

УДК 681.7.068:530.182 + 681.7.068.539.9

**ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ВОЛНОВОДОВ
НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ,
ФОРМИРУЕМЫЕ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ
РЕЗОНАНСНОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЧ-РАЗРЯДА
ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

Л. М. Блинов¹, А. П. Герасименко³, Ю.В. Гуляев¹,
А. П. Долгов³, Л. Ю. Кочмарев², И. П. Шилов²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

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

³ ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

Аннотация. В работе представлены результаты разработки лабораторной технологии получения высокоапертурных ($\sim 0,3$) волоконных световодов и планарных оптических волноводов (ПОВ) с повышенной числовой апертурой с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной отражающей оболочкой методом PCVD, использующим неизотермическую плазму резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления. Данный тип световодов используется для создания различных оптических элементов в фотонике и высокочувствительных волоконно-оптических зондов в лазерной медицине. В работе использовался проходной волноводно-резонаторный СВЧ-плазматрон на волне H_{10} с укорачивающей H-образной емкостью в середине волновода и короткозамыкающим поршнем на конце, эффективно работающий с резонансной настройкой на виде колебаний H_{10n} , где $n=1, 2, \dots$. Исследованы свойства полученных высокоапертурных световодов, а также - оптических планарных волноводов.

Ключевые слова: СВЧ плазма, волноводный плазматрон, резонанс, высокая апертура, световод, оптический планарный волновод, разветвитель, кварцевые слои, легированные фтором.

Abstract: In this paper we presented some results of a developed laboratory technology of high-aperture ($\sim 0,3$) silica fiber preforms and planar waveguides with

increased aperture fabrication, which is based on PCVD method, where a microwave non-isothermal plasma is used; material of a core is pure SiO₂, refracting cladding - F-doped SiO₂. Such kind of fibers is used, for example, in preparing of some optical elements in photonics, and high sensitive optical fiber probes in laser medicine.

In this work we used a microwave plasmatron of pass-through, waveguide-resonator type, having the shortening capacity in the center of waveguide, and the short-circuiting plunger at the end. It allows the effective resonance adjustment on the H_{10n} modes (n = 1, 2 ...). Some properties of produced preforms, optical fibers and planar waveguides are investigated.

Key words: microwave plasma, microwave plasmatron, resonance, high numerical aperture, optical fiber, optical planar waveguide, splitter, silica glass layers, doped by fluorine.

1. Введение

В последнее время неизотермическая плазма резонансного СВЧ-разряда пониженного давления эффективно используется для создания высокоапертурных кварцевых световодов с повышенным диаметром кварцевой сердцевины и фторсиликатной отражающей оболочкой, обладающих высокой радиационной стойкостью и лучевой прочностью [1, 6-8].

Подобные световоды успешно используются для передачи большой оптической мощности [6], в компонентах волоконно - оптической связи и РЛС [7], в различных датчиках измерения физических величин, в пассивных и активных оптических разветвителях [4], в WDM-устройствах, например, спектральных мультиплексорах и демультимплексорах [5].

В медицине, при проведении люминесцентной диагностики (ЛД) опухолей необходимо облучать относительно большие поверхности ткани биообъекта. Чем выше числовая апертура (NA) световода, тем больший размер поверхности будет обработан излучением. При этом повышается производительность процесса ЛД, а также чувствительность всего устройства

диагностики [3], вследствие увеличения возможности детектирования сигнала люминесценции с большей поверхности биообъекта. Даже небольшое увеличение апертуры световодов, используемых в волоконно-оптических жгутах–зондах может дать существенный эффект.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии получения кварцевых высокоапертурных волоконных и планарных волноводов, и на их основе показана возможность создания реальных перспективных устройств для медицины и волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ).

2. Экспериментальная установка и основные параметры СВЧ-разряда пониженного давления

Формирование кварцевых заготовок волоконных световодов (КЗВС) и оптических планарных волноводов производилось путем осаждения слоев кварцевого стекла, легированного фтором на внутреннюю поверхность опорных кварцевых труб с наружными диаметрами 18 и 20 мм и толщиной стенки 1,5–2,0 мм и на кварцевую пластину – подложку (с размерами 60×10×1 мм), причем в этом случае опорная кварцевая труба (ОКТ) использовалась как плазмохимический реактор (ПХР).

В качестве плазмотрона для формирования трубчатых заготовок с фторсодержащими оболочками ($\text{SiO}_2\text{-F}$) и оптических планарных волноводов использовалось СВЧ устройство, описанное в [2]. СВЧ устройство представляет собой проходной призматический резонатор с укорачивающей Н-образной емкостью в середине волновода и с короткозамыкающим (КЗ) поршнем на конце. Вход и выход СВЧ плазмотрона согласованы с помощью чебышевских плавных переходов. Нормально к широкой стенке Н-образного волновода введена опорная кварцевая труба (ПХР). Собственная добротность такого резонаторного СВЧ плазмотрона при виде колебаний H_{10n} (H_{101}) может достигать 10^4 и более. Макетная СВЧ-плазмохимическая установка разработки ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с использованием подобного СВЧ

плазмотрона описана в [9,10]. На рис. 1 представлена структурная схема установки.

