

УДК 535.354:621.373.8

ТРЕХМЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ И НАНОРАЗМЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОННЕКТОРЫ

© 2020 г. А. Г. Витухновский^{1, 2, *}, Р. Д. Звагельский¹, Д. А. Колымагин¹,
А. В. Писаренко¹, Д. А. Чубич¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vitukhnovsky@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Для создания трехмерных оптических коннекторов, соединяющих планарные волноводы из нитрида кремния, использован метод прямого лазерного письма. Проведено сопоставление морфологии и оптических свойств созданных структур. Гибридные трехмерные оптические коннекторы позволяют успешно заводить свет от эффективных источников одиночных фотонов на основе коллоидных квантовых точек и азотно- и кремний замещенных вакансий (NV и Si центры) в алмазе, инкорпорированных в создаваемые полимерные PWB, в планарные волноводы для последующего использования в фотонных интегральных схемах.

DOI: 10.31857/S0367676520070339

ВВЕДЕНИЕ

Передача данных в центрах обработки данных и глобальных сетях преимущественно основана на оптических методах, в то время как хранение и обработка данных в основном осуществляются в электронном виде. По этой причине требуются оптоэлектронные системы (межсоединения волоконно-чип, чип-чип, оптические системы на чипе и т.д.) способные снизить потери при преобразовании, передаче и обработке сигналов, а также увеличить общую скорость работы. Параллельно с этим квантовые технологии постепенно завоевывают свое место в вычислительных системах. Способные решить задачи, которые не под силу классическим компьютерам, квантовые системы требуют особых технологических решений для сопряжения квантовых и оптоэлектронных систем.

Разнообразные фотонные системы активно используются в различных приложениях, но их конструкции являются двумерными из-за ограничений литографических техник. В работе продемонстрированы потенциальные возможности метода прямого лазерного письма (direct laser writing – DLW) для решения подобных задач на примере создания трехмерных полимерных световодов на полупроводниковом фотонном чипе. Лазерные методы прямого письма особенно привлекательны для изготовления трехмерных микроструктур.

Среди методов трехмерной печати прямым лазерным письмом, двухфотонная полимеризация (two-photon polymerization – TPP) обладает уникальным набором характеристик. Во-первых, поскольку пространственное ограничение полимеризации является неотъемлемым свойством TPP, в изготовлении трехмерных микроструктур отсутствуют топологические ограничения. Во-вторых, размеры элементов, ограниченные субдифракцией, могут варьироваться изменением интенсивности лазера. В-третьих, дополнительные компоненты структур могут быть легко созданы без использования вытравливаемых слоев. И, наконец, полимерные материалы, могут быть использованы в качестве химического инструмента для изготовления структур с регулируемыми физическими и химическими свойствами, такими как твердость, усадка, показатель преломления и химическая активность. Благодаря своим преимуществам, процесс TPP быстро превратился из новинки в области микро- и нанобработки в полезный инструмент для создания уникальных структур и устройств.

ДУХФОТОННАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

Интерес к созданию трехмерных микро- и наносистем обусловлен рядом новых требований для приложений в таких разных областях, как фотони-

ка, микро- и наноэлектроника, микрофлюидика, микромеханика, тканевая инженерия и многих других. Во всех этих областях исследований требуется быстрое создание функционирующих прототипов структур и систем с произвольной сложной геометрией. На сегодняшний день существует большое множество разнообразных технологий печати микро- и наноструктур, предоставляющих большой выбор между материалами для печати и позволяющих печатать структуры различных размеров (от нескольких нанометров до сантиметров). За последние 20 лет были разработаны и усовершенствованы разнообразные технологии прямого письма, способные создавать трехмерные объекты большой сложности с высоким пространственным разрешением [1–5].

