

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.514.2

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПУЧКОВ СВЕТА С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

© 2016 г. А. В. Медведев; А. А. Дукин; Н. А. Феоктистов, канд. физ.-мат. наук;
В. Г. Голубев, доктор физ.-мат. наук

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург
E-mail: medvedev@gvg.ioffe.ru

Методом плазмохимического газофазного осаждения изготовлен люминесцентный асимметричный планарный волновод на основе пленки аморфного карбида кремния микронной толщины, нанесенной на круглую кварцевую подложку с прозрачной цилиндрической боковой поверхностью. В асимметричном планарном волноводе при возбуждении фотолюминесценции в спектрах излучения с боковой поверхности подложки зарегистрированы пики линейно (P и S) поляризованного излучения, обусловленные излучением в модах утечки планарного волновода. Сферическое зеркало преобразовывало излучение, выходящее с боковой поверхности подложки образца, помещенного в центр зеркала, в цилиндрический пучок света. Исследованы спектры P - и S -поляризованного излучения в разных точках сечения цилиндрического пучка. Показано, что цилиндрический пучок обладает радиальной и азимутальной поляризациями.

Ключевые слова: планарный волновод, спектр мод, фотолюминесценция, поляризация, моды утечки, цилиндрические пучки, радиальная поляризация, азимутальная поляризация

Коды OCIS: 230.7390, 030.4070 130.5440, 250.5230 130.5440

Поступила в редакцию 13.04.2016

Введение

Цилиндрические пучки света с аксиально-симметричным распределением поляризации имеют уникальные свойства фокусировки [1]. Такие пучки с радиальной или азимутальной поляризацией [1–3] могут использоваться, например, в оптической микроманипуляции [4] и возбуждении поверхностных плазмонов [5].

Радиально-поляризованный пучок может быть сфокусирован в пятно меньшего размера, чем неполяризованный свет, при этом в фокусе возникает сильная пространственно-локализованная компонента продольного поля [6, 7]. У азимутально-поляризованного пучка в фокальной плоскости возникает узкое световое кольцо [8]. Такие свойства оптической фоку-

сировки находят применение в создании изображений с высоким разрешением, таких как микроскопия второй и третьей оптических гармоник [9, 10], темнопольная микроскопия [11], а также в создании оптических пинцетов [4].

Существуют разные способы генерации пучков света с аксиально-симметричной поляризацией. Большинство из них основано на введении внутрь лазерного резонатора дополнительных оптических элементов, например, конической брестеровской призмы [3] или нескольких двулучепреломляющих и фазовых элементов [2], приводящих к формированию заданной структуры поляризации. Получение таким способом пучков с аксиально-симметричной поляризацией сопряжено со многими техническими трудностями, связанными с необходимостью фазовой и поляризационной манипуляции

гауссовых мод. Кроме того, в них жестко заданы длина волны и вид поляризации.

Еще одним способом получения пучков света с радиальной и азимутальной поляризацией является использование мод утечки люминесцентного асимметричного планарного волновода (АПВ) [12]. Такой волновод представляет собой люминесцентную пленку, окруженную двумя средами, имеющими разные показатели преломления (рис. 1а). Оптические свойства люминесцентных АПВ исследовались в ряде работ [13–15]. Излучение из люминесцентной пленки выходит с боковой поверхности подложки под очень малыми углами к границе пленка–подложка [13]. В спектре эмиссии наблюдаются пики линейно *P*- и *S*-поляризованного излучения, связанные с модами утечки [13, 16]. На модах утечки получена лазерная генерация [12, 17]. Данное излучение можно использовать для получения пучков света с аксиально-симметричным распределением поляризации (рис. 1б). Как будет показано далее, лучи с *S*-поляризацией можно преобразовать в пучки с азимутальной

поляризацией, а с *P*-поляризацией – в пучки с радиальной поляризацией.

