
 ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 519.2; 621.396

PACS: 42.81.Qb, 42.82.-m, 52.50.Sw,
52.25.-b, 81.16.Rf, 85.40.Sz

Многослойные светоотражающие оболочки на основе кварцевого стекла, легированного фтором, для планарных волноводных оптических структур с нитрид-кремниевой и оксинитридной сердцевиной

В. Ш. Берикашвили, И. П. Шилов, Л. Ю. Кочмарев, Н. П. Зубков

Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию интегрально-оптических волноводов на основе кварцевого стекла, легированного фтором, при помощи не-изотермической плазмы резонансного локального СВЧ-разряда на волне H_{10} . Отработанная технология предназначена для создания планарных волноводов с сердцевиной из нитрида или оксинитрида кремния и $SiO_2 + F$ оболочки. Достигнуты высокие скорости осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, на кремниевые подложки (вплоть до 1 мкм/мин), что может резко повысить производительность труда на данном перделе в микроэлектронике.

Ключевые слова: интегральная оптика, планарные оптические волноводы, кремниевые пластины, многослойные оптические структуры нитрида кремния в кварце, волоконные световоды, микроэлектроника, радиофотоника.

Ссылка: Берикашвили В. Ш., Шилов И. П., Кочмарев Л. Ю., Зубков Н. П. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 98.

Reference: V. Sh. Berikashvili, I. P. Shilov, L. Yu. Kochmarev, and N. P. Zubkov, Prikl. Fiz., No. 6, 98 (2018).

Введение

В настоящее время оптоэлектроника развивается наиболее интенсивно в направлении применения волоконной оптики в приложении к телекоммуникационным системам [1, 2, 4, 6]. Вместе с тем появляются новые интегрально-оптические приложения для сенсорных и управляющих устройств [1, 5, 7]. По сравнению с оптическими волокнами и оптоволоконными системами фотон-

ные интегральные схемы (ФИС) могут обеспечить улучшенные характеристики по компактности, стабильности производительности и габаритам, причём при меньших технологических нагрузках и меньших затратах [5, 7].

Многие целевые приложения ФИС, например, оптические фильтры многоканальных сетей связи, резонаторы, квантовые усилители и мультиплексоры/демультиплексоры, датчики скорости вращения в виде оптического гироскопа, оптические буферы и сети фазированной антенной решетки радиолокатора [5–10], требуют больших оптических длин пути и стабильности высокого качества [10–12]. Помимо увеличения требований к качеству, технологической надёжности и производительности, для этих приложений необходимы планарные оптические волноводы со сверхнизкими потерями на распространение при малых потерях на изгибах [12–16]. Обычно такие планарные волноводы выполняются на плоскости в виде спирали Архимеда с большим количеством витков высокой плотности. Длина такого волновода достигает 8,5 м на подложке диаметром 3–5 см. При этом радиус изгиба в центре спирали достигает 0,5 мм, что приводит к большим изгибным потерям. Эти потери можно уменьшить только за счет высокой разницы показателей преломления между сердцевиной n_c и светоотражающей оболочкой n_o .

Берикашвили Валерий Шалвович¹, профессор, д.т.н.

Шилов Игорь Петрович², в.н.с., к.т.н.

Кочмарев Леонид Юрьевич², с.н.с.

Зубков Николай Петрович³, нач. отделения, к.т.н.

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4.

E-mail: berikashvily@yandex.ru

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 141190, г. Фрязино Московской обл.,

пл. акад. Введенского, 1.

Тел. +7(496) 565-25-46. E-mail: laserlab@ms.ire.rssi.ru

³АО «НПП «ИСТОК» им. Шохина».

Россия, 141190, г. Фрязино Московской обл.,

Вокзальная ул., 2 А, кор. 1.

E-mail: npzubkov@istokmv.ru

Статья поступила в редакцию 25 августа 2018 г.