Лазерные методы прямого письма особенно привлекательны для изготовления трехмерных микроструктур [6]. В зависимости от длины волны лазерного излучения и от того, является ли оно непрерывным или импульсным, возбуждаются различные физические и химические процессы, которые лежат в основе создания и обработки практически любых материалов. Кроме того, продолжающееся технологическое развитие лазеров делает эти источники света более надежными, менее дорогими и более простыми в эксплуатации, тем самым снижая барьеры их использования в научных и прикладных целях.

Первые работы в области фотополимеризации, индуцированной нелинейно-оптическим процессом (многофотонное поглощение), предполагали, что число фотонов, участвующих в возбуждении фотоинициаторов, равнялось двум. Основываясь же на большом количестве экспериментальных данных, теперь очевидно, что количество поглощенных фотонов может составлять два и более в зависимости от условий лазерного возбуждения и типа фотоинициатора. Первая трехмерная диэлектрическая микроструктура, изготовленная ТРР, представлена в статье Ленцера и его коллег [7]. Эта статья в некотором смысле отмечает начало области исследований ТРР в том виде, в каком она существует сейчас.

Трехмерная оптическая литография DLW обеспечивает локальную и четко определенную обработку многих классов материалов для создания произвольных структур. Хорошо изученные процессы, лежащие в основе DLW методов, и возможность точного контроля излучения лазера, сделали методы DLW очень успешными в области микро- и нанопроизводства. Способность избирательно, локально модифицировать свойства данного материала на микро- или наномасштабе является одним из основных преимуществ методов DLW. Подобное локально-селективное трехмерное микро- и нанопроизводство практически недостижимо для стандартных литографических методов, требую-

щих несколько этапов маскирования и травления. Как подчеркивали Ливингстон и Хельваджян, фотолитография основывается на обработке области равномерным потоком фотонов, в то время как DLW использует неоднородный, но локально оптимизированный поток фотонов [8]. Этот оптимизированный поток фотонов может состоять из последовательности лазерных импульсов, каждый из которых может иметь заданную амплитуду, ширину импульса, длину волны и поляризацию. Таким образом возможен точный пространственный и временной контроль доставки лазерной энергии к каждому вокселю материала. Никакая другая технология обработки или прямого письма не может приблизиться к уровню точности и избирательности методов DLW в средствах доставки энергии, необходимой для того, чтобы вызвать локальное изменение свойств материала. Именно этот аспект дает методам прямого лазерного письма уникальные возможности в области нанесения и модификации материалов.

Первый прибор, реализующий метод прямого лазерного письма с использованием двухфотонной полимеризации, был представлен в 1996 г. [9, 10]. В качестве резиста был использована УФ-фоточувствительная смола, прозрачная для падающего ИК света (770 нм). Падающее лазерное излучение не поглощалось вне области фокусировки (вокселя) в объеме смолы, т.е. не происходила полимеризация нежелательных областей. Современные [11, 12] литографические системы, реализующие такой метод печати, имеют схожее с первым таким прибором устройство: под управлением компьютера излучение ИК лазера фокусируется в объеме резиста на подложке, которая в свою очередь установлена на двухкоординатный столик с пьезопозиционером (рис. 1). Использование принципа двухфотонной полимеризации приводит к значительному улучшению разрешения: двухфотонное поглощение требует, чтобы сумма энергий двух фотонов соответствовала энергии перехода между основным и возбужденным состояниями фотоинициатора, который в свою очередь запускает процесс полимеризации. Вероятность такого перехода имеет квадратичную зависимость от интенсивности излучения, которое в свою очередь локально ограничено в фокальном объеме (вокселе), что позволяет получать полимеризованные объемные элементы с субмикронным разрешением (от 100 нм в латеральном направлении и от 300 нм в аксиальном). Управляя движением области фокусировки лазерного излучения, можно генерировать полимерные 3D структуры произвольного объема и геометрий. В этом и заключается особенность и уникальность данного метода. Возможность генерации произвольных трехмерных структур с субмикронным разрешением открывает ранее недоступные возможности для приложений оптики, электроники, микромеханики и многих

