

15

## Создание дифракционной решетки на алмазной подложке имплантацией ионами бора

© А.Л. Степанов<sup>1,2,3</sup>, В.И. Нуждин<sup>1</sup>, М.Ф. Галяутдинов<sup>1</sup>,  
Н.В. Курбатова<sup>1</sup>, В.Ф. Валеев<sup>1</sup>, В.В. Воробьев<sup>2</sup>, Ю.Н. Осин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского  
Казанского научного центра РАН

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет

<sup>3</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет

E-mail: aanstep@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 июня 2016 г.

Настоящее исследование относится к способам изготовления дифракционных оптических элементов (дифракционных решеток). Дифракционная решетка была получена на основе алмаза при его имплантации ионами бора через маску. В процессе имплантации в немаскированных областях облучаемого алмаза произошла графитизация алмаза, приведшая к распуханию облученного слоя. Формирование периодических поверхностных графитизированных микроструктур на поверхности алмаза контролировалось методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии. Эффективность функционирования дифракционного оптического алмазного элемента показана путем его зондирования излучением гелий-неонового лазера.

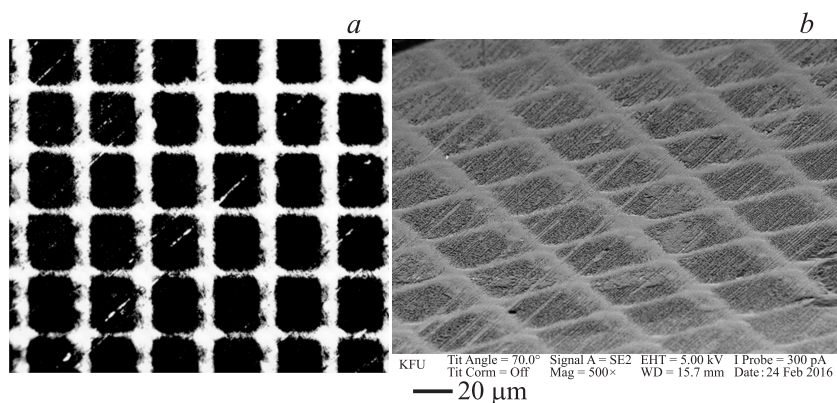
DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44185.16385

Задачи современной интегральной оптики требуют использования новых специальных материалов, а также разработки технологий изготовления рабочих компонентов и устройств на их основе. Одно из характерных направлений заключается в развитии алмазной оптики [1]. Использование алмаза обусловлено его радиационной (лучевой) стойкостью и высокой теплопроводностью. Алмазные оптические элементы, обладая широким окном прозрачности от 0.2 до 5  $\mu\text{m}$ , могут работать при резких перепадах температуры и в агрессивных химических средах. На практике алмазы используются для изготовления различных

дифракционных оптических элементов (ДОЭ): решеток, киноформов, фокусаторов, корректоров и др. [1,2]. Алмазные ДОЭ могут применяться для преобразования пучков высокомощного  $\text{CO}_2$ -лазера, на котором удается получать плотности мощности освещающего пучка до  $20 \text{ kW/cm}^2$  [3,4]; для создания фотонно-кристаллических резонаторов с целью реализации квантовых механизмов хранения информации [5]; для управления потоками излучения в рентгеновской оптике, например, при использовании алмазных брэгговских зеркал с коэффициентом отражения  $\sim 100\%$  [6] и т. д.

Для получения периодических ДОЭ на поверхности алмаза используются различные технологические способы, такие как воздействие мощными импульсами эксимерного лазера [7], травление в газовом потоке транспортного газа [8] и др. В настоящей работе представлен новый подход, который заключается в формировании на поверхности полированного алмаза периодических дифракционных структур методом ионной имплантации через поверхностную маску. Ранее данная технология была успешно использована для получения ДОЭ на диэлектрических и полимерных подложках при их имплантации ионами благородных металлов [9–11]. Таким образом, конкретная задача заключается в исследовании возможности получения ДОЭ на алмазе методом имплантации ионами бора через поверхностную маску.

Для формирования ДОЭ на полированной поверхности искусственного алмаза проводилась имплантация ионами бора с энергией  $E = 40 \text{ keV}$ , дозой облучения  $D = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ ion/cm}^2$  при плотности тока в ионном пучке  $J = 15 \mu\text{A/cm}^2$  на ионном ускорителе ИЛУ-3 через поверхностную маску — никелевую сетку с размером квадратных ячеек  $40 \mu\text{m}$ . Локальная морфология и структура поверхности имплантированного алмаза были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на СЭМ-микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенном детектором дифракции отраженных электронов HKL NordLys (Oxford Instruments), а также атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактной моде с помощью АСМ-микроскопа FastScan (Brucker). Оптическая характеристика ДОЭ проводилась с помощью оптического микроскопа Полар-1 (Микромед) и при измерении рамановского спектра по методике, описанной в работе [12]. Анализ оптических дифракционных картин от ДОЭ осуществлялся при их зондировании гелий-неоновым лазером на длине волны  $632.8 \text{ nm}$ . Моделирование концентрационных профилей распределения имплантированного бора с