© Берикашвили В. Ш., Шилов И. П., Кочмарев Л. Ю.,
Зубков Н. П., 2018

Известно, что волноводы на основе SiO_2 , легированные германием и осажденные гидролизом в пламени горелки, при разнице показателей преломления 0,75 % показывают среднюю потерю распространения 0,3 дБ/м [12–15]. В этом случае, однако, большие размеры сердечника приводят к «квазиодномодовому» волноводу. Это означает, что при малых радиусах изгиба могут возбуждаться моды более высокого порядка, но они будут теряться при распространении через волноводные изгибы, создавая дополнительные общие потери. Большой размер сердечника волновода также нежелателен, так как увеличивается требуемый размер оболочки. Толщина отражающей оболочки в одномодовом волноводе должна составлять 5–7 диаметров (размеров) сердечника, ибо часть энергии света распространяется по оболочке. При этом увеличивается интервал между волноводами, уменьшается плотность упаковки волноводов на чипе и уменьшается общая длина.

Авторы работ [13–17] отмечают, что наиболее перспективной является планарная оптическая волноводная структура состава $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ (нитрид кремния, погруженный в кварцевую оболочку). Стехиометрический нитрид кремния Si_3N_4 имеет более высокий коэффициент преломления ($n = 1,99$) по отношению к оболочке SiO_2 ($n = 1,451$). Упомянутая выше волноводная структура имеет более высокую разницу показателя преломления сердцевин Si_3N_4 , и оболочки SiO_2 , чем у других основных оптических материалов. Это даёт преимущества в части малых потерь при изгибах, повышенной стабильности материала и высокой степени однородности показателя преломления. Кроме того, пленки Si_3N_4 , осажденные химическим парофазным осаждением низкого давления (LPCVD), имеют толщину, измеряемую нанометровой шкалой. Они показывают малую шероховатость поверхности на верхней и нижней границах сердцевин ($\Delta h < 0,4$ нм). Это необходимо для поддержания низких потерь из-за рассеяния [14–16]. Масштабы потерь межфазного рассеяния пропорциональны квадрату разности показателей преломления между сердцевинной и оболочкой [16]. Поэтому высокая разница показателя преломления (около 25 %) стехиометрического Si_3N_4 , встроенного в SiO_2 , потенциально обеспечивает создание волноводов с ультранизкими потерями, изготовленными из этого материала. Установлено, что легирование кварца фтором дополнительно понижает коэффициент преломления кварцевой оболочки до $n = 1,40$ [7, 8], приводя к дополнительному снижению потерь от шероховатости и изгибов. Вместе с тем, использование света в инфракрасной длинноволновой области $\lambda = 1550$ нм существенно

снижает эти потери за счет шероховатости границы сердцевина-оболочка.

На основе теоретических расчётов, предварительных исследований и опыта предыдущих исследователей [12–16] в качестве базовой далее была принята конструкция планарного интегрально-оптического волновода (ИОВ), приведенная на рис. 1. Планарный волновод осаждается по технологии микроэлектроники на полированной подложке из кристаллического кремния в виде диска толщиной $\sim 0,5$ мм и диаметром 100 мм и более. Процесс начинается с термического окисления полированного кремниевого диска. Затем формируют нижнюю оболочку (15 мкм) парофазным химическим осаждением SiO_2 из паров хлорида кремния низкого давления (LPCVD) в кислородной среде при температуре 1200 °С. Более производительным является метод плазмохимического осаждения (PECVD). За этим следует LPCVD осаждение стехиометрического Si_3N_4 . Далее выполняется этап фотолитографии с нанесением фоторезиста ультрафиолетовым отверждением рисунка спирального волновода и смывом не отвердевшего фоторезиста. После этого проводят реактивное ионное травление Si_3N_4 и полное удаление фоторезиста. В результате на поверхности образуется гребневый волновод Si_3N_4 толщиной 50 нм.

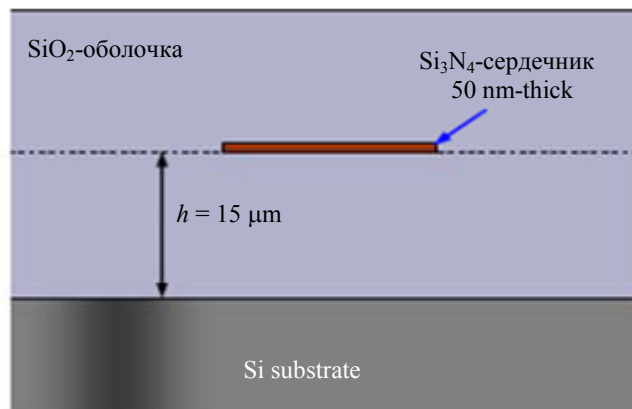


Рис. 1. Конструкция планарного оптического волновода состава $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ с малыми потерями на изгиб.

