

12.1

Субволновые текстурированные поверхности для вывода излучения из волновода

© Г.В. Вознюк^{1,2}, И.Н. Григоренко^{1,3}, М.И. Митрофанов^{1,2,4}, В.В. Николаев¹, В.П. Евтихийев^{1,2}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: glebufa0@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 12 января 2022 г.

Принято к публикации 13 января 2022 г.

Продemonстрирована технология создания текстурированных поверхностей методом ионно-лучевого травления сфокусированным пучком на подложках GaAs (100). Показана возможность гибкого управления формой и профилем формируемых субмикронных элементов текстурированных сред, что впоследствии позволит создать текстурированные поверхности практически любой сложности для реализации поверхностного вывода излучения из волновода. Разработаны оригинальные литографические шаблоны и проведена трехмерная литография. Контроль сформированных литографических рисунков осуществлялся методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: ионно-лучевое травление, метаповерхность, текстурированная поверхность, литография, поверхностный вывод излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52214.19103

Создание лазеров с поверхностным выводом излучения широко востребовано во многих областях. Например, для задач спектроскопии и газоанализа требуются эффективные источники лазерного излучения в ИК-области спектра [1]. Среди всех типов лазерных конструкций наибольшую добротность и малую расходимость излучения в дальнем поле имеют лазеры с кольцевым резонатором [2]. В настоящее время существует ряд подходов по реализации поверхностного вывода излучения: нанесение на поверхность волновода дифракционных порядков [3], формирование фотонных кристаллов [4], создание метаповерхностей [3]. Все эти методы требуют высокой точности и однородности изготовления (например, штрихи дифракционной решетки), а также являются сложными и дорогостоящими в производстве.

Альтернативным подходом в создании поверхностно-излучающих кольцевых лазеров может стать формирование текстурированных поверхностей на поверхности лазерного волновода. Некоторые теоретические работы свидетельствуют о перспективности использования текстурированных поверхностей для эффективного ввода излучения [5,6]. Кроме того, текстурированные поверхности могут использоваться в качестве шаблона для создания гибридных плазмонно-диэлектрических структур [7].

Принцип действия текстурированных поверхностей основан на создании плавно меняющегося (градиентного) показателя преломления на границе волновод/воздух, что позволяет на несколько порядков снизить отраже-

ние и осуществить поверхностный вывод излучения. Достоинствами такого подхода являются возможность вывода излучения без изменения изначального модового состава лазера, нетребовательность к высокой однородности изготовления отдельных элементов, входящих в состав текстурированной поверхности. Примером текстурированной поверхности может служить двумерный массив, состоящий из элементов конусообразной формы (пирамидок). Главными требованиями к элементам текстуры являются субволновые размеры по отношению к выводимому излучению и как можно более плавное сужение элемента от его основания к вершине для того, чтобы избежать возникновения скачка показателя преломления, а следовательно, условия для отражения света [5]. На рис. 1 показан принцип действия текстурированной поверхности применительно к поверхностному выводу излучения из волновода. Для создания текстурированных поверхностей мы использовали метод ионно-лучевого травления сфокусированным ионным пучком (СИП). Литография проводилась на разработанной ЗАО „НТО“ совместно с НТЦ микроэлектроники РАН установке ионно-лучевого травления СИП в сверхвысоковакuumном исполнении „FIB-FEB UHV System“, оборудованной ионной колонной модели „Cobra“ производства компании Orsay Physics. Разрешающая способность растрового ионного микроскопа, согласно паспортным данным, составляет 2.5 nm. В качестве мишени для травления были выбраны полуизолирующие подложки GaAs (100).

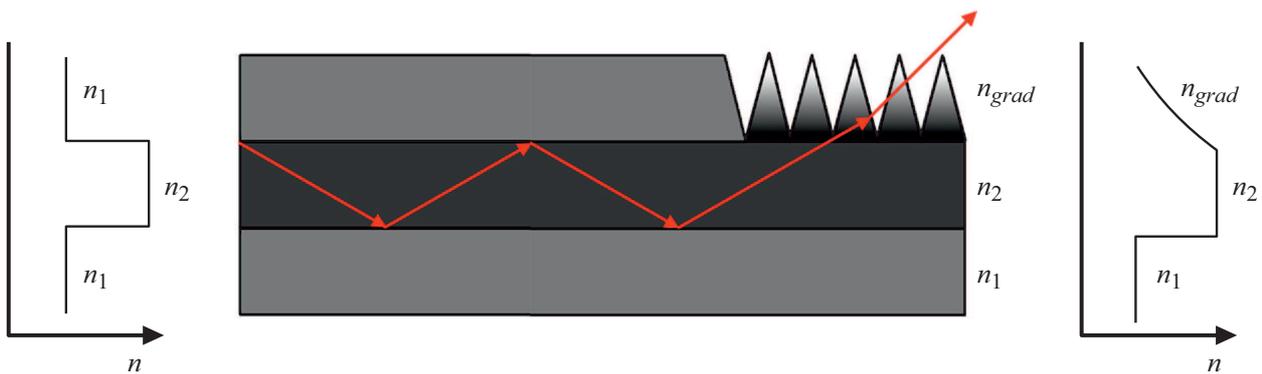


Рис. 1. Принцип действия текстурированной поверхности, сформированной в верхнем слое волновода. Левая часть волновода представляет собой обычный волновод, где в результате полного внутреннего отражения свет остается запертым внутри волновода. Правая часть волновода содержит текстурированную поверхность, которая создает плавно меняющийся (градиентный) показатель преломления, в результате осуществляется вывод излучения через поверхность.