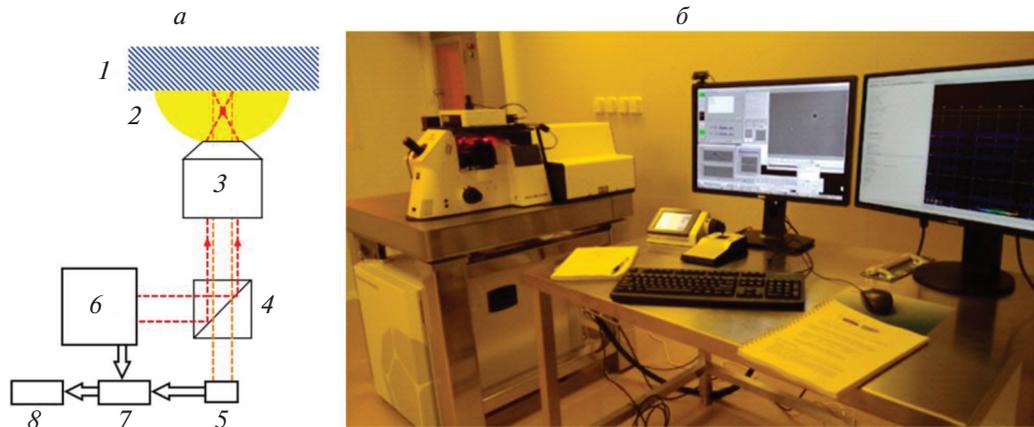


Рис. 1. Оптическая схема установки для трехмерной оптической литографии методом прямого лазерного письма DLW (а): 1 – подложка, 2 – резист, 3 – объектив, 4 – дихроидный лучеразделитель, 5 – датчик, 6 – ИК лазер, 7 – блок согласования, 8 – компьютер. Фотография установки для трехмерной оптической литографии Nanoscribe Photonics Professional (б).

других. Также возможно генерирование 3D разнородных структур путем смешивания исходного резиста с различными, модифицирующими свойства полимера (электропроводность, коэффициент преломления, химическая активность и т.д.), добавками.

ПЛАНАРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ФОТОННОГО ЧИПА

Фотонный чип в данной работе состоял из следующих оптических компонентов: полоскового волновода, сужения на конце полоскового волновода, Y-делителя пучка, устройства сопряжения с оптическим волокном на основе брэгговского дифракционного соединителя. Все планарные элементы фотонного чипа изготавливались из нитрида кремния на поверхности окисленного кремния в едином технологическом процессе и кратко будут рассмотрены в данной главе.

Для практических применений, таких как передача электромагнитного излучения между фотонными устройствами на одном чипе, свет необходимо направлять в плоскости чипа. Для этой цели в работе используются одномодовые полосковые волноводы. В такой геометрии волновода, распространение света ограничено в плоскости чипа ядром волновода. Отличие полоскового от плоского волновода состоит в том, что электромагнитные поля мод не являются чисто поперечными из-за изменяющейся геометрии волноводов. Таким образом, в таком волноводе нет чистых ТЕ или ТМ-поляризованных мод. Из-за дополнительной сложности, вызванной продольными полями, точные решения волновых уравнений не могут быть найдены аналитически. Поэтому необходимо использовать численные методы для на-

хождения постоянных распространения и профилей полей мод.

До сих пор предполагалось, что профиль и форма волновода не изменяются вдоль направления распространения света. Для трехмерных волноводных структур это не верно. В переходе между полимерным и полосковым волноводами форма волновода значительно изменяется. Для длительного “возмущения”, изменяющегося медленно вдоль оси распространения света, моды невозмущенных волноводов являются локально хорошими приближениями к решениям возмущенного волновода. Эти решения называются локальными модами. Для того чтобы свет оставался в первоначально возбужденной моде волновода, который меняет свою форму вдоль направления распространения, наиболее очевидным способом было бы уменьшение количества управляемых мод, в идеале до одной. В свою очередь потери мощности от первоначально возбужденной моды можно уменьшить с увеличением адиабатичности изменения профиля показателя преломления. Иными словами, конец волновода перед переходом 2D–3D со стороны полоскового волновода должен быть сужающимся с высоким соотношением сторон. Это достигалось плавным сужением ширины планарного полоскового волновода в месте сопряжения с полимерным волноводом вплоть до ширины 100 нм.

