нм в алмазной мембране толщиной 300 нм, расположенных в гексагональном порядке с периодом 275 нм с пропуском ряда неоднородностей в центральной области.

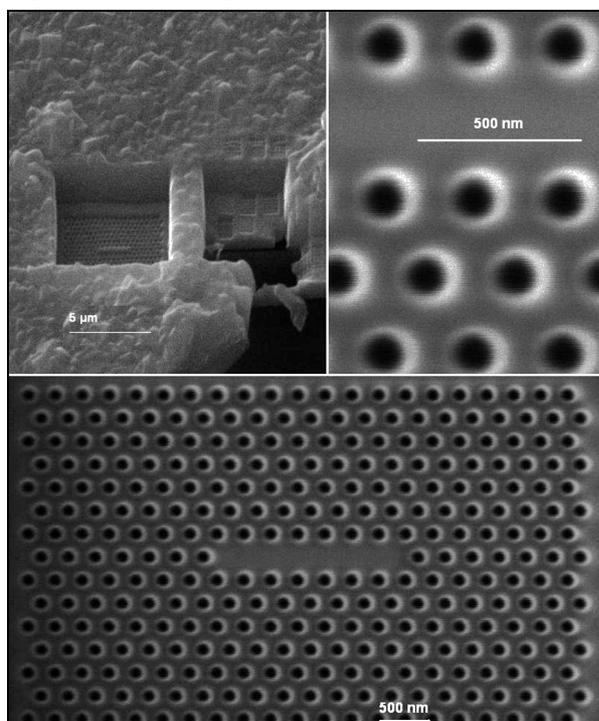


Рис. 1. РЭМ изображение фотонно-кристаллического резонатора

Для производства резонатора использовалась ионная пушка на основе жидкометаллического галлиевого источника (Ga⁺) с ускоряющим напряжением 30 кВ (на основе платформы «Нанофаб-100» производства НТ-МДТ, Россия). На рис. 2 показан скол исходной алмазной мембраны толщиной 2 мкм с выполненным локальным утоньшением области 7×5 мкм. Выполнение такого утоньшения требуется для достижения необходимой для создания резонатора толщины мембраны в 300 нм. Утоньшение производилось с использованием ФИП при токе ионного пучка 120 нА, что также обеспечило значи-

тельное уменьшение шероховатости поверхности алмазной плёнки.

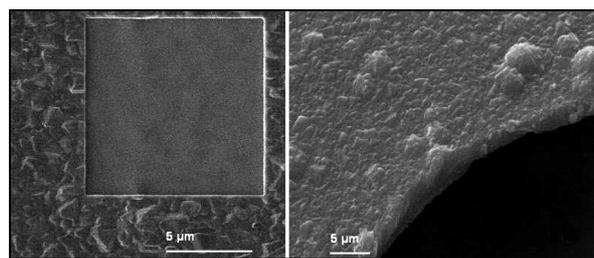


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности алмазной мембраны: область с локальным утоньшением до 300 нм (а); скол мембраны под углом (б)

Для получения сквозных отверстий заданного диаметра в мембранах указанной толщины был подобран оптимальный рабочий ток на уровне 35 нА. Вследствие того, что при выбранном рабочем токе для алмаза характерен высокий уровень переосаждения удалённого ионным пучком материала [5, 6], был использован метод последовательной многократной записи одной структуры с целью уменьшения времени однократной экспозиции пикселя. При этом время однократной экспозиции было неизменно и составляло 1 мс с 400-кратным повторением записи одной точки.

На рис. 3 приведено РЭМ изображение, выполненное под углом 47°, которое показывает, что подобранный ток и время экспозиции одной точки обеспечивают получение сквозных отверстий в мембране (вырезание части мембраны выполнено с использованием ФИП после травления отверстий).