На следующем этапе на поверхность осаждают толстый слой SiO_2 (15 мкм) с использованием LPCVD метода или улучшенного метода плазмохимического осаждения из парогазовой фазы (PECVD). Нижняя оболочка SiO_2 имеет толщину 15 мкм, чтобы избежать потери утечки света в подложку. Верхняя оболочка SiO_2 также имеет толщину 15 мкм, чтобы волновод был симметричным.

Однако следует отметить, что PECVD-методом, равно как и многими другими способами, осуществление процесса осаждения чисто

кварцевых светоотражающих оболочек с малыми потерями, повышенной толщиной (более 1 мкм) и высокой микротвердостью является крайне сложной задачей. Основная причина в том, что при формировании слоев кварцевого стекла перечисленными методами возникают значительные внутренние напряжения, вследствие чего данные процессы имеют крайне низкую скорость осаждения (< 1 мкм/час). Это не позволяло осуществлять высокопроизводительное осаждение светоотражающих SiO_2 -оболочек с толщиной более 1 мкм. Легирование же светоотражающей оболочки волноведущих структур таким элементом как фтор позволяет решить проблему возникающих значительных внутренних напряжений, что проиллюстрировано на рис. 2. Здесь показано, что напряжения между сердцевиной из двуокиси кремния и фторсиликатной оболочкой можно свести к нулю. Таким образом, волноводная структура состава $\text{SiO}_2+\text{F}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2+\text{F}$ может решить проблему получения толстых плёнок. Кроме того, как ранее упоминалось, увеличивается разница показателей преломления и повышается устойчивость к изгибам.

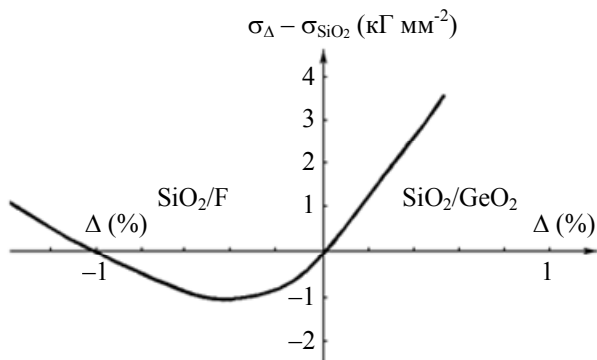


Рис. 2. Внутренние напряжения в кварцевом стекле в зависимости от концентрации F и Ge.

Для получения качественных ИОВ состава $\text{SiO}_2 + \text{F}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 + \text{F}$ или $\text{SiO}_2 + \text{F}/\text{SiON}$ (оксинитрид кремния)/ $\text{SiO}_2 + \text{F}$, формируемых с высокой скоростью и эффективностью осаждения, требуется высокоплотная плазма с концентрацией электронов и ионов $> 10^{11}$ см⁻³. Этому условию удовлетворяет метод PCVD, использующий неизотермическую плазму резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления (ПЛ-СВЧРПД) [7–9].

Целью настоящей работы являлась разработка плазменной технологии осаждения многослойных светоотражающих оболочек состава $\text{SiO}_2 + \text{F}$ повышенной толщины на планарных кремниевых подложках с возможностью дальнейшего формирования высокоапертурных оптических волноводных структур с нитрид-кремниевой или оксинитридной сердцевиной.

Материалы и методы формирования высокоапертурных оптических волноводных структур

Для осаждения планарных светоотражающих оболочек состава $\text{SiO}_2\text{-F}$ повышенной толщины и числовой апертуры (вплоть до 0,30) на кремниевые пластины были использованы разработанная в ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН лабораторная СВЧ-плазмохимическая установка и технология формирования планарных волноводов на кварцевые подложки методом PCVD [7, 8].

Наиболее эффективно процесс осаждения слоев синтетического кварцевого стекла на подложку идёт в плазме пониженного давления за счёт сверхвысокочастотного (СВЧ) электрического поля максимально возможной напряженности при рабочих давлениях газа 5–10 Торр, т. е. в СВЧ-разряде. Для получения повышенной эффективности процесса плазмохимического осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, нами предложено использование проходного волноводно-резонаторного СВЧ-плазмотрона на волне H_{10} , который представляет собой отрезок металлического волновода сечением 72×34 мм с короткозамкнутым настроенным поршнем (КЗП). В волновод введена опорная кварцевая труба (ОКТ) диаметром 20 мм, которая является, по сути, плазмохимическим реактором (ПХР).