В качестве светоизлучающего материала для волновода может быть использован аморфный карбид кремния ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$) [18, 19]. Карбид кремния является перспективным материалом для создания оптоэлектронных приборов, так как эффективно излучает при комнатной температуре, имеет большой показатель преломления и малые потери света в видимом диапазоне длин волн. Ширина запрещенной зоны $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ зависит от концентрации углерода. Варьируя его содержание можно плавно изменять ширину запрещенной зоны в широком диапазоне от 1,8 до 3,6 эВ и, как следствие, варьировать спектральное положение максимума фотолюминесценции (ФЛ) от 2 до 3 эВ [18, 20], при этом показатель преломления изменяется в диапазоне от 2 до 3 [21]. Аморфный карбид кремния применяется для создания оптических микрорезонаторов [22, 23]. По данным атомно-силовой микроскопии шероховатость поверхности пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ не превышает 1 нм. Исследование резонансных особенностей в спектрах отражения микрорезонаторов на основе аморфных кремниевых материалов, полученных методом плазмохимического газофазного осаждения, показало, что рассеяние света на шероховатостях поверхности вносит незначительный вклад в ширину резонансных особенностей, которым можно пренебречь по сравнению с другими причинами уширения [24].

Целью настоящей работы является демонстрация возможности применения люминесцентного планарного волновода на основе аморфного карбида кремния, излучающего в модах утечки, в создании цилиндрического светового пучка с радиальной и азимутальной поляризацией.

Методика эксперимента

В работе получен и исследован люминесцентный АПВ на основе пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ($x = 0,5$) толщиной около 1,1 мкм. Пленка $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ наносилась на подложку методом плазмохимического газофазного осаждения [22]. Параметры технологического процесса были следующие: рабочее давление 0,1–0,2 Торр, частота высокочастотного излучения 17 МГц, плотность высокочастотной мощности 0,03–0,1 Вт/см², температура подложки 200–250 °С, суммарный поток газовой смеси 5–10 норм. см³/мин. Толщина пленки контролировалась в процессе роста ме-

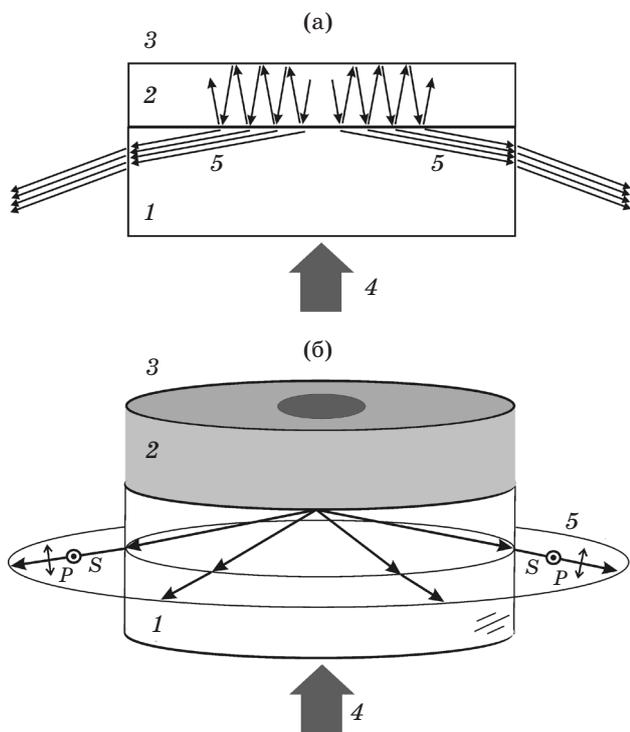


Рис. 1. Люминесцентный АПВ. 1 – подложка, 2 – пленка, 3 – воздух, 4 – лазерный луч, возбуждающий ФЛ в пленке $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. (а) 5 – моды утечки в подложку, распространяющиеся в пленке $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и выходящие через боковую поверхность подложки. (б) 5 – аксиально-симметричные пучки, выходящие через боковую цилиндрическую поверхность подложки.