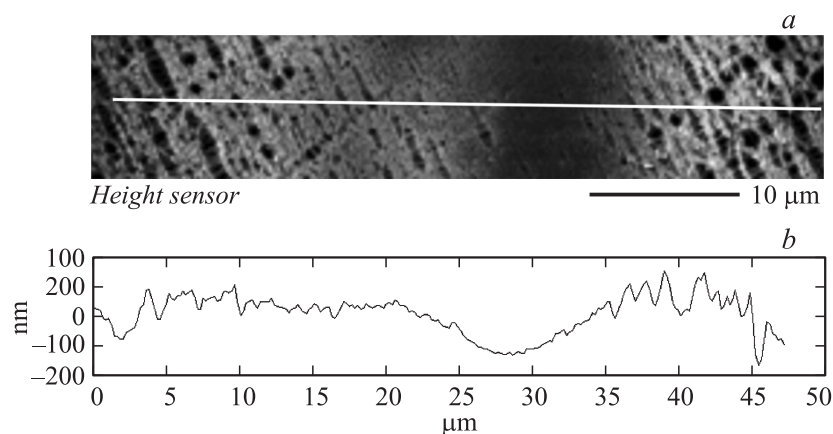


**Рис. 1.** Изображения имплантированного через маску ионами бора алмаза, наблюдаемые на оптическом (*a*) и электронном (*b*) микроскопах.

энергией 40 keV в алмазе по глубине с помощью алгоритма SRIM-2013 показало, что атомы бора накапливаются в приповерхностном слое алмаза толщиной  $\sim 100$  nm.

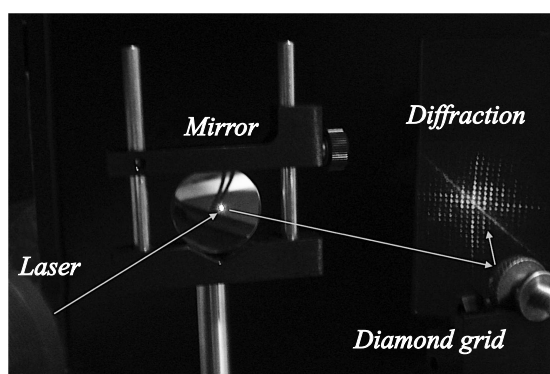
На рис. 1 приведены изображения решетки, сформированной на поверхности алмаза имплантацией ионами бора через поверхностную маску, наблюдаемые на оптическом (*a*) и под углом  $70^\circ$  на СЭМ (*b*) микроскопах. Как видно из приведенных изображений, периодическая микроструктура состоит из чередующихся темных квадратных ячеек, относящихся к имплантированным участкам поверхности образца, разделенных стенками (светлые области) неимплантированного алмаза. Размер имплантированных участков соответствует размеру ячеек используемой маски  $40 \mu\text{m}$ .

Структурная характеристика исходного и имплантированных участков алмаза проводилась методом дифракции отраженных электронов при зондировании приповерхностной области образца. В отличие от дифракции Кикучи в виде полос, параллельных плоскостям кристаллической решетки алмаза, для областей, облученных ионами бора, в картине дифракции наблюдаются только широкие диффузные кольца, указывающие на разрушение кристаллической решетки в приповерхностном слое имплантированного алмаза и формирование аморфных углеродных образований.



**Рис. 2.** *a* — АСМ-изображение поверхности фрагмента алмазной дифракционной решетки в областях необлученной перегородки алмаза (темная часть рисунка) и имплантированных ячеек (светлые части рисунка); светлой линией указано направление измерения поперечного сечения. *b* — профиль поперечного сечения, измеренный по направлению, указанному на *a*.

На рис. 2, *a* приведено АСМ-изображение фрагмента алмазного ДОО вблизи стенки (темная область) между имплантированными ячейками (светлые шероховатые области). На рис. 2, *b*, показан профиль поперечного сечения, измеренный по направлению, указанному на рис. 2, *a*. Из рисунка следует, что имплантированные ионами бора участки поверхности алмаза (ячейки) возвышаются над поверхностью алмаза на  $\sim 100$  nm. Такой эффект объясняется распуханием облученных участков (ячеек решетки) образца, характеризующихся меньшей плотностью ( $\rho_{\text{graphite}} = 2.09\text{--}2.23 \text{ g/cm}^3$ ) по сравнению с алмазом (неграфитизированным материалом;  $\rho_{\text{diamond}} = 3.47\text{--}3.55 \text{ g/cm}^3$ ) [13]. Измерение рамановских спектров при возбуждении аргоновым лазером на длине волны 522 nm также подтверждает разрушение алмаза, поскольку в спектре, наряду с хорошо известной для алмаза интенсивной линией  $1336 \text{ cm}^{-1}$  [14], после имплантации появляются более слабые линии в области  $1560 \text{ cm}^{-1}$ , указывающие на его графитизацию [13]. В результате имплантации алмаза ионами бора и разрушения его решетки следовало бы ожидать образования карбида бора при связывании атомов