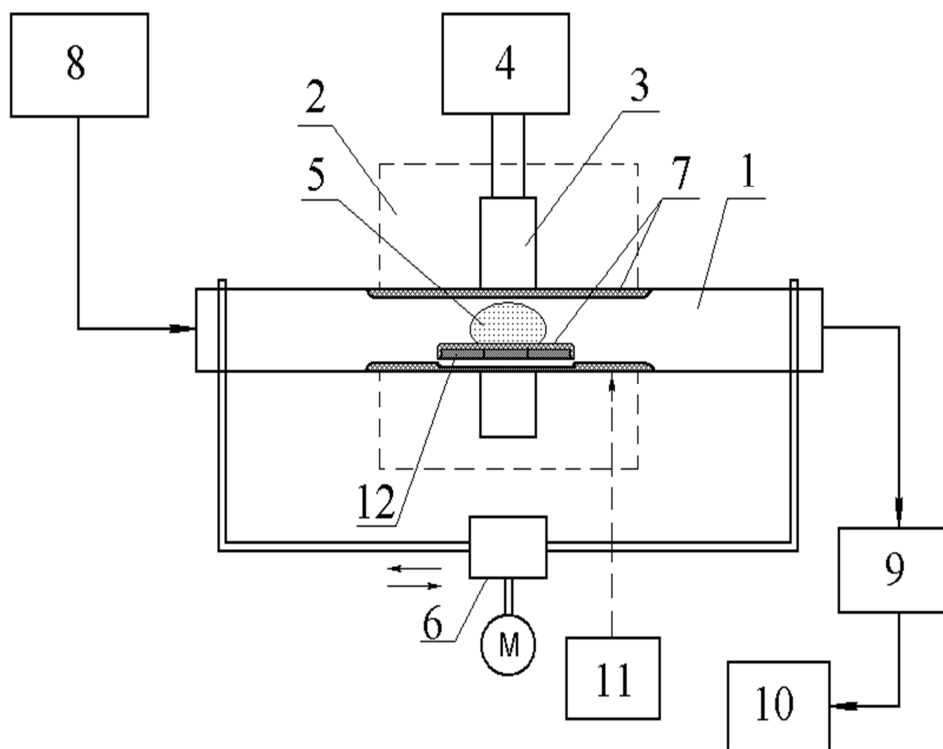


Рис. 1. Структурная схема установки СВЧ-плазмохимического осаждения:

- 1 – плазмохимический реактор; 2 – электрическая печь сопротивления;
 3 – СВЧ-плазмотрон; 4 – СВЧ-генератор; 5 – СВЧ-плазма; 6 – механизм перемещения;
 7 – осаждаемый слой стекла; 8 – химвлок с галогенидами;
 9 – вакуумный насос; 10 – скруббер; 11 – ИК-пирометр;
 12 – кварцевые подложки

Плазмохимический реактор (ПХР) 1 с подложками помещен в электрическую печь сопротивления 2 с температурой 1100–1200 °С. Соосно с реактором в центре печи расположен СВЧ-плазмотрон 3, соединенный волноводным трактом с СВЧ-генератором 4 (мощность 1,5 кВт, частота 2,45 ГГц). В волноводный тракт дополнительно встроены аттенюатор и ферритовый циркулятор (на схеме не показаны).

В реакторе, при воздействии СВЧ-энергии на газовую среду, возбуждается объемный стационарный разряд 5. С помощью механизма перемещения 6 ПХР совершает вдоль СВЧ-разряда возвратно-поступательные перемещения, в результате чего после каждого прохода на подложку осаждается тонкая

прозрачная пленка стекла толщиной 0,1–0,5 мкм. Осаждение слоя стекла 7 на подложки 12 происходит в результате гетерогенной плазмохимической реакции в СВЧ-разряде при взаимодействии плазмы с потоком парогазовой смеси (ПГС), поступающей от химического блока 8 с галогенидами. Продукты реакции откачиваются вакуумным насосом 9, использование которого обеспечивает также поддержание заданного пониженного давления в реакторе. Нейтрализация продуктов плазмохимических реакций обеспечивается скруббером 10. Контроль за температурой стенки реактора в процессе осаждения производится ИК-пирометром 11. Вне волновода ОКТ окружена запердельным металлическим экраном.

Схематически СВЧ-плазмотрон, как устройство возбуждения СВЧ-разряда на волне H_{10} , представлен на рис.2.

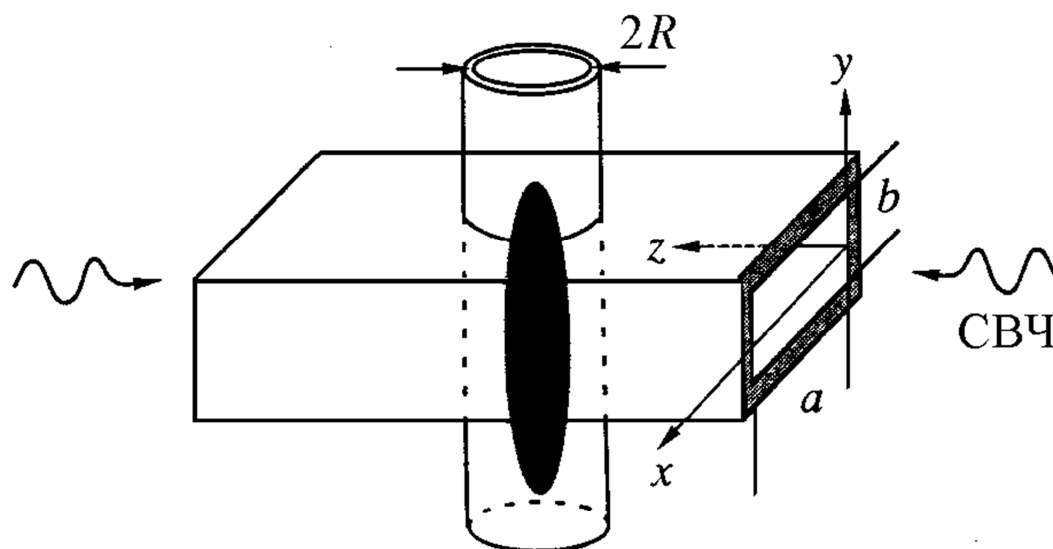


Рис. 2. Схема СВЧ-плазмотрона на волне H_{10} .