Помимо распространения излучения в волноводах фотонной цепи на оптическом чипе с низкими потерями, важное значение имеет эффективное сочленение с оптоволоком для ввода лазерного излучения и вывода излучения из чипа к фотоприемникам и различным оптическими системами. В данной работе для решения

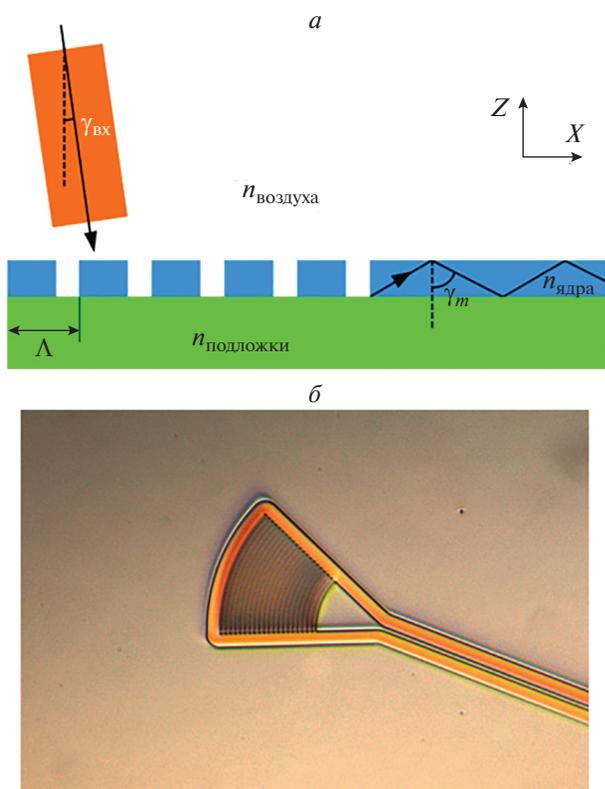


Рис. 2. Схематическое изображение дифракционного соединителя (а). Изображение дифракционного соединителя и части полоскового волновода в оптическом микроскопе (б).

этой задачи использовались дифракционные соединители [13].

Соединитель состоит из кругового сегмента с брэгговской круговой решеткой из материала волновода Si_3N_4 (рис. 2). Такое устройство работает аналогично одномерной брэгговской решетке. Для объяснения принципа работы такой дифракционной решетки, рассмотрим одномерную брэгговскую решетку. Как только излучение попадает на такую решетку сверху, оно дифрагирует в дискретный набор угловых максимумов, соответствующих различным порядкам дифракции. Это связано с интерференцией волн исходящих от каждого ребра, образующих решетку, происходящей только под определенными дискретными углами γ , обусловленными условием Брэгга [14]:

$$\Lambda (\sin(\gamma_{\text{вх}}) - n_{\text{ядра}} \sin(\gamma_m)) = m\lambda. \quad (1)$$

С учетом уравнения, связывающего эффективный показатель преломления $n_{\text{эф}}$ с характеристическим углом $\gamma_m(\theta_m)$, условие Брэгга можно переписать в виде:

$$\Lambda (\sin(\gamma_{\text{вх}}) - n_m^{\text{эф}}) = m\lambda. \quad (2)$$

Таким образом, для заданного периода решетки Λ , угла падения $\gamma_{\text{вх}}$, длины волны λ и порядка m Брэгга через решетку может возбуждаться только волноводная мода с эффективным индексом, удовлетворяющим условию Брэгга. Как можно видеть из уравнения (2), изменение периода решетки Λ сдвигает длину волны λ максимума пропускания. В нашем случае максимум пропускания был настроен на длину волны 1550 нм.