**Рис. 3.** Изображение картины дифракционного рассеяния на экране, полученное на отражение от алмазной решетки при зондировании гелий-неоновым лазером. Образец с алмазной решеткой закреплен на металлическом держателе.

углерода и бора. Однако соответствующих кристаллитам карбида бора характерных линий в рамановском спектре в определенной области от  $200$  и до  $1200\text{ см}^{-1}$  [15] обнаружено не было. Тем не менее, как следует из работы [16], отдельные химические связи или малые фрагменты, состоящие из атомов бора и углерода, напрямую не распознаваемые рамановской спектроскопией, могут присутствовать в графитизированных областях имплантированного ионами бора алмаза.

Имплантация алмаза ионами бора ведет как к изменению химического состава (накопление бора в образце), так и к модификации его фазовой углеродной структуры, т.е. образованию периодических областей графитизированного материала. В результате имплантации алмаза через поверхностную маску формируется микроструктура с периодически изменяемым распределением оптических констант материала, т.е. между стенками решетки из алмаза (с показателем преломления  $n_{\text{diamond}} = 2.42$ ) и графитизированными ячейками ( $n_{\text{graphite}} = 2.1-2.23$ ). Поэтому сформированная периодическая микроструктура с графитизированными областями на алмазе может быть использована на практике в качестве двумерного фотонного кристалла или ДОЭ. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведено дифракционное изображение, регистрируемое при зондировании алмазной решетки гелий-неоновым

лазером на длине волны 632.8 nm света на отражение. Очевидно, что, манипулируя режимами ионной имплантации, меняя тем самым эффективный показатель преломления отдельных областей в ДОО, можно управлять его оптическими и дифракционными характеристиками.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрен процесс низкоэнергетической высокодозовой имплантации алмаза ионами бора через поверхностную маску и продемонстрирована методика создания ДОО на его основе при низкоэнергетической высокодозовой ионной имплантации через поверхностную маску. В результате на поверхности алмаза получена дифракционная микроструктура, фазовый контраст в которой обеспечивается графитизированными областями алмаза. Основным практическим применением полученных результатов является развитие направления и создание новых эффективных элементов алмазной оптики.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ № 15-48-02525.

## Список литературы

- [1] Раткин Л. // Фотоника. 2011. № 4. С. 18–23.
- [2] Сойфер В.А. Методы компьютерной оптики. М.: Физматлит, 2003.
- [3] Коненко В.В., Конов В.И., Пименов С.М. и др. // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 1. С. 9–10.
- [4] Karlsson M., Nikolajeff F. // Opt. Express. 2003. V. 11. P. 502–507.
- [5] Тужмаков К.Н., Володин Б.О., Павельев В.С. и др. // Вестник Самарского аэрокосмического госуниверситета. 2012. Т. 7. В. 38. С. 112–116.
- [6] Shvydko Y., Stopin S., Blank V., Terentev S. // Nat. Photon. 2011. V. 5. P. 539–542.
- [7] Веревкин Ю.К., Бронникова Н.Г., Королихин В.В. и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. С. 99–102.
- [8] Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Сойфер В.А. Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазоподобных подложках: Патент РФ № 2197006. 2003.
- [9] Stepanov A.L., Galyautdinov M.F., Evlyukhin A.V. et al. // Appl. Phys. A. 2013. V. 111. P. 261–264.
- [10] Степанов А.Л., Нурждин В.И., Валеев В.Ф., Галютдинов М.Ф., Осин Ю.Н. Дифракционная решетка: Патент РФ № 140494. 2014.
- [11] Галютдинов М.Ф., Нурждин В.И., Фаттахов Я.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 4. С. 30–37.

- [12] Курбатова Н.В., Галяутдинов М.Ф., Иванов Н.А и др. // ФТТ. 2013. Т. 55. В. 9. С. 1784–1787.
- [13] Хмельницкий Р.А. Радиационное повреждение и графитизация алмаза при ионной имплантации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2008. 97 с.
- [14] Deslandes A., Guenette M.C., Belay K. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2015. V. 365. P. 331–335.
- [15] Hushur A., Manghani M., Werheit H. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2016. V. 28. P. 045403 (1–5).
- [16] Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. // J. Am. Ceram. Soc. 2011. V. 94. P. 3605–3628.