тодом *in situ* интерферометрии. В качестве подложки использовалась круглая пластинка плавящего кварца диаметром 20 и толщиной 1 мм.

Для измерения спектров ФЛ использован управляемый компьютером дифракционный решеточный монохроматор МДР-23. В качестве фотоприемника использован фотоумножитель ФЭУ-79, подключенный к дистанционно управляемому широкополосному предварительному усилителю тока. Возбуждение ФЛ осуществлялось He-Cd лазером ЛПМ-11 мощностью 7 мВт и длиной волны излучения 442 нм в центре образца по нормали к поверхности пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (рис. 1б). Фотолюминесценция регистрировалась в разных геометриях: с боковой цилиндрической поверхности подложки, по нормали к пленке и в разных точках кольцевого сечения цилиндрического пучка.

Для формирования цилиндрического пучка образец размещался в фокусе сферического зеркала (на рис. 2а приведено его сечение). Со стороны пленки и со стороны подложки были

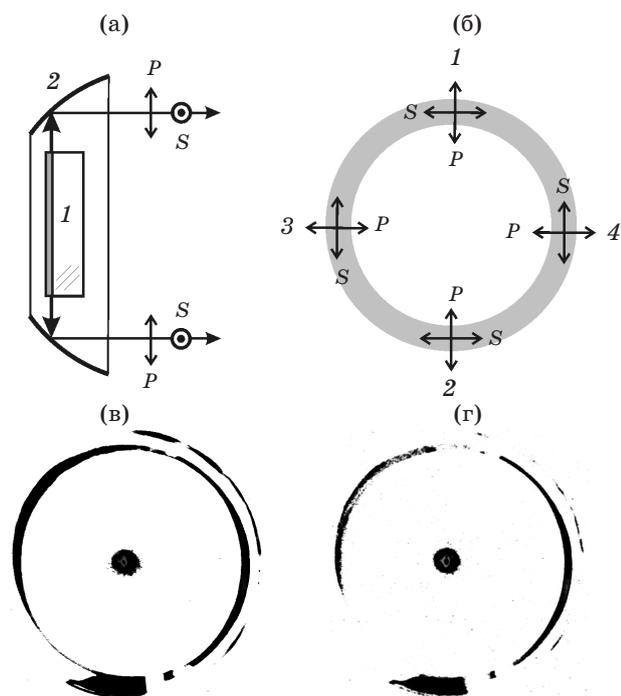


Рис. 2. Схема эксперимента (а). 1 – образец, 2 – сегмент сферического зеркала. P и S обозначают поляризацию света. Поперечное сечение цилиндрического светового пучка (б). Стрелки указывают направление поляризации в четырех разных точках поперечного сечения пучка (1, 2, 3, 4 – верхняя, нижняя, левая и правая соответственно), в которых зарегистрированы спектры ФЛ. Фотографии светового пучка, снятые через фильтры OC14 (в) и KC19 (г), соответственно.

приклеены маски из непрозрачного материала с целью подавления ФЛ карбида кремния по нормали к поверхности образца. В центре маски, приклеенной к подложке, имелось отверстие для входа лазерного излучения и возбуждения ФЛ в центре образца. Диаметры лазерного пучка и отверстия в маске на передней поверхности образца соответствовали приблизительно 3 мм, плотность мощности возбуждающего излучения составляла около $0,1 \text{ Вт/см}^2$.

Излучение в модах утечки распространялось по радиусу круглой подложки и выходило из ее боковой цилиндрической поверхности.

Положение образца относительно фокуса сферического зеркала регулировалось и подбиралось таким образом, чтобы зеркало собирало излучение в цилиндрический световой пучок (рис. 2а) и направляло его в сторону регистрирующего объектива. Объектив перемещался в двух взаимно перпендикулярных направлениях в вертикальной плоскости, пересекающей цилиндрический световой пучок перпендикулярно к оси пучка, и фокусировал заданную малую область пучка на входную щель спектрометра. Таким образом, спектры ФЛ регистрировались в четырех симметричных (относительно оси цилиндра) точках вертикального поперечного сечения цилиндрического пучка: верхней, нижней, левой и правой (рис. 2б).