Структура электрического поля вдоль широкой стенки волновода a_e такова, что на оси наблюдается максимум электрического поля, а при выполнении соотношения $a_e/2R > 5$ (где $2R$ – внутренний диаметр ОКТ) образуется квазиоднородная в поперечном сечении ОКТ локальная (3-4 см) СВЧ-плазма, длина области существования которой определяется подводимой СВЧ-мощностью и давлением газа (фактор E/P , где E – напряженность электрического поля, P – давление газа).

КЗ-поршень, СВЧ мощность и давление позволяют настраивать СВЧ плазматрон на резонансный режим работы для обеспечения повышенной эффективности процесса плазмохимического осаждения кварцевого стекла и повышения эффективности легирования его фтором. Настройка СВЧ плазматрона на резонансный режим, при рабочих условиях развития СВЧ-разряда, производилась по минимальной отраженной СВЧ мощности от входа СВЧ плазматрона в плече ферритового циркулятора.

В работах [11,12] показано, что для сечения прямоугольного Н-волновода $a=72$ мм, $b=20$ мм, подводимой СВЧ-мощности $W_{\text{над}}=600$ Вт и фиксированном давлении возможно достижение больших значений напряженности поля ($E_A=1,2$ кВ/см), что ведет к существенному росту параметра E/P , который определяет как свойства плазмы, так и скорости протекания плазмохимических реакций.

Анализируя вышеизложенное и принимая во внимание [13,14], можно охарактеризовать локальную плазму резонансного СВЧ-разряда пониженного давления, создаваемую СВЧ-плазматроном на волне H_{10} , как высокоэффективный технологический инструмент для проведения плазмохимических реакций окисления тетрахлорида кремния и синтеза кварцевого стекла, легированного фтором на внутренней поверхности ОКТ и на кварцевой пластине – подложке, размещенной в ОКТ. При использовании ОКТ (ПХР) с диаметрами кварцевых труб более 20 мм для проведения плазмохимических реакций предпочтительно применение других СВЧ-плазматронов [1].

3. Формирование заготовок волоконных световодов состава

$\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ -F с повышенным содержанием фтора в стекле

При подаче в ОКТ с плазмой паров тетрахлорида кремния, фреона и кислорода в результате проведения плазмохимических реакций на внутренней поверхности кварцевой трубки при ее перемещении относительно СВЧ-плазматрона осаждались слои фторсиликатного стекла. Показатель преломления фторсиликатного стекла существенно ниже, чем у чистого

кварцевого стекла, что дает возможность изготавливать заготовки состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ с повышенной апертурой.

Плазмохимический синтез и формирование тонких слоев кварцевого стекла на подложках, размещенных в кварцевом ПХР, производится реакцией окисления SiCl_4 при избытке кислорода. Инициирование данной реакции в плазме СВЧ-разряда пониженного давления осуществляется при взаимодействии с электронной компонентой и заключается в поэтапном отрыве атомов хлора от радикалов SiCl_n ($n = 1-4$) электронным ударом. В результате плазмохимического разложения SiCl_4 и синтеза SiO_2 в атмосфере кислорода происходит формирование тонких слоев кварцевого стекла.

Для оптимизации процесса легирования кварцевого стекла фтором и осаждения фторсиликатного стекла были апробированы различные фторагенты. Самым эффективным фторагентом оказался фреон-218 (C_3F_8). На рис.3 показана зависимость концентрации фтора в стекле (выраженная через числовую апертуру структуры $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-F}$) от расхода фреона в газовой фазе для различных СВЧ плазмотронов с шириной узкой стенки 34 и 20 мм. Использование фреона-218 обеспечивает достижение числовой апертуры до 0,32 при использовании СВЧ плазмотрона H_{10} с шириной узкой стенки 20 мм и расходе фреона $6 \text{ см}^3/\text{мин}$ в резонансном режиме его работы. Поскольку константа скорости диссоциации фторсодержащих реагентов ниже, чем у тетраоксида кремния, необходимо уменьшать время диссоциации фторагентов, увеличивая удельный энергозатрат в СВЧ-разряде, одновременно повышая энергию электронов N_e .

Использование резонаторного СВЧ-плазмотрона на волне H_{10} с уменьшенным размером Н-образной узкой стенки в середине волновода и КЗ поршнем на конце в резонансном режиме работы на виде колебаний H_{10n} для создания неизотермической плазмы резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления позволяет успешно решать задачу более эффективного легирования кварцевого стекла фтором [1].