ОКТ вводится перпендикулярно (нормально) к широкой стенке волновода. Вне волновода ОКТ окружена металлическим экраном для предотвращения утечек СВЧ-волн. Схема СВЧ-плазмотрона на волне H_{10} представлена на рис. 3.

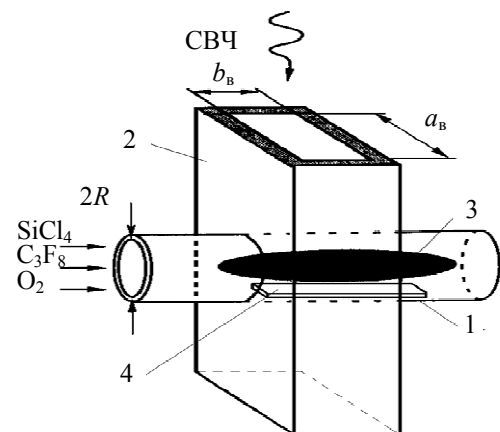


Рис. 3. Схема СВЧ-плазмотрона на волне H_{10} .

Структура электрического поля E (подробнее см. ниже) вдоль широкой стенки волновода a такова, что на оси ОКТ наблюдается максимум поля, а при выполнении соотношения $a/2r > 5$ (где $2r$ – внутренний диаметр ОКТ) образуется квази-однородная в поперечном сечении ОКТ СВЧ-

плазма. Длина активной области плазмы определяется подводимой СВЧ-мощностью, давлением газа, размером ОКТ и другими факторами.

Следует отметить, что уменьшение размера узкой стенки волновода b при постоянной поглощенной мощности приводит к увеличению удельного поглощения $W_{уд}$. Это связано с тем, что максимальное значение напряженности электрического поля возрастает с уменьшением узкой стенки волновода b по закону [8]:

$$E_m = 2 \frac{\sqrt{\frac{P}{ab}} \sqrt[4]{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\sqrt{\epsilon\mu - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}},$$

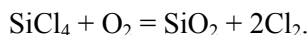
где P – СВЧ-мощность; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; λ – длина волны; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны.

Экспериментальная установка и результаты исследований

Осаждение слоев чистого и легированного фтором кварцевого стекла на кремниевые подложки (поликристаллический кремний толщиной 0,4–0,5 мм) шириной 14 мм и длиной до 50 мм производилось при использовании ОКТ диаметром 20×16 мм с помощью лабораторной СВЧ-плазмохимической установки, подробно описанной в [8].

Принцип работы установки основан на последовательном осаждении большого числа тонких (менее 1 мкм) прозрачных слоев кварцевого стекла, в т. ч. легированного фтором.

Плазмохимический синтез и формирование тонких слоев кварцевого стекла в опорной кварцевой трубе производится реакцией окисления SiCl_4 при избытке кислорода:



На рис. 4 представлен профиль осаждаемых слоев в статическом режиме (без перемещения ОКТ). Максимум осаждаемого слоя находится в самом начале плазменного сгустка, что характеризует высокую скорость диссоциации SiCl_4 .

При возвратно-поступательном перемещении ОКТ с Si-подложкой относительно плазмотрона (СВЧ-мощность – 600–800 Вт) и поддержании температуры стенки в диапазоне 1050–1200 °С осуществлялся процесс гетерогенного осаждения оптически прозрачных слоев кварцевого стекла с достаточно равномерным профилем осаждения на длине ОКТ ~300 мм. При этом на каждом проходе осаждалась тонкая прозрачная пленка стекла толщиной 0,1–0,5 мкм.

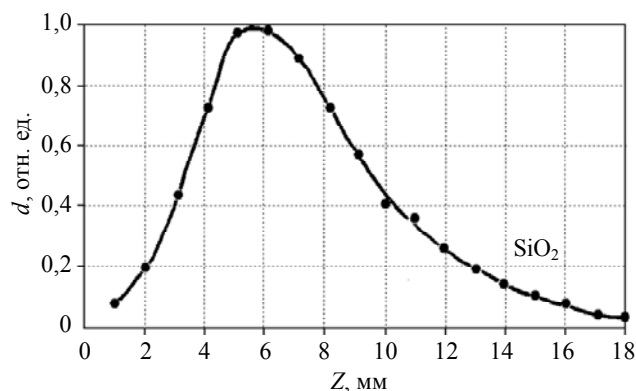


Рис. 4. Профиль толщины d осаждаемого слоя в направлении оси Z ПХР в статическом режиме.