Фотографии цилиндрического пучка получены с помощью фотокамеры Canon 1000D. Его штатный блокирующий фильтр перед светочувствительной матрицей был заменен на более длинноволновый инфракрасный фильтр – Baader Planetarium. Для блокирования излучения возбуждающего лазера и для выделения исследуемых мод применялись дополнительные фильтры – OC14 и KC19, размещенные перед фотокамерой. Фильтр OC14 пропускает свет с длиной волны более 600 нм, а фильтр KC19 – более 720 нм. Снимок на рис. 2в сделан через фильтр OC14 с выдержкой 4 с, а снимок на рис. 2г – через фильтр KC19 с выдержкой 4 мин. Большое время экспозиции в последнем случае связано с падением спектральной чувствительности матрицы фотокамеры в области длин волн более 680 нм.

Результаты и обсуждение

Пленка $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (с показателем преломления $n_2 = 2,16$ на длине волны $\lambda = 740 \text{ нм}$), окруженная с одной стороны подложкой (с показателем

преломления $n_1 = 1,45$), с другой – воздухом (с показателем преломления $n_3 = 1$), образует АПВ ($n_2 > n_1 > n_3$, рис. 1а). Луч лазера возбуждает люминесценцию в пленке $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. Световые волны, испущенные из точки внутри пленки под углами большими, чем угол полного внутреннего отражения в случае границы пленка–воздух, но меньшими, чем угол полного внутреннего отражения на границе пленка–подложка, полностью отражаются от границы с воздухом и преломляются на границе пленки с подложкой, проникая в нее (рис. 1а). То есть они распространяются как моды утечки [25].

При таких модах граница пленки с воздухом образует зеркало с коэффициентом отражения, равным единице. Граница с подложкой играет роль второго зеркала. При углах падения, близких к углу полного внутреннего отражения, коэффициент отражения от этой границы близок к единице. Таким образом, пленка действует как высокодобротный оптический микрорезонатор [15].

Спектр спонтанной эмиссии из пленки в подложку под скользящими углами к границе пленка–подложка имеет набор пиков линейно (P и S) поляризованного излучения, максимумы которых совпадают с длинами волн мод утечки [13, 16]. Моды группируются в пары с одним номером m и разной поляризацией (P и S).

На рис. 3а приведены поляризованные и неполяризованные спектры ФЛ пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. В спектре 1, зарегистрированном по нормали к поверхности образца (без масок), видна широкая полоса ФЛ карбида кремния. Спектры 2, 3, 4 зарегистрированы с боковой поверхности подложки под скользящим углом к границе пленка–подложка. В спектре 2, записанном без поляризатора, отчетливо видны четыре пика в областях 770, 740, 646, 630 нм. Спектр 3, зарегистрированный через поляризатор в S -компоненте поляризации, содержит два пика с максимумами 770, 646 нм. Спектр 4, зарегистрированный через поляризатор в P -компоненте поляризации, содержит два пика на длинах волн 740, 630 нм. Таким образом, спектр излучения пленки имеет четыре пика с линейной поляризацией. Максимальная степень поляризации составила 80%. Минимальная зарегистрированная ширина пика в S -компоненте – менее 3 нм.