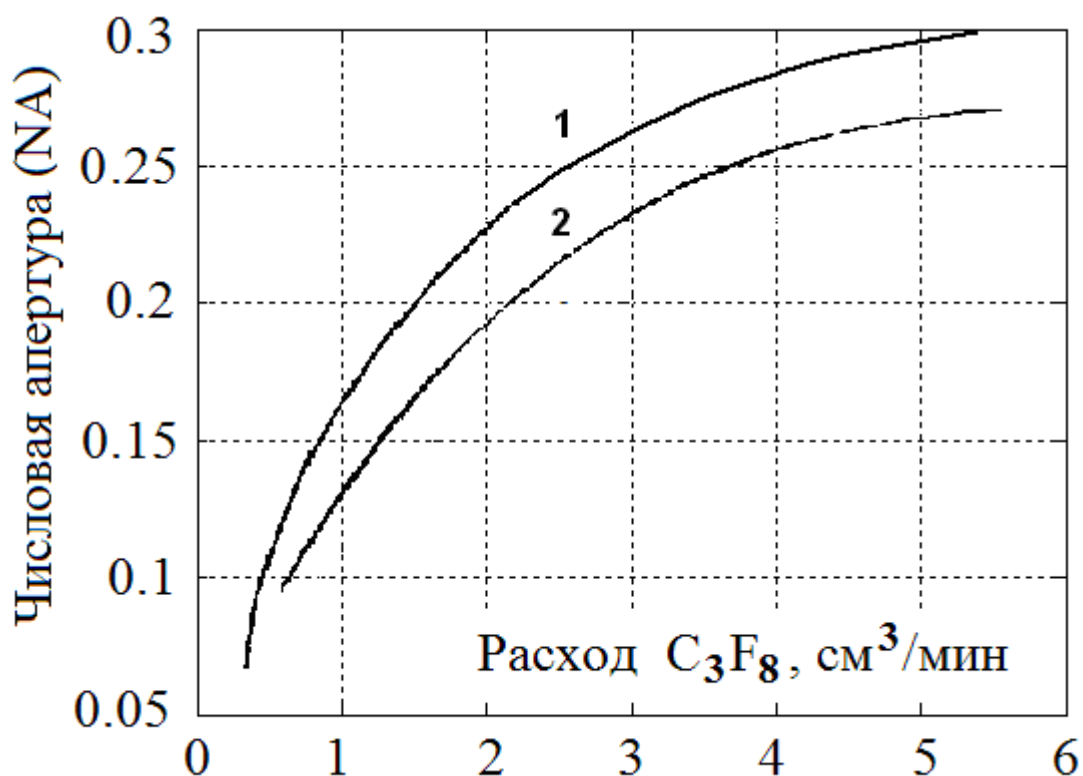


Рис. 3. Зависимость числовой апертуры формируемых заготовок световодов от расхода фреона в газовой фазе для СВЧ-плазмотронов волноводного типа с сечением $72 \times 34 \text{ мм}^2$ (2) и $72 \times 20 \text{ мм}^2$ (1).

Формирование сердцевин заготовки производилось по следующей методике. Внутри кварцевой трубки (диаметр $20 \times 16 \text{ мм}$, $18 \times 15 \text{ мм}$) с осажденной в плазме SiO_2-F - оболочкой (общей толщиной $300-500 \text{ мкм}$) помещался штабик из оптически прозрачного кварцевого стекла типа КУВИ-1 или КУ-1 и вся структура при помощи газокислородной горелки на станке схлопывалась в штабик-заготовку состава $SiO_2/SiO_2-F/SiO_2$, (чисто кварцевая сердцевина, фторсиликатная светоотражающая оболочка и внешняя защитная оболочка из кварцевого стекла).

Диаметр заготовок составлял $14-16 \text{ мм}$, длина до 300 мм . Радиальное распределение профиля показателя преломления КЗВС, измеренное на оптическом анализаторе заготовок Р-102 (производство фирмы York Technologies, Англия), представлено на рис. 4.

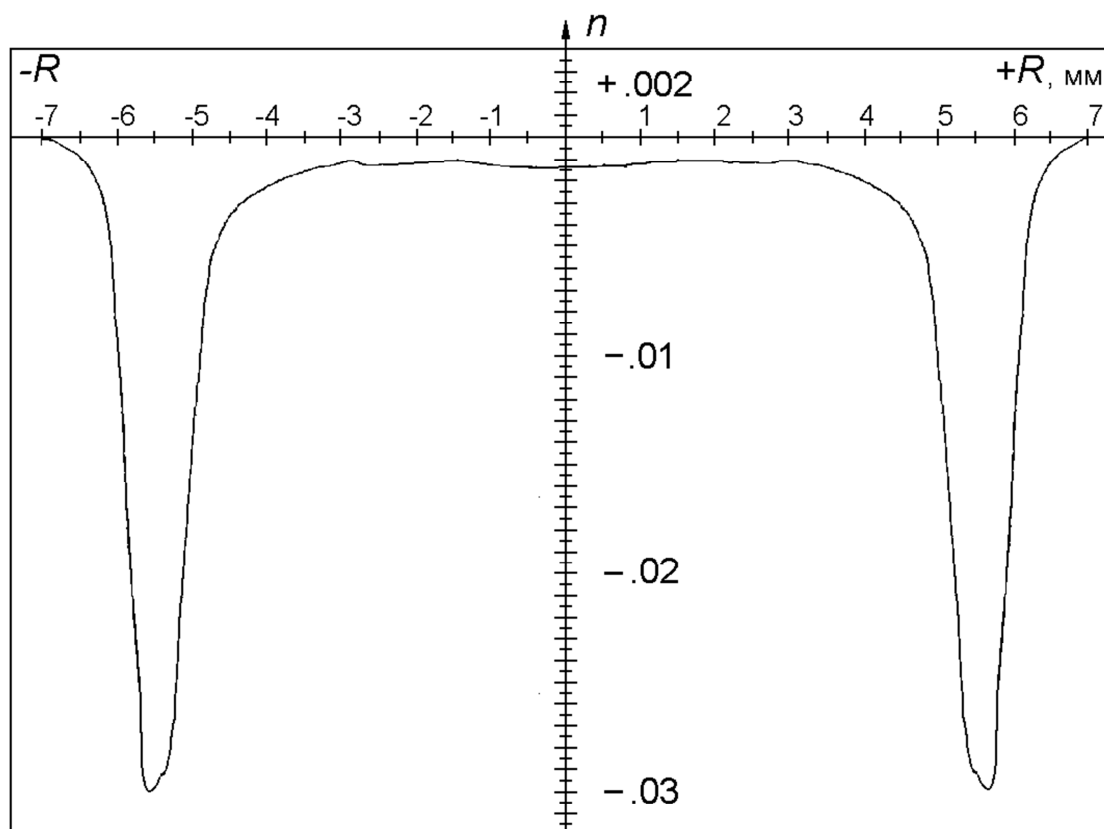


Рис.4. Радиальное распределение профиля показателя преломления
Заготовки состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$

Данный профиль показателя преломления ППП характеризуется хорошей азимутальной и осевой однородностью, а также высоким уровнем легирования кварцевого стекла фтором (разница показателей преломления кварцевой сердцевины и фторсиликатной оболочки достигает 0,03).