Для измерений и оценки качества пропускания через трехмерный волновод, необходимы относительные измерения, т.е. сравнение исследуемого сигнала с опорным. Для этой цели входной сигнал должен был быть поровну поделен для двух частей нанопотонной цепи. Это достигалось с помощью Y делителей излучения (рис. 2), которые обеспечивают хорошую эффективность деления и высокую воспроизводимость при изготовлении. Параметры Y делителей были подобраны исходя из уже отработанной и оптимизированной технологии создания таких устройств, морфология контролировалась с помощью атомно-силовой микроскопии, а коэффициент деления мощности излучения пополам проверялся на тестовых структурах.

Таким образом, планарные компоненты фотонного чипа позволяют завести лазерное излучение с телекоммуникационной длиной волны с помощью обычного оптоволокна, разделить излучение на две равные части и обеспечить вытеснение электромагнитного излучения из полоскового волновода за счет его сужения. Для оптимизации процесса эффективного преобразования излучения из планарного волновода при переходе в трехмерный полимерный волновод, потребовалось провести численное моделирование распространения излучения в подобных гибридных оптических коннекторах.

ТРЕХМЕРНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОННЕКТОРЫ

Для передачи света с малыми потерями через 3D волновод от одного полоскового волновода к другому необходима оптимизация геометрии и структуры переходов 2D–3D и самого полимерного волновода. Ключевым элементом сопряжения является переход полосковый-полимерный (2D–3D) волновода. Для эффективного соединения полосковых волноводов с трехмерным оптическим волноводом, вносимые потери при переходе между волноводами должны быть достаточно низкими. Эти потери вызваны двумя эффектами: рассеивание света на шероховатых изогнутых гранях трехмерного волновода и несоответствие профилей мод в полосковом и трехмерном волноводах. Для улучшения модального согласования, полосковый волновод адиабатически сужается в переходной области. Оптимальные геометрические параметры для переходной части 3D волновода были