На рис. 3б приведены рассчитанные спектры излучения в модах утечки. Расчет выполнен по методу амплитуд поля, создаваемых случайны-

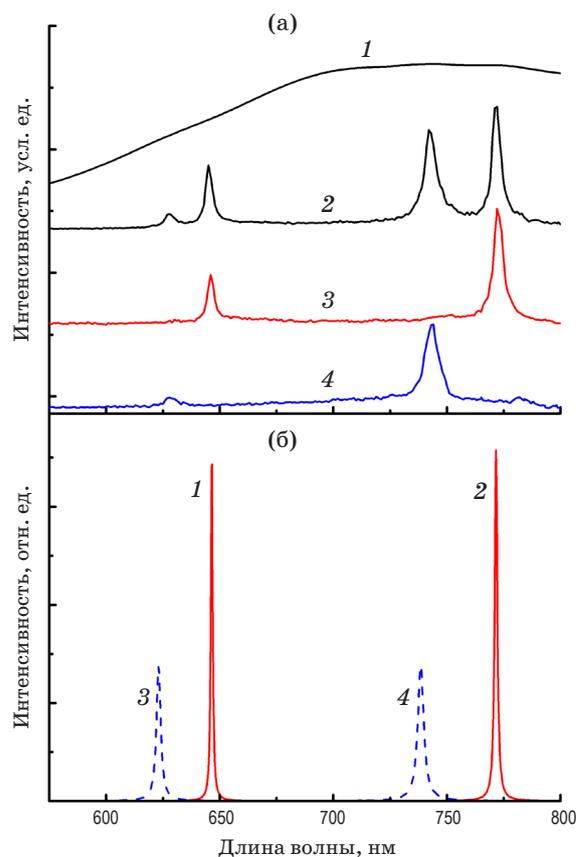


Рис. 3. Спектры ФЛ (а), зарегистрированные без поляризатора по нормали к поверхности образца (1) и с боковой поверхности подложки (2), зарегистрированные через поляризатор в S - (3) и P - (4) компоненте с боковой поверхности подложки. Спектры сдвинуты по вертикальной оси для ясности. Рассчитанные спектры ФЛ с боковой поверхности подложки с пленкой (б) при S -поляризации и $m = 6$ (1), $m = 5$ (2), при P -поляризации и $m = 6$ (3), $m = 5$ (4).

ми поляризационными токами [26]. Спектры представляют собой набор пиков линейно (P и S) поляризованного излучения, соответствующих модам утечки $m = 5, 6$. Сопоставление пиков в экспериментальных спектрах (рис. 3а) и в рассчитанных (рис. 3б) показывает, что одна пара пиков в области длин волн 770–740 нм соответствует моде $m = 5$, вторая пара в области длин волн 646–630 нм – моде $m = 6$.

Небольшое отличие спектрального положения пиков ФЛ в рассчитанных спектрах по сравнению с экспериментальными спектрами возможно связано с дисперсией показателя преломления $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, которая не учитывалась в расчете.

Излучение в модах утечки возбуждается в центре образца и выходит по круговой конической поверхности с углом раствора конуса,

близким к 180° (рис. 1б). Угол раствора конуса незначительно меняется после выхода света из боковой цилиндрической поверхности круглой подложки. С помощью сферического зеркала излучение преобразуется в кольцевой цилиндрический пучок света (рис. 2а).

На рис. 2в, г приведены фотографии полученного пучка. Изображение на рис. 2в получено с использованием фильтра ОС14, что позволило выделить моды излучения $m = 5, 6$. Снимок рис. 2г сделан с использованием фильтра КС19, что позволило выделить только моды излучения $m = 5$. На обоих изображениях видно тонкое кольцо света. Это доказывает формирование цилиндрического пучка ФЛ пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в модах утечки. Второе более слабое кольцо света с большим диаметром возможно связано с рассеянием света. Яркая точка в центре кольца – это излучение пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, выходящее из отверстия в маске, через которое осуществляется возбуждение ФЛ лазерным лучом.