Для оптимизации процесса осаждения фторсиликатного стекла были апробированы различные фторреагенты ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}$, SF_6 и т. д.), самым эффективным из которых оказался фреон-218 (C_3F_8).

Использование фреона-218 обеспечивает достижение числовой апертуры волноведущей структуры $\text{SiO}_2 + \text{F}/\text{SiO}_2/\text{SiO}_2 + \text{F}$ вплоть до 0,32 (содержание фтора в стекле до 6 вес. %). Это происходит при использовании волноводного плазмотрона на волне H_{10} с шириной узкой стенки 20 мм и расходе фреона 6 см³/мин.

Проведенные эксперименты показали, что на кремниевых подложках растет прочная, твердая, устойчивая к механическому воздействию (царапанию острым стальным предметом) прозрачная пленка фторированного кварцевого стекла толщиной 1–30 мкм. Микротвердость (по Виккерсу) осажденных слоев фторированного кварцевого стекла, определенная на микротвердомере марки DURASCAN, находится в пределах $\text{HV}_{0,1} = 1000\text{--}1140$, что сопоставимо с микротвердостью кристаллического кварца.

Скорость роста пленок в данном цикле экспериментов находилась в пределах от 1 до 3 мкм/мин. Какого-либо влияния на качество осаждаемого слоя фторированного стекла, наличия «термооксидного подслоя» на кремниевых пластинах на данном этапе работ выявлено не было. Толщина пленок определялась на сколе пластины с помощью микроскопа и интерферометрическим методом. Анализ полученных пленок проводился также на Оже-электронном спектрометре Jamp-9510F компании JEOL.

На основании профилирования по глубине было определено, что концентрация атомов фтора плавно увеличивается и выходит на плато с концентрацией $\approx 2,5$ ат. %. Стехиометрия пленки в среднем близка к составу SiO_2 (Si – 32,5 ат. %, O – 65 ат. %, F – 2,5 ат. %). Каких-либо других атомов, кроме атомов кремния, кислорода и фтора, обнаружено не было (отметим, что точность определе-

ния регистрируемых концентраций внедряемых атомов применяемым методом порядка 0,1–0,3 ат. %).

Необходимо отметить, что ни на поверхности, ни в глубине пленки не обнаружены атомы хлора. Атомы углерода обнаружены только на поверхности образца и являются естественным загрязнением в виде углеводородов.

Нами также проводилось осаждение толстых пленок (~1–30 мкм) чистого SiO₂ (без фтора) на кремниевую подложку. Однако даже при достаточно высоких температурах подложки (1150–1200 °С) наблюдалось большое количество микротрещин в пленке. Это, по всей видимости, связано с большим различием в коэффициентах линейного термического расширения (КЛТР) чистого кварцевого стекла и кремния. У SiO₂ очень низкий КЛТР ($0,3 \times 10^{-6}$ К) в широком интервале температур (0–1700 °С). Этим объясняется высокая стойкость кварцевого стекла к термическим ударам. Чистый кремний имеет существенно более высокий КЛТР, равный $4,25 \times 10^{-6}$ К.

Формирование оксинитридной сердцевинки для создания волноведущей структуры состава SiO₂ + F/SiON/SiO₂ + F также возможно PCVD-методом на данной установке, однако для этого необходимо проведение модернизации химблока установки, подготовки соответствующей инфраструктуры рабочего помещения. Работы в данном направлении будут продолжены.

Заключение

Основные результаты работы можно представить следующим образом.

1. Показано, что неизотермическая плазма резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления является эффективным инструментом формирования на кремниевой подложке пленок SiO₂, легированных фтором. Отметим, что процесс осаждения при этом происходит при более низких температурах подложки (1000–1100 °С), чем в случае осаждения чистого кварцевого стекла. Не наблюдается наличие трещин в SiO₂+F-пленке даже при значительных ее толщинах (до 10 мкм). При этом плавное снижение показателя преломления до значений 1,40–1,41 по сравнению с показателем преломления SiO₂ (1,456) позволяет в более широких пределах изменять свойства разрабатываемых интегрально-оптических волноводов (толщины сердцевинки и оболочки, концентрационный профиль и т. д.).