Для определения концентрации фтора в стекле было произведено схлопывание фторированной трубчатой заготовки в штабик. Из полученной заготовки был вырезан и отшлифован образец, на котором были произведены измерения профиля показателя преломления. Радиальный профиль концентрации фтора (рис. 5) измерялся в Институте физической химии РАН на установке, представляющей собой растровый электронный микроскоп JSM. U3, снабжённый рентгеновским спектрометром с энергетическим разрешением и цифровым сканированием фирмы GETAC.

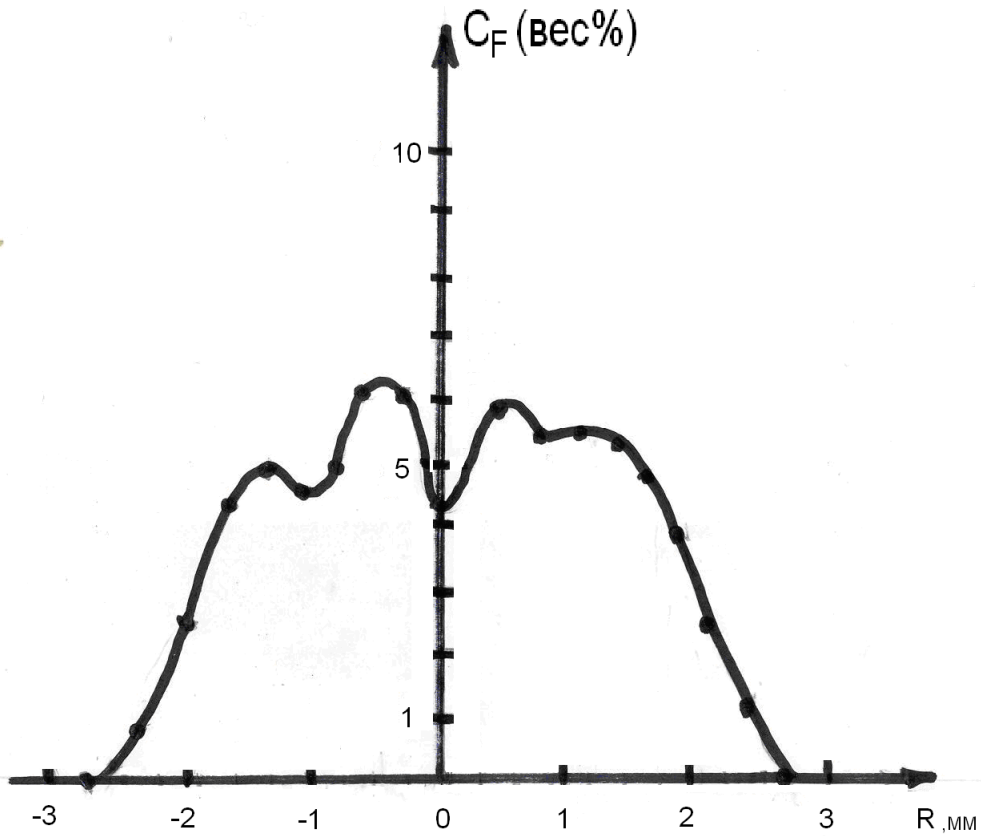


Рис. 5 Радиальное распределение фтора в схлопнутой заготовке с $\Delta n = 0,03$, измеренное рентгеновским микроанализатором.