Излучение выделенной небольшой области кольца затем направлялось через поляризатор, с помощью которого выделялись лучи с заданной поляризацией. Для анализа распределения поляризации в полученном цилиндрическом пучке спектры ФЛ зарегистрированы в четырех симметричных относительно оси цилиндра точках вертикального поперечного сечения цилиндрического пучка: верхней, нижней, левой и правой (см. рис. 2б). Ось поляризатора, служащая для выделения P - и S -компонент спектра (рис. 2б), поворачивалась на 90° при переходе из левой и правой точек к верхней и нижней точкам, так как при этом поворачивается плоскость падения света в волноводе. Во всех четырех спектрах, снятых в разных точках, имеются одни и те же две пары пиков ФЛ с P - и S -поляризацией: 740 (P) и 770 (S) нм, 630 (P) и 646 (S) нм (рис. 4). Видно, что пики с максимальной интенсивностью одного номера моды имеют одну и ту же длину волны и один и тот же тип поляризации: 740 и 630 нм при P -поляризации, 770 и 646 нм при S -поляризации во всех точках. Кроме того, в спектрах присутствуют дополнительные пики ФЛ в точках: 740 (S), 770 (P), 630 (S) и 646 (P) нм. Они имеют меньшую амплитуду, а их существование, вероятно, связано с недостаточно точной юстировкой положения образца относительно сферического зеркала и с тем, что точки на сечении пучка, где измерялись спектры, немного

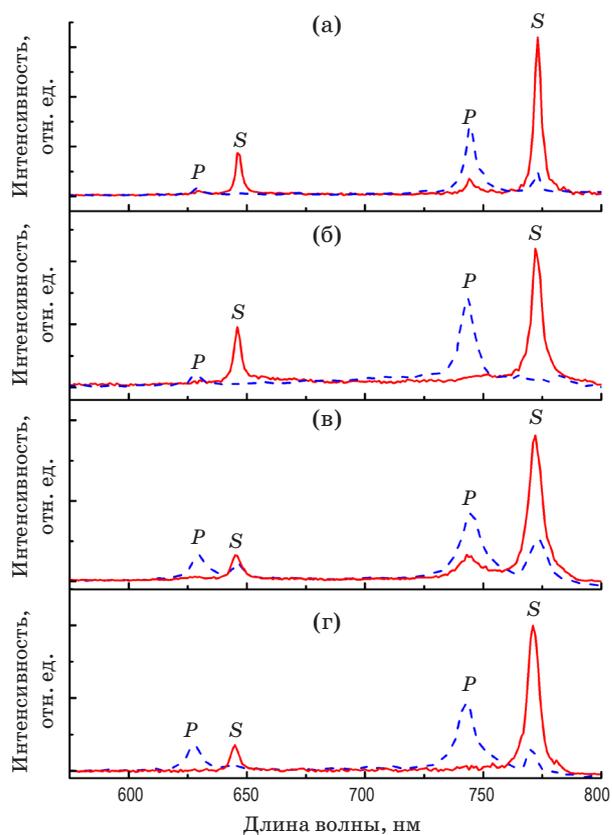


Рис. 4. Спектры ФЛ, зарегистрированные в S - и P -поляризации. На рисунке обозначения P и S указывают преимущественную поляризацию. Спектры зарегистрированы в четырех разных точках – левая (а), правая (б), верхняя (в) и нижняя (г), соответственно, на сечении цилиндрического пучка перпендикулярной плоскостью (см. рис. 2б).

смещены по кольцу от расчетных положений, обозначенных на рис. 2б.

В целом вид спектров остается похожим в разных точках. Сохранение вида спектров (спектрального положения и типа поляризации пиков ФЛ с максимальной интенсивностью одного номера моды) при переходе от одной точки поперечного сечения цилиндрического пучка к другой подтверждает формирование цилиндрических пучков света с радиальной (соответствует P) и азимутальной (соответствует S) поляризацией.

Для получения светового пучка с заданной (радиальной или азимутальной) поляризацией необходимо выделить только одну моду. Это можно сделать, например, с помощью оптического фильтра.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована методическая возможность формирования цилиндрических пучков света

с радиальной и азимутальной поляризацией, используя моды утечки АПВ. Асимметричный планарный волновод на основе аморфного карбида кремния использован в качестве модельного объекта, поскольку $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ излучает в широкой полосе от 550 до 900 нм, что позволяет получить излучение одновременно в нескольких модах утечки, имеет большой показатель преломления $n = 2,16$ и существует возможность нанесения тонких пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ на стандартном технологическом оборудовании.