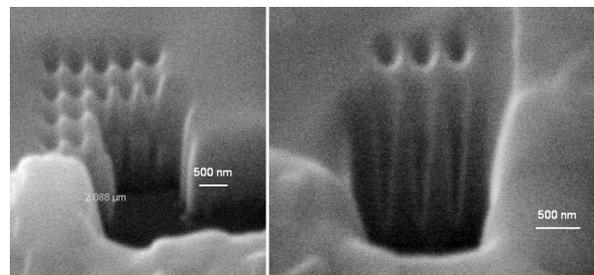


Рис. 3. РЭМ изображение сквозных каналов в мембране

3. Изготовление массива однофотонных эмиттеров на алмазе

Для изготовления массива однофотонных эмиттеров традиционно применяется технология плазменного травления алмажной подложки через маску, полученную электронной литографией. Такой эмиттер представляет собой массив алмазных стержней диаметром примерно 100 нм и длиной до нескольких микрометров [7]. В ИОФ РАН была предложена методика изготовления такой структуры, в которой рост алмазных стержней происходит в отверстиях в толстом слое кремния на поверхности алмазной подложки. Отверстия диаметром 1,5 мкм в слое кремния толщиной 0,6 мкм они получали с помощью лазерной записи. Рост алмазных стержней в таких отверстиях прошёл успешно.

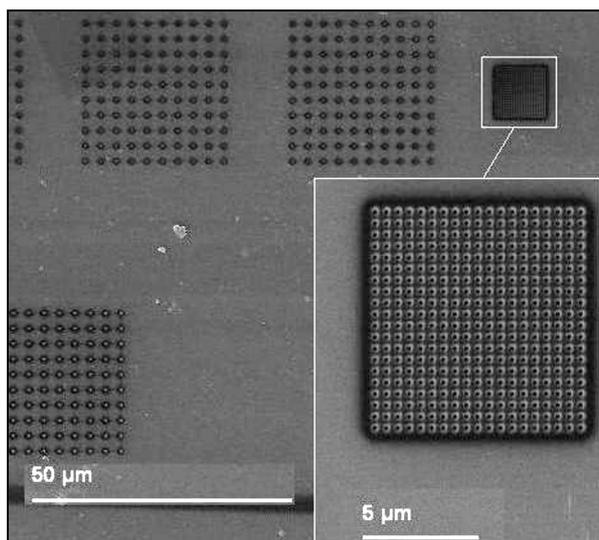


Рис. 4. РЭМ изображение полученных массивов отверстий для последующего роста в них алмазных стержней

В данной работе с помощью ФИП в аналогичной основе были протравлены отверстия меньшего диаметра, что позволило создать стержни с аспектным соотношением до четырёх. Магнетронным распылением на искусственный алмаз был нанесен слой кремния толщиной 0,6 мкм, затем на всю толщину этого слоя протравлены нескольких массивов отверстий с шагом от 1 до 3 мкм и диаметром от 150 до 300 нм. Таким образом, максимальное аспектное соотношение полученных отверстий равно четырём. Травление отверстий производилось при ионном токе от 30 до 50 пА, время однократной экспозиции пикселя было неизменным для всех отверстий и составляло 0,5 мс, что обеспечивало низкий уровень переосаждения кремния. Для каждого диаметра отверстий был подобран ионный ток и количество циклов повторения записи для получения заданной глубины отверстий за минимальное время и с малым углом отклонения стенок от вертикали.

Для определения глубины травления отверстий использовалось «вырезание» части отверстий с помощью ФИП с высоким током, что даёт возможность обзора каналов под углом (рис. 5). Определение границы раздела «кремний–алмаз» в таком срезе производилось по уровню количества вторичных электронов (яркости детектируемого изображения).