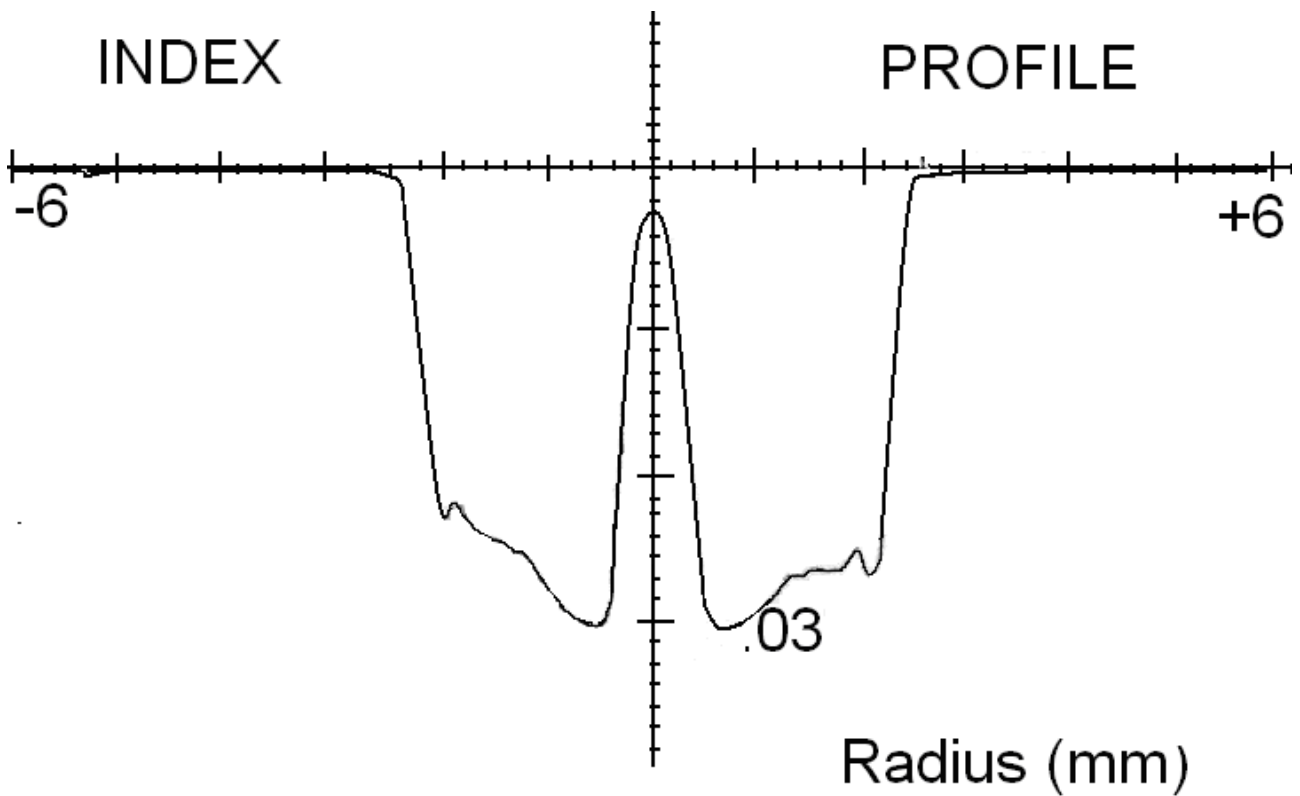


Рис. 6 Радиальное распределение профиля показателя схлопнутой ОКТ состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$

В измеренном на той же заготовке профиле показателя преломления, приведённом на рис. 6, за ноль принят показатель преломления чистого кварцевого стекла.

Профиль приблизительно симметричен по азимутальному углу, но имеет некоторую неоднородность по координате R. В определённой области, вблизи центра, достигается значение $\Delta n = -0,03$, что соответствует числовой апертуре $NA = 0,3$. “Провал” в центре профиля связан с выгоранием фтора с внутренней поверхности в процессе схлопывания. Форма профиля концентрации фтора приблизительно соответствует форме профиля Δn . Максимальное значение концентрации фтора составляет более 6 вес. %, что согласуется с максимальным значением $\Delta n = -0,03$.

Вытяжка световодов из заготовок осуществлялась по известной технологии с использованием графитовой печи. В качестве первичного покрытия использовался кремнийорганический лак СИЭЛ-305 либо эпоксиакрилат ЭАС-655А, который одновременно служил и защитным покрытием. Числовая апертура световодов, вытянутых из таких заготовок составляла 0,22-0,30. Спектральная зависимость оптических потерь в световодах с сердцевиной из стекла КУВИ-1 представлена на рис.7

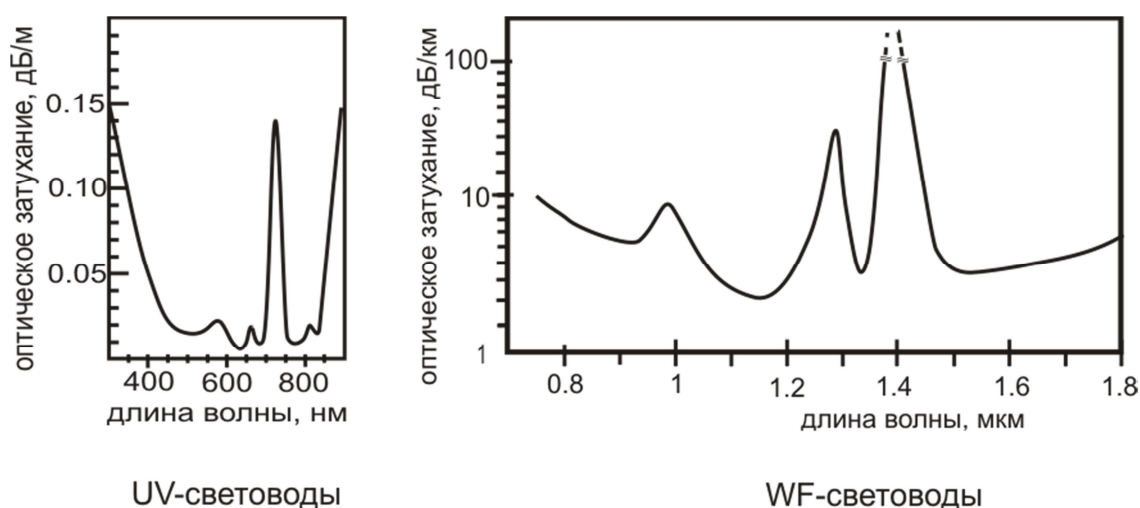


Рис. 7. Спектр оптических потерь в световодах состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ UV-типа (стекло КУ-1) и WF-типа (стекло КУВИ-1).

Результаты исследований показали, что световоды данного состава имеют низкие оптические потери в видимом и ближнем ИК-спектральном диапазоне.

В настоящее время данный тип световодов может найти широкое применение в различных областях: лазерная медицина (хирургия, урология, терапия и т.д.), лазерная технология (резка, сварка, сверление, модификация, очистка и обработка поверхностей и т.д.), спектроскопия, различного рода датчики физических величин. Необходимо также отметить, что волоконные световоды состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ являются наиболее радиационно-стойкими из всех составов световодов на основе кварцевого стекла [1].