2. Достигнуты высокие скорости осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, на кремниевые подложки (вплоть до 1 мкм/мин и более), что может резко повысить производи-

тельность труда на данном переделе в микроэлектронике.

3. Для создания интегрально-оптических волноводов перспективной может быть структура SiO₂ + F/SiON/SiO₂ + F, в которой верхней и нижней отражающей оболочкой является двуокись кремния, легированная фтором в широком диапазоне концентраций (1–6 вес. %), а сердцевина состоит из оксинитрида кремния ($n = 1,5\text{--}1,90$).

4. Применение технологии PCVD позволяет достигнуть лучшей стехиометрии при образовании пленок SiO₂ + F, чем другими известными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хансперджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987.
3. Андросик А. Б., Воробьев С. А., Мирвицкая С. Д. Волноводная и интегральная фотоника. – М.: Изд. МГОУ, 2011.
4. Берикашвили В. Ш., Мирвицкий Д. И. Элементная база волоконно-оптических систем передачи информации. – М.: МИРЭА, 2002.
5. Берикашвили В. Ш., Ключник Н. Т., Костенко К. Н., Яковлев М. Я. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 2. С. 10.
6. Берикашвили В. Ш., Шкудин С. З., Стебнёв А. В. Волоконно-оптические каналы передачи информации. – М.: МГГУ, 2013.
7. Блинов Л. М., Герасименко А. П., Гуляев Ю. В., Долгов А. П., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П. // Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал. 2016. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/18/text.pdf>
8. Бабенко В. А., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П. // Радиотехника и Электроника. 2005. Т. 50. № 1. С. 100.
9. Блинов Л. М., Замоленов А. Т., Курсанов А. В., Лысов Г. В., Петров Е. А. Установка для сверхвысокочастотной плазменной обработки. Авторское свид. СССР № 876039 от 29.02.80 г.
10. Maker A., Armani A. M. // Opt. Letters. 2011. Vol. 36. No. 19. P. 3729
11. Lee H., Chen T., Li J., Painter O., Vahala K. J. // Nature communications. 2012. Vol. 3. P. 867.
12. Larsen B., Nielsen L., Zenth K., Leick L., Laurent-Lund C., Andersen L., Mattsson K. / Proceedings of ECOC (Rimini, Italy, 2003).
13. Dai D., Wang Z., Bauters J. F., Tien M.-C., Heck M. J. R., Blumenthal D. J., Bowers J. E. // Opt. Express. 2011. Vol. 19. No. 15 P. 14130
14. Bauters J. F., Heck M. J. R., John D., Dai D., Tien M.-C., Barton J. S., Leinse A., Heideman R. G., Blumenthal D. J., Bowers J. E. // Opt. Express. 2011. Vol. 19. No. 4. P. 3163
15. Takahashi S., Suzuki Y., Yoshida Y. / Proc. SPIE 4830, Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication (19.02.2003), pp. 520–531.
16. Ciminelli C., Dell'Olio F., Campanella C. E., Armenise M. N. // Adv. Opt. Photon. 2010. Vol. 2. No. 3. P. 370.
17. Burmeister E. F., Mack J. P., Poulsen H. N., Masanović M. L., Stamenić B., Blumenthal D. J., Bowers J. E. // Opt. Express. 2009. Vol. 17. No. 8. P. 6629
18. Takada K., Yamada H., Hida Y., Ohmori Y., Mitachi S. // Electron. Lett. 1996. Vol. 32. No. 18. P. 1665.