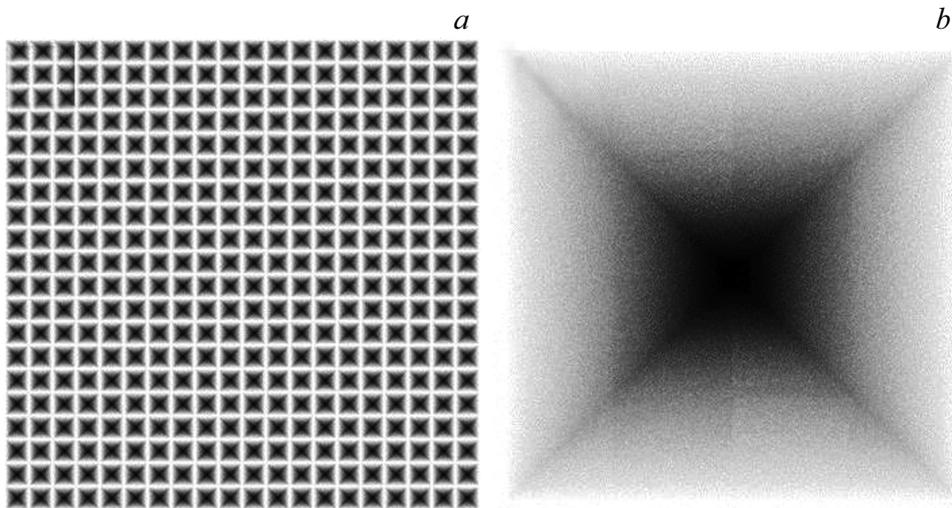


Рис. 2. Литографический шаблон, использующийся при формировании текстурированной среды методом ионно-лучевой литографии СИП. *a* — общий вид литографического шаблона, *b* — увеличенное изображение одного элемента (пирамидки) из массива.

Для отработки режимов травления текстурированных поверхностей методом ионно-лучевой литографии СИП был проведен ряд подготовительных работ. С помощью системы автоматизированного проектирования Kompas 3D и графических редакторов (Photoshop, GIMP) были спроектированы и подготовлены литографические шаблоны для ионно-лучевого литографа. На рис. 2 представлен пример разработанного литографического шаблона размером $25 \times 25 \mu\text{m}$, содержащий двумерный массив пирамидок. Принцип травления по представленному шаблону заключается в плавном увеличении времени экспонирования сфокусированным пучком поверхности при переходе от центра пирамидки к ее краям. Градации серого цвета, из которых состоит шаблон, задают время экспонирования, что в свою очередь определяет форму профиля и тип основания формиру-

емой пирамидки. Время экспозиции изменялось от 0 с (черный пиксель) до $5 \cdot 10^{-5}$ s (белый пиксель). Была проведена серия экспериментов по подбору технологических параметров литографического процесса. Наилучшей шероховатости травленной поверхности ($> 2 \text{ nm}$) и однородности элементов текстуры при относительно невысоких временных затратах удалось достичь при рабочем токе 150 pA, максимальном времени экспозиции $5 \cdot 10^{-5}$ s и перекрытии ионного пучка 75%. Литография проводилась в присутствии газа-прекурсора XeF_2 для эффективного удаления остаточных продуктов травления.

Изображения текстурированной поверхности, сформированной методом травления СИП Ga^+ с энергией 30 keV, полученные с помощью оптической и электронной микроскопии, представлены на рис. 3, *a, b*. Профиль