Квантовый выход люминофора и степень перекрытия спектра его ФЛ со спектром используемых мод утечки оказывают влияние на эффективность преобразования возбуждающего излучения лазера в генерируемые моды утечки. Для увеличения эффективности преобразования необходимо применять люминофоры, обладающие наилучшими характеристиками по каждому из этих параметров. Возможными кандидатами могут стать квантовые точки, ионы редкоземельных элементов и др. Увеличить интенсивность ФЛ аморфного карбида кремния можно, повысив содержание углерода в пленке $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ до $x = 0,73$ [27]. Энергетические возможности АПВ на основе пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ лимитированы нагревом пленки под действием возбуждающего лазерного излучения, что приводит к температурному гашению ФЛ [27]. Эффективность предложенного метода ограничена потерями, обусловленными преобразованием части излучения в волноводные

и излучательные моды, поглощением излучения в материале волновода, рассеянием на неровностях границ волновода и др.

Заключение

Предложен метод формирования цилиндрических пучков света с радиальной и азимутальной поляризацией использованием моды утечки планарного асимметричного волновода. Для этого применен светоизлучающий планарный волновод – тонкая пленка аморфного карбида кремния на подложке в форме диска, помещенный в сферическое зеркало.

Пленка аморфного карбида кремния ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, $x = 0,5$) толщиной 1,1 мкм нанесена на кварцевую подложку методом плазмохимического газофазного осаждения. В спектрах фотolumинесценции с боковой поверхности подложки обнаружены пики линейно (P и S) поляризованного излучения в области 630–770 нм. Эти пики идентифицированы как излучение в модах утечки.

С помощью сферического зеркала излучение мод утечки с номерами $m = 5, 6$ преобразовано в цилиндрический пучок света. Исследовано распределение поляризации в сечении полученного цилиндрического пучка. Показано, что излучение с P -поляризацией формирует пучок света с радиальной поляризацией, а излучение с S -поляризацией – с азимутальной. Степень поляризации достигает 80%.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhan Q. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications // Adv. Opt. Phot. 2009. V. 1. № 1. P. 1–57.
2. Oron R., Blit Sh., Davidson N., Friesem A., Bomson S., Hasman E. The formation of laser beams with pure azimuthal or radial polarization // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 21. P. 3322–3324.
3. Kozawa Y., Sato Sh. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 22. P. 3063–3065.
4. Scelton S.E., Sergides M., Saija R., Iati M.A., Marago O.M., Jones P.H. Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams // Opt. Lett. 2013. V. 38. № 1. P. 28–29.
5. Hennemann L.E., Kolloch A., Kern A., Mihaljevic J., Boneberg J., Leiderer P., Meixner A.J., Zhang Dai. Assessing the plasmonics of gold nano-triangles with higher order laser modes // Beilstein J. Nanotechnol. 2012. V. 3. № 1. P. 674–683.
6. Dorn R., Quabis S., Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. № 23. P. 233901-1–233901-4.
7. Quabis S., Dorn R., Eberler M., Glöckl O., Leuchs G. Focusing light to a tighter spot // Opt. Commun. 2000. V. 179. № 1–6. P. 1–7.
8. Zhan Q., Leger J.R. Focus shaping using cylindrical vector beams // Opt. Exp. 2002. V. 10. № 7. P. 324–331.