Заключение

Технология ФИП позволяет производить быстрое изготовление наномасштабных фотонных структур в едином процессе без применения очень требовательных к чистоте процесса и трудоёмких технологий. Использование современной концепции размещения в одной установке ионной и электрон-

ной колонны снимает все ограничения на обрабатываемые материалы и позволяет всесторонне контролировать процесс изготовления. Использование моторизованного держателя образцов позволяет увеличить поле записи методом последовательной записи нескольких полей с повторной калибровкой с помощью маркеров. В работе проведена оптимизация режимов записи структур для получения требуемых их параметров за минимальное время.

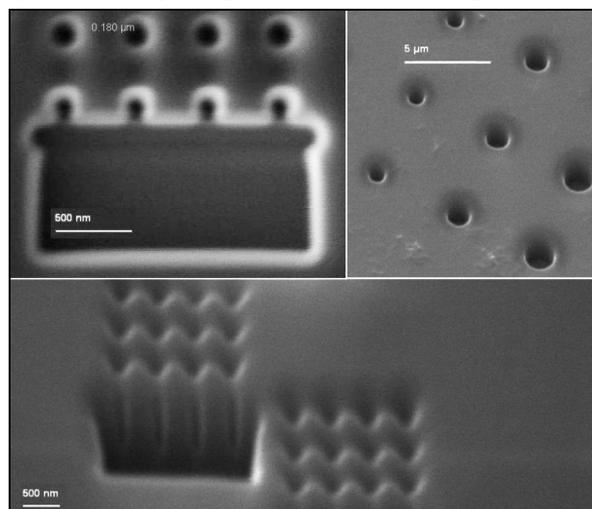


Рис. 5. Изображение полученных каналов

Литература (References)

1. **Riedrich-Möller, J.** One- and two-dimensional photonic crystal microcavities in single crystal diamond / J. Riedrich-Möller [et al.] // *Nature nanotechnology*. – 2012. – Vol. 7(1). – P. 69-74.
2. **Bayn, I.** Processing of photonic crystal nanocavity for quantum information in diamond / I. Bayn [et al.] // *Diamond and Related*, 2011. – P. 1-25.
3. **Younan, X.** Unconventional Methods for Fabricating and Patterning Nanostructures / Xia Younan [et al.] // *Chem. Rev.* – 1999. – Vol. 99(7). – P. 1823-1848.
4. **Cryan, M., Rarity, J., Heard, P.** 2nd International Workshop on FIB for Photonics. 2010.
5. **Gruen, D.M.** Nanocrystalline diamond films / D.M. Gruen // *Annual Review of Materials Science*. 1999. Т. 29: С. 211-259.
6. **Tarutani, M.** Application of the focused-ion-beam technique for preparing the cross-sectional sample of chemical vapor deposition diamond thin film for high-resolution transmission electron microscope observation / M. Tarutani, Y. Takai, R. Shimizu // *Japanese journal of applied physics*. – Vol. 31(9A). – С. 1305-1308.
7. **Birgit, J.M.** Hausmann и др. Fabrication of diamond nanowires for quantum information processing applications / J.M. Birgit // *Diamond and Related Materials*. – 2010. – Vol. 19, N 5. – P. 621-629.

FOCUSED ION BEAM IN OPTICS FABRICATION*K. N. Tukmakov**Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev
(National Research University)***Abstract**

This paper describes technological features of the surface nanostructuring with focused ion beam technology in diamond optics fabrication. This technology appears as effective tool for rapid prototyping of a wide variety of optical devices, including in such material as diamond. Discussed fabrication of the photonic crystal resonator and the single-photon emitter arrays. Milling parameters optimization, depending on the requirements of a specific task performed.

Key words: nanostructuring, photonics, focused ion beam, photonic crystal, single-photon emitter

Сведения об авторе

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. НОЦ нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: производство микро- и нано-структур, технология фокусированных ионных пучков.

E-mail: Tukmakov.K@gmail.com.

Konstantin Nickolaevich Tukmakov, engineer of the department of nanoengineering, junior researcher REC Nanotechnology. Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: Tukmakov.K@gmail.com . Research interests: the production of micro-and nanostructure, technology focused ion beams