PACS: 42.81.Qb, 42.82.-m, 52.50.Sw, 52.25.-b, 81.16.Rf, 85.40.Sz

Multi-layer reflective shells based on quartz glass doped with fluorine for planar waveguide optical structures with silicon nitride and hydroxynitride core

V. Sh. Berikashvili¹, I. P. Shilov², L. Yu. Kochmarev², and N. P. Zubkov³

¹National University of Science and Technology «MISiS»
4 Leninsky av., Moscow, 119049, Russia
E-mail: berikashvily@yandex.ru

²Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS
1 Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia
E-mail: laserlab@ms.ire.rssi.ru

³ISTOK R&P Enterprise, JSC.
Bld. 1, 2A Vokzal'naya str., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia
E-mail: npzubkov@istokmv.ru

Received August 25, 2018

The results of experimental studies on the creation of integrated optical waveguides based on quartz glass doped with fluorine, using a nonisothermal plasma of a resonance local microwave discharge at the H10 wave, are presented. The proven technology is intended to create planar waveguides with a nitride or silicon oxynitride core and SiO₂ + F shell. High sedimentation rates of quartz glass doped with fluorine, on silicon substrates have been achieved (up to 1 μm/min), which can significantly improve a labor productivity in this microelectronics field.

Keywords: integrated optics, planar optical waveguides, silicon plates, multilayer optical structures of silicon nitride in quartz, optical fibers, microelectronics, radio-photonics.

REFERENCES

1. R. G. Hunsperger, *Integrated optics: Theory and technology* (Springer, 1985; Mir, Moscow, 1985).
2. A. W. Snyder, J. Love, *Optical Waveguide Theory* (Chapman & Hall, 1983; Radio i Svyaz', Moscow, 1987).
3. A. B. Androsik, S. A. Vorob'ev, and S. D. Mirovitskaya, *Waveguide and Integral Photonics* (Izd. MGOU, Moscow, 2011) [in Russian].
4. V. Sh. Berikashvili and D. I. Mirovitsky, *Element Base of Fiber-Optic Information Transmission Systems* (MIREA, Moscow, 2002) [in Russian].
5. V. Sh. Berikashvili, N. T. Klyuchnik, K. N. Kostenko, and M. Ya. Yakovlev, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Electronnoi Apparature*, No. 2, 10 (2005).
6. V. Sh. Berikashvili, S. Z. Shkundin, and A. V. Stebnev, *Fiber-Optic Communication Channels* (MGGU, Moscow, 2013) [in Russian].
7. L. M. Blinov, A. P. Gerasimenko, Yu. V. Gulyaev, A. P. Dolgov, L. Yu. Kochmarev, and I. P. Shilov, *Journal of Radioelectronics: Electronic Journal*. No. 1 (2016). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/18/text.pdf>
8. V. A. Babenko, L. Yu. Kochmarev, and I. P. Shilov, *Radio Engineering and Electronics* **50** (1), 100 (2005) [in Russian].
9. L. M. Blinov, A. T. Zamorenov, A. V. Kirsanov, G. V. Lysov, and E. A. Petrov, *Installation for ultrahigh-frequency plasma treatment*. (USSR Inv. certificate No. 876039 from 29.02.80) [in Russian].
10. A. Maker and A. M. Armani, *Opt. Letters* **36** (19), 3729 (2011).
11. H. Lee, T. Chen, J. Li, O. Painter, and K. J. Vahala, *Nature Communications* **3**, 867 (2012).
12. B. Larsen, L. Nielsen, K. Zenth, L. Leick, C. Laurent-Lund, L. Andersen, and K. Mattsson, in *Proc. of ECOC* (Rimini, Italy, 2003).
13. D. Dai, Z. Wang, J. F. Bauters, M.-C. Tien, M. J. R. Heck, D. J. Blumenthal, and J. E. Bowers, *Opt. Express* **19** (15), 14130 (2011).
14. J. F. Bauters, M. J. R. Heck, D. John, D. Dai, M.-C. Tien, J. S. Barton, A. Leinse, R. G. Heideman, D. J. Blumenthal, and J. E. Bowers, *Opt. Express* **19** (4), 3163 (2011).
15. S. Takahashi, Y. Suzuki, and Y. Yoshida, in *Proc. SPIE 4830, Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication* (19.02.2003), pp. 520–531.
16. C. Ciminelli, F. Dell'Olio, C. E. Campanella, and M. N. Armenise, *Adv. Opt. Photon.* **2** (3), 370 (2010).
17. E. F. Burmeister, J. P. Mack, H. N. Poulsen, M. L. Masanović, B. Stamenić, D. J. Blumenthal, and J. E. Bowers, *Opt. Express* **17** (8), 6629 (2009).
18. K. Takada, H. Yamada, Y. Hida, Y. Ohmori, and S. Mitachi, *Electron. Lett.* **32** (18), 1665 (1996).