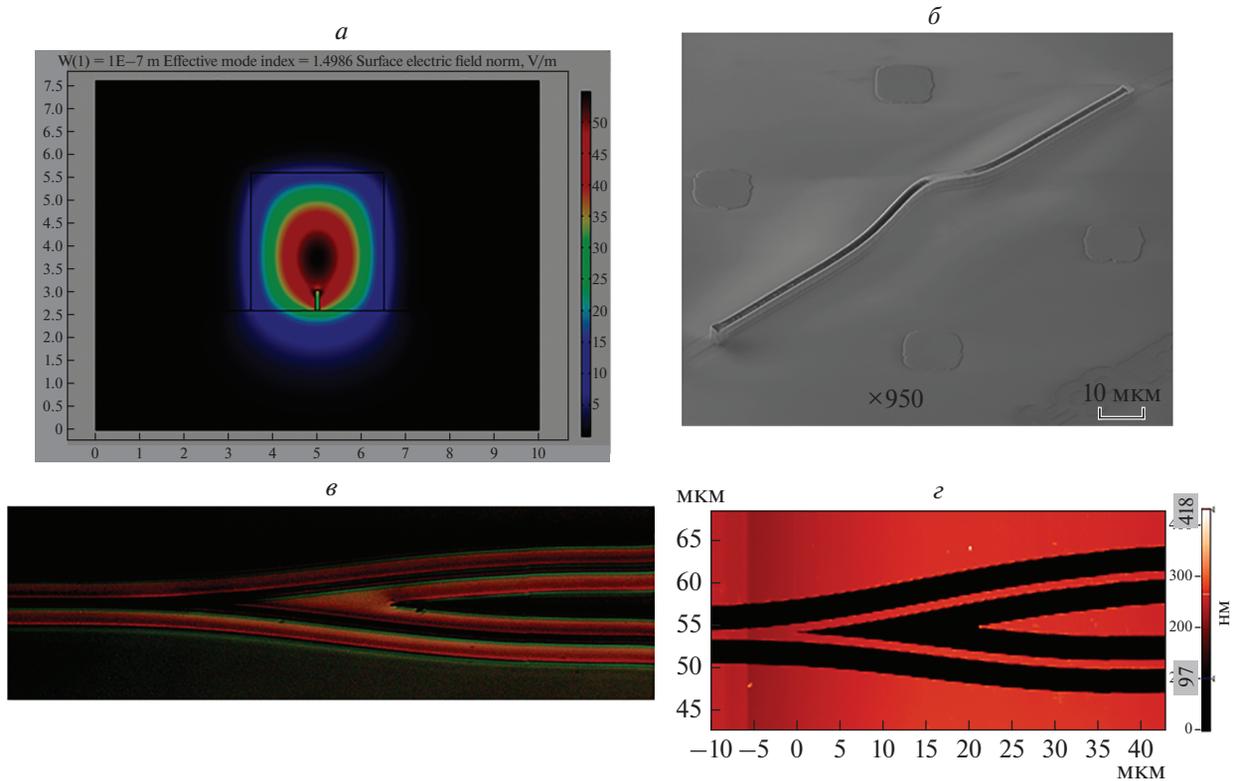


Рис. 3. Результат моделирования методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics распределения напряженности электрического поля по сечению полимерного волновода (*а*). Изображение в растровом электронном микроскопе полимерного волновода на фотонном чипе (*б*). Изображение Y-разветвителя в оптическом микроскопе (*в*). Изображение Y-разветвителя в атомно-силовом микроскопе (*г*).

найденны с помощью численного решения дифференциальных уравнений в пакете моделирования COMSOL Multiphysics. При моделировании использовалась дисперсионная кривая показателя преломления полимера IP-dip, полученная экстраполяцией по формуле Коши с учетом значений для видимой области из статьи [15]. По результатам моделирования было показано, что сечение волновода должно быть квадратным с длиной стороны 3 мкм, а также что полимерный волновод должен полностью охватывать всю адиабатически сужающуюся область полоскового волновода. Эти параметры позволяют переносить свет с минимальными потерями для излучения с длиной волны 1550 нм. Соответствующее распределение амплитуды электрического поля в поперечном сечении полимерного волновода вблизи конца планарного волновода представлено на рис. 3а.

При распространении электромагнитного излучения в трехмерном волноводе, важными размерными параметрами, влияющими на эффективность распространения света, помимо размеров самого волновода, являются однородность показателя преломления вдоль сечения волновода, шероховатость поверхности волновода и радиус кривизны полимерного волновода. Для обеспечения

однородности показателя преломления внутри волновода использовался следующий прием: с помощью трехмерной оптической литографии рисовалась только оболочка волновода толщиной два вокселя. Таким образом, с помощью двухфотонной фотополимеризации создавалась замкнутая поверхность, которая на этапе экспонирования была заполнена жидким фоторезистом IP-dip. После стандартной процедуры проявки и удаления незасвеченного фоторезиста в растворителях PGMEA и изопропанол, тем не менее, незасвеченный фоторезист внутри замкнутой поверхности волновода оставался. В дальнейшем для получения более механически устойчивых волноводов использовался прием пространственно-нелективного засвечивания с помощью ультрафиолетового излучения, что приводило к образованию однородного по объему полимерного волновода. При определении максимальной высоты поднятия волновода над поверхностью фотонного чипа учитывалось, что радиус кривизны волновода не может превышать предельное для данного материала значение. Именно этим обстоятельством определяется предельная высота поднятия полимерного волновода при заданном расстоянии между его концами. Для уменьшения шероховатости поверхности фо-

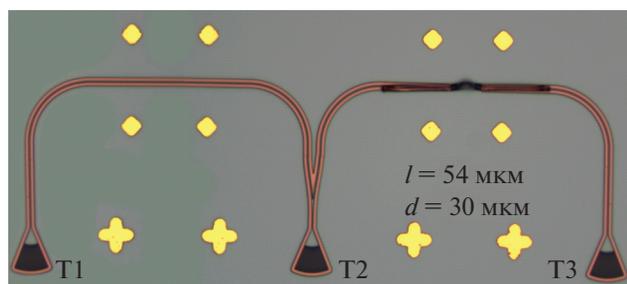


Рис. 4. Изображение в оптическом микроскопе фрагмента фотонного чипа — опорный канал (слева) и основной канал, включающий полимерный волновод.