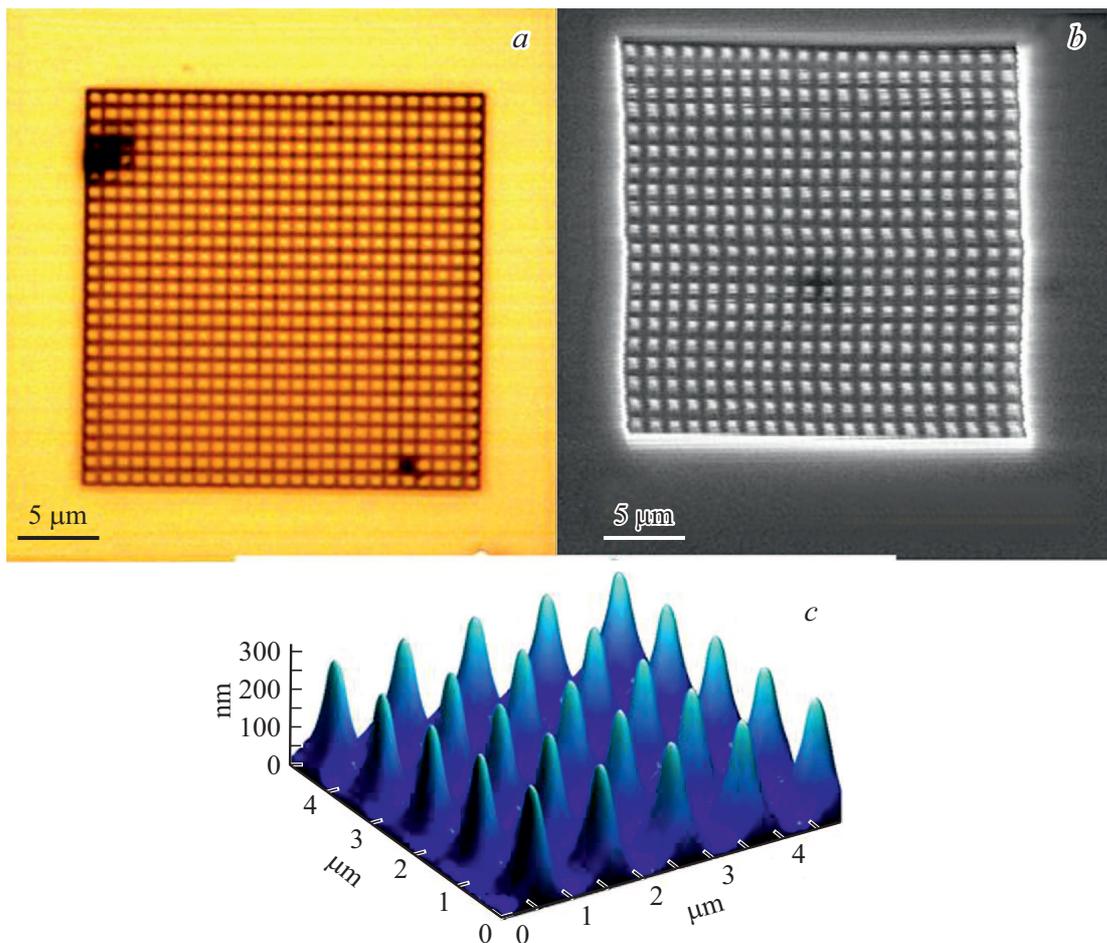


Рис. 3. Изображения текстурированной поверхности, изготовленной в GaAs методом СИП Ga^+ с энергией 30 keV, полученные с помощью оптической (a) и сканирующей электронной (b) микроскопии. c — трехмерный профиль поверхности, записанный с помощью атомно-силовой микроскопии с участка размером $5 \times 5 \mu\text{m}$.

поверхности, записанный при помощи сканирующего зондового микроскопа модели „Смена“ производства компании NT-MDT, приведен на рис. 3, c.

По результатам проведенного исследования были разработаны литографические шаблоны различного типа сложности, отработаны технологические режимы ионно-лучевой литографии СИП Ga^+ . Определены оптимальные параметры технологического процесса, позволяющие добиться высокого качества формируемых текстурированных поверхностей. Сформированы двумерные массивы пирамидок с размерами основания одного элемента $\sim 500 \text{ nm}$ и высотой элемента $\sim 300 \text{ nm}$ на подложках GaAs (100). Контроль вытравленных поверхностей осуществлялся методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии. Показана перспективность применения СИП для прототипирования субмикронных элементов, имеющих сложную геометрию. В дальнейшем планируется провести эксперименты по травлению СИП субмикронных и субволновых текстурированных поверхностей на поверхности волноводов и

исследовать возможность поверхностного вывода излучения из таких волноводов.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 21-12-00304).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Popa, F. Udrea, *Sensors*, **19**, 2076 (2019). DOI: 10.3390/s19092076
- [2] R. Szedlak, C. Schwarzer, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, W. Strasser, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 151105 (2014). DOI: 10.1063/1.4871520
- [3] R. Szedlak, C. Schwarzer, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, W. Strasser, *Opt. Express*, **22**, 15829 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.015829

- [4] J. Semmel, L. Nähle, S. Höfling, A. Forchel, Appl. Phys. Lett., **91**, 071104 (2007). DOI: 10.1063/1.2771054
- [5] A. Deinega, I. Valuev, B. Potapkin, Yu. Lozovik, J. Opt. Soc. Am. A, **28**, 770 (2011). DOI: 10.1364/JOSAA.28.000770
- [6] J.A. Dobrowolski, D. Poitras, P. Ma, H. Vakil, M. Acree, Appl. Opt., **41**, 3075 (2002). DOI: 10.1364/AO.41.003075
- [7] J. Gallant, M.A. Kaliteevski, D. Wood, M.C. Petty, R.A. Abram, S. Brand, G.P. Swift, D.A. Zeze, J.M. Chamberlain, Appl. Phys. Lett., **91**, 161115 (2007). DOI: 10.1063/1.2800381