На основе полученных световодов могут изготавливаться многожильные волоконно-оптические зонды для детектирования люминесценции при проведении процедур БИК-люминесцентной диагностики новообразований [15, 3].

4. Формирование оптических планарных волноводов (ПОВ) состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2\text{/SiO}_2\text{-F}$

Формирование планарных оптических волноводов со ступенчатым и градиентным профилем проводилось путем осаждения чистого и легированного фтором SiO_2 на подложки из кварцевого стекла с размерами $60 \times 10 \times 1$ мм, размещенные в ПХР [16, 17, 18].

Процесс изготовления полосковых многомодовых волноводов ступенчатого типа состоит из несколько этапов.

На первом этапе в ПХР на подложки из кварцевого стекла последовательно производилось осаждение буферного слоя SiO_2 толщиной 5 мкм, нижнего фторсиликатного слоя $\text{SiO}_2\text{-F}$ с толщиной 15 мкм и $n_D = 1,425$, волноводного слоя SiO_2 с толщиной 85 мкм и $n_D = 1,45$ и верхнего слоя $\text{SiO}_2\text{-F}$ с идентичными нижнему фторсиликатному слою характеристиками.

Далее из пластин со сформированной планарной волноводной структурой были изготовлены образцы с размерами $60 \times 2 \times 1$ мм с полированными боковыми поверхностями. Образцы крепились специальным образом на стандартную подложку из кварцевого стекла и размещались повторно в ПХР

для СВЧ-плазмохимического осаждения фторсиликатной отражающей оболочки на боковые стороны. В результате формировался полосковый волновод с прямоугольным поперечным сечением, SiO_2 -сердцевина которого со всех сторон была окружена SiO_2 -F-оболочкой.

Изображение поперечной структуры и микрофотография краевой области торцевого участка полученных оптических волноводов представлены соответственно на рис. 8 и рис. 9.

Процесс изготовления градиентных планарных оптических волноводов также включал несколько стадий, которые подробно описаны в [19].

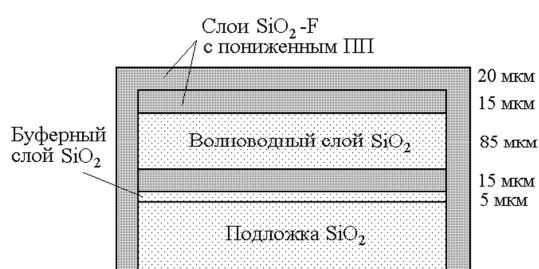


Рис. 8. Схематическое изображение поперечной структуры полоскового волновода

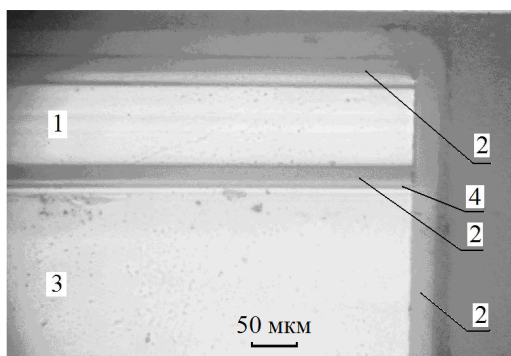


Рис. 9. Микрофотография краевой области торцевого участка полоскового волновода.

1- волноводный слой SiO_2 ; 2- фторсиликатный слой SiO_2 -F;
3 – подложка из кварцевого стекла; 4 – буферный слой SiO_2

Схематическое изображение поперечной структуры торцевого участка полученных оптических волноводов представлено на рис. 10.

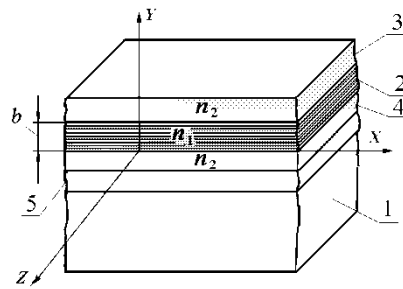


Рис. 10 Структура градиентного планарного волновода:

1 – подложка SiO_2 ; 2 – градиентная волноводная область (нанослой $\text{SiO}_2\text{-F}$);
3, 4 – слой $\text{SiO}_2\text{-F}$; 5 – буферный слой SiO_2 .

Измеренный профиль распределения интенсивности оптического излучения по торцу волновода в направлении Y одного из образцов приведен на рис.11.

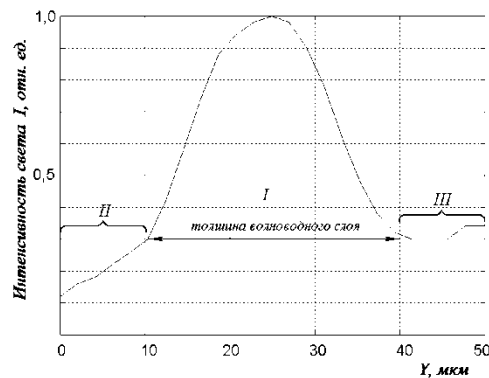


Рис.11. Распределение интенсивности излучения на выходном торце градиентного волновода.

Форма кривой в зоне I , шириной равной толщине волноводного слоя соответствует профилю III полученной волноводной структуры. Распределение интенсивности в зонах II и III обусловлено частичной засветкой светоотражающих слоев $\text{SiO}_2\text{-F}$ при возбуждении планарного волновода. Числовая апертура исследуемого образца составляла $NA = 0,28$, что соответствует относительной разности максимального значения III центрального слоя (соответствующего III чистого кварцевого стекла

$n_D = 1,458$) и ПП фторированных областей (3 и 4 на рис. 3), составляющей $\Delta n/n = 0,012$.