9. *Biss D.P., Brown T.G.* Polarization-vortex-driven second-harmonic generation // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. № 11. P. 923–925.
10. *Bautista G., Huttunen M.J., Kontio J.M., Simonen J., Kauranen M.* Third- and second-harmonic generation microscopy of individual metal nanocones using cylindrical vector beams // *Opt. Exp.* 2013. V. 21. № 19. P. 21918–21923.
11. *Biss D.P., Youngworth K.S., Brown T.G.* Dark-field imaging with cylindrical-vector beams // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. № 3. P. 470–479.
12. *Ellenbogen T., Wang D., Crozier K.B.* Generation of quasi-coherent cylindrical vector beams by leaky mirrorless laser // *Opt. Exp.* 2012. V. 20. № 27. P. 28862–28870.
13. *Valenta J., Ostatnický T., Pelant I., Elliman R.G., Linnros J., Honerlage B.* Microcavity-like leaky mode emission from a planar optical waveguide made of luminescent silicon nanocrystals // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 96. № 9. P. 5221–5225.
14. *Luterova K., Skopalova E., Pelant I., Rejman M., Ostatnický T., Valenta J.* Active planar optical waveguides with silicon nanocrystals: Leaky modes under different ambient conditions // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100. № 7. P. 074307-1–074307-4.
15. *Penzkofer A., Holzer W., Tillmann H., Hörhold H.H.* Leaky-mode emission of luminescent thin films on transparent substrates // *Opt. Commun.* 2004. V. 229. № 1–6. P. 279–290.
16. *Yokoyama D., Moriwake M., Adachi Ch.* Spectrally narrow emissions at cutoff wavelength from edges of optically and electrically pumped anisotropic organic films // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. № 12. P. 123104-1–123104-13.
17. *Blinov L.M., Cipparrone G., Pagliusi P., Lazarev V.V., Palto S.P.* Mirrorless lasing from nematic liquid crystals in the plane waveguide geometry without refractive index or gain modulation // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 031114-1–031114-3.
18. *Ma T., Xu J., Chen K., Du J., Li W.* Full color light emission from amorphous $\text{SiC}_x\text{:H}$ with organic-inorganic structures // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 88. № 11. P. 6408–6412.
19. *Sussmann R.S., Ogden R.* Photoluminescence and optical properties of plasma-deposited amorphous $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ alloys // *Phyl. Mag. Part B.* 1981. V. 44. № 1. P. 137–158.
20. *Tawada Y., Tsuge K., Kondo M., Okamoto H., Hamakawa Y.* Properties and structure of a-SiC:H for high efficiency a-Si solar cell // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. № 7. P. 5273–5281.
21. *Summonte C., Rizzoli R., Bianconi M., Desalvo A., Iencinella D., Giorgis F.* Wide band-gap silicon-carbon alloys deposited by very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 96. № 7. P. 3987–3997.
22. *Медведев А.В., Феоктистов Н.А., Грудинкин С.А., Дукин А.А., Голубев В.Г.* Планарные светоизлучающие микрорезонаторы на основе гидрогенизированного аморфного карбида кремния // *ФТП.* 2014. Т. 48. № 10. С. 1409–1415.
23. *Chen D., Xu J., Qian B., Chen S., Mei J., Li W., Xu L., Chen K.* Luminescence behavior from amorphous silicon-carbide film-based optical microcavities // *Mater. Chem. Phys.* 2008. V. 111. № 2–3. P. 279–282.
24. *Dukin A.A., Feoktistov N.A., Golubev V.G., Medvedev A.V., Pevtsov A.B., Sel'kin A.V.* Polarization splitting of optical resonant modes in a-Si:H/a-SiO_x:H microcavities // *Phys. Rev. E.* 2003. V. 67. № 4. P. 046602-1–046602-7.
25. *Ярич А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 308 с.
26. *Голубев В.Г., Медведев А.В., Певцов А.Б., Селькин А.В., Феоктистов Н.А.* Фотолюминесценция тонких пленок аморфно-нанокристаллического кремния // *ФТТ.* 1999. Т. 41. № 1. С. 153–158.
27. *Васильев В.А., Волков А.С., Мусабегов Е., Теруков Е.И., Челноков В.Е., Чернышев С.В., Шерняков Ю.М.* Фотолюминесценция аморфных пленок a-Si_{1-x}C_x:H // *ФТП.* 1990. Т. 24. № 4. С. 710–716.