тонного провода использовались следующие подходы — шаг по горизонтали (70 нм) выбирался менее латеральных размеров вокселя (120 нм), и параметры оптической литографии — доза и скорость прямого лазерного письма выбирались таким образом, чтобы получить минимальную шероховатость поверхности. Среднеквадратичная шероховатость поверхности волновода определялась экспериментально с помощью методики атомно-силовой микроскопии и типичное значение для исследуемых в работе волноводов составляло 7 нм, что более чем на 2 порядка меньше используемой длины волны излучения.

Морфология наноразмерных оптических коннекторов и точность совмещения планарных волноводов и трехмерных волноводов контролировалась с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 3б).

Для измерений прохождения света через наноразмерные оптические коннекторы использовался непрерывный перестраиваемый в спектральном диапазоне 1510–1620 нм лазер. Схема измерений была оснащена механическим поляризационным манипулятором для согласования поляризации падающего из волокна излучения с модой планарного волокна. Зонд содержит волоконный массив, состоящий из восьми одномодовых волокон с фиксированным расстоянием в 250 мкм. Волокна выровнены на один уровень и наклонены к поверхности фотонного чипа на угол 8° . Держатель чипа и зонд установлены на столике с пьезоприводами под компьютерным управлением — таким образом, можно точно контролировать высоту и положение зонда относительно поверхности чипа. После прохождения через чип, свет снова попадает через дифракционный соединитель в волокно и детектируется малошумящим фотодетектором.

В процессе измерения спектра пропускания нанофотонная схема (рис. 4) использовалась таким образом: в центральный терминал (Т2) заводится лазерное излучение из волокна и с помощью Y делителя поровну распределяется по двум

плечам нанофотонной схемы. Одно плечо представляет собой сплошной полосковый волновод, оканчивающийся другим терминалом (Т1) из которого излучение выходит к оптоволокну и далее к фотодатчику. Другое плечо содержит 3D полимерный волновод, соединяющий полосковый волновод от Y делителя с волноводом, идущим к терминалу (Т3), из которого излучение выходит и идет по волокну через коннектор к фотодатчику. Таким образом оценка потерь и пропускания в полимерном трехмерном волноводе производится путем сравнения цепи с полимерным волноводом и без разрыва. Также мы принимаем, что потери на полосковых волноводах малы по сравнению с остальными частями схемы (ввиду их высокого качества), потери на трех переходах терминал-волокно равны и более весомые потери с большей вероятностью возникают именно в полимерном волноводе и в местах сопряжения планарных волноводов и трехмерных оптических коннекторов. По результатам измерений пропускания полимерных структур можно сделать заключение о достаточно эффективном пропускании света предложенными структурами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы возможности метода прямого лазерного письма двухфотонной полимеризацией для решения задач создания оптически совместимых систем на примере 3D полимерных волноводов, напечатанных на фотонном чипе. Свобода дизайна, предлагаемая данным методом, была использована для изготовления 3D полимерных оптических компонентов, которые не могут быть легко реализованы стандартными литографическими методиками.

Осуществлена оптимизация структуры и формы волноводов, а также переходов между полосковым волноводом из нитрида кремния и трехмерным полимерным волноводом. Методом тестовой печати полимерных структур на кремниевой подложке был осуществлен подбор оптимальных параметров печати, обеспечивающих достаточную механическую устойчивость, прочность структуры, а также гладкость поверхности волноводов. В целом была проведена работа по поиску оптимальных параметров, которые позволяют снизить потери излучения на полимерном волноводе (включая его переходы с полосковыми).

Произведены печать оптимизированных волноводов на фотонном чипе и измерения пропускания волноводов по сравнению с полосковым волноводом. Полученные результаты показали наличие серьезного дефекта в случае не полностью протравленного слоя Si_3N_4 вокруг полосковых волноводов: пропускание полимерного волновода в таком случае оказалось сравнимым с пропусканием полного разрыва полоскового вол-

новода. Для случая полностью протравленного слоя нитрида кремния для зазора 60 мкм продемонстрировано пропускание полимерного волновода порядка 1% по сравнению с неразрывным планарным волноводом.

Проделанная работа показывает высокую перспективность развивающихся методов прямого письма, особенно тех, что используют двухфотонную полимеризацию. Благодаря новым методам и технологиям аддитивного производства становятся возможными ранее недоступные сложные гибридные оптические, электрические и механические микро- и наноустройства и структуры. Высокая скорость производства и качество готовых приложений позволяют реализовать идеи и концепты структур и целых устройств с минимальными затратами времени и ресурсов. Также была продемонстрирована перспективность идеи создания оптических 3D переходов с помощью полимерных волноводов. Эту идею можно в перспективе развить до создания разнородных гибридных оптических систем объединяющих, к примеру, разнородные фотонные чипы с расположенными на них системами (фильтрами, резонаторами, фотонными кристаллами, интегральными лазерами, фотодатчиками и т.д.) соединенных с помощью таких полимерных волноводов.

Авторы благодарят Центр коллективного пользования МФТИ за помощь со сканирующей электронной микроскопией. Финансовая поддержка предоставлена Российским научным фондом по проекту № 17-79-20418 (3D моделирование и стереолитография) и проектами РФФИ № 18-29-20129, 18-02-00811 (проверка PWB).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pique A., Chrisey D.B.* Direct-write technologies for rapid prototyping applications: sensors, electronics, and integrated power sources. N.Y.: Academic Press, 2002. 726 p.
2. *Church K.H., Fore C., Feeley T.* // MRS Proc. 2000. V. 624. P. 3.
3. *Mueller B.* // Assembly Autom. 2012. V. 32. № 2.
4. *Zhang Y., Liu C., Whalley D.* // Proc. of the ICEPT-HDP 2009 (Beijing, 2009). P. 497.
5. *Guo N., Leu M.C.* // Front. Mech. Eng. 2013. V. 8. № 3. P. 215.
6. *Vaezi M., Seitz H., Yang S.* // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. V. 67. P. 1721.
7. *Lenzner M., Kruger J., Kautek W., Krausz F.* // Appl. Phys. A. 1999. V. 68. P. 369.
8. *Livingston F.E., Helvajian H.* // MRS Bull. 2007. V. 32. № 1. P. 40.
9. *Maruo S., Nakamura O., Kawata S.* // Opt. Lett. 1997. V. 22. № 2. P. 132.
10. *Maruo S., Kawata S.* // J. Microelectromech. S. 1998. V. 7. № 4. P. 411.
11. *Baldacchini T.* Three-dimensional microfabrication using two-photon polymerization: fundamentals, technology and applications. Amsterdam-Boston: William Andrew, 2015. 485 p.
12. *Chubich D.A., Zvagelsky R.D., Kolymagin D.A. et al.* // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2064. Art. № 030002.
13. *Tailaert D., Van Laere F., Ayre M. et al.* // Jap. J. Appl. Phys. 2006. V. 45. № 8A. P. 6071.
14. *Kokubun Y., Iga K.* Encyclopedic handbook of integrated optics. CRC Press, 2005. 528 p.
15. *Gissibl T., Wagner S., Sykora J. et al.* // Opt. Mater. Expr. 2017. V. 7. № 7. P. 2293.