Основными характеристиками планарных волноводов, в значительной степени определяющими возможность их использования в оптических компонентах волоконно-оптических информационных систем, являются коэффициент затухания и числовая апертура.

Значения коэффициентов затухания, измеренные на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм, не превышали 0,01 дБ/см. Числовая апертура изготовленных образцов планарных волноводов со ступенчатым профилем, измерялась на уровне 10% световой мощности в сечении распределения света в дальнем поле на длине волны 1,3 мкм и составила около 0,24.

Важной характеристикой полосковых оптических волноводов, используемых, например, в многомодовых многоканальных разветвителях, является также величина неравномерности распределения интенсивности излучения в плоскости их выходного торца.

Распределение интенсивности в общем случае зависит от длины и оптической однородности волновода, места ввода излучения и оптического качества его боковых поверхностей. Максимальная неравномерность распределения оптической мощности соответствует вводу излучения в одну из краевых областей волноводного слоя.

На рис. 12 приведены экспериментальные кривые распределения интенсивности излучения вдоль оси X выходного торца изготовленного образца полоскового волновода со ступенчатым ППП длиной 40 мм и поперечными размерами волноводной области 2000×85 мкм. Зависимости получены при вводе излучения с длиной волны $\lambda = 1,3$ мкм из оптического волокна с диаметром сердцевины 50 мкм в центральную ($X_i = 1,0$ мм) и краевую ($X_i = 1,9$ мм) области волноводного слоя.

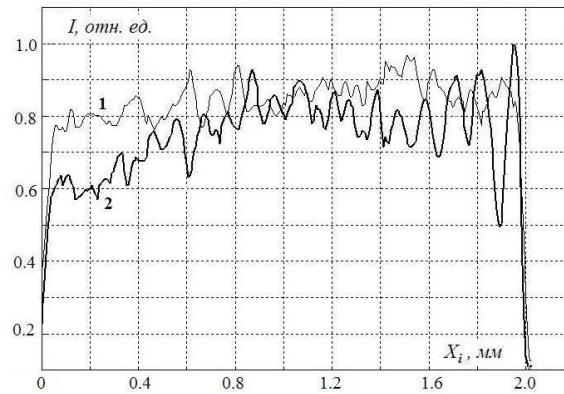


Рис. 12. Распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце полоскового волновода при вводе излучения в центральную (1) и краевую (2) области волноводного слоя

Неравномерность распределения интенсивности оптического излучения на выходе волновода при произвольном положении входного волокна составляла не более 40%. Наблюдаемые осцилляции кривой объясняются интерференционными эффектами в волноводе.

На основе разработанных оптоволоконных и планарных многомодовых волноведущих структур состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ был разработан новый тип высоконадежных многоканальных оптических разветвителей, используемых в ВОСПИ [16, 18]. В таких разветвителях планарный волновод со ступенчатым ППП выполняет роль участка оптической связи между соединенными с его торцевыми участками оптическими волокнами состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$. Разветвители данной конструкции за счет монолитной структуры участка оптической связи имеют более высокую стойкость к механическим и температурным воздействиям по сравнению с биконическими сплавными разветвителями, что делает их перспективными для применения в составе информационных систем подвижных объектов.

На основе планарных оптических волноводов и разработанных ВС состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ с диаметром сердцевины/внешней оболочки 100/125 мкм и числовой апертурой 0,22-0,28 были изготовлены разветвители с матрицей

передачи 8×8 и 16×16 , предназначенные для объединения и распределения информационных потоков в локальных ВОСПИ.

Следует отметить существенное преимущество применения градиентных волноводных структур в разработанных волоконно-оптических компонентах – снижение вносимых потерь, а также повышение надежности волноводов, поскольку за счет плавного изменения концентрации легирующей примеси снижаются механические напряжения в структуре [19].

5. Заключение

Разработана лабораторная технология изготовления кварцевых заготовок волоконных световодов и планарных оптических волноводов (ПОВ) с повышенной числовой апертурой ($\sim 0,30$) с кварцевой сердцевинкой и фторсиликатной отражающей оболочкой в неизотермической плазме резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления на макетной СВЧ-плазмохимической установке, использующей проходной резонаторный СВЧ плазмotron на волне H_{10} (тип колебаний H_{10n}) с укорачивающей H-образной емкостью в середине волновода и КЗ поршнем на конце.

Получены световоды 3-х слойного типа состава $SiO_2/SiO_2-F/SiO_2$ с повышенной числовой апертурой ($\sim 0,30$).

Разработаны планарные световоды ступенчатого и градиентного типа, которые могут найти широкое применение в различных лазерных технологиях и радиофотонных устройствах.

Литература

1. Блинов Л.М., Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Герасименко А.П. “Резонансные неравновесные СВЧ плазмохимические системы в технологии синтеза специальных кварцевых волоконных световодов” //Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал, 2014, № 12, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/4/text.pdf>
2. Блинов Л.М., Заморенов А.Т., Кирсанов А.В., Лысов Г.В., Петров Е.А. Установка для сверхвысокочастотной плазменной обработки. Авторское свид. СССР № 876039, 29.02.80

3. Блинов Л.М., Гуляев Ю.В., Панас А.И., Шилов И.П., Рябов А.С., Щамхалов К.С. «Устройство для люминесцентной диагностики новообразований». Патент РФ на изобретение № 2483678 (Госреестр от 10 июня 2013).
4. Житковский В.Д., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. «Многополюсные разветвители на основе слоевых структур из стекла для волоконно-оптических информационных систем» // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, 2002, № 1–2, С.68–73.
5. Meint K. Smit, *Associate Member, IEEE*, and Cor van Dam PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, V. 2, № 2, June 1996
6. Артюшенко В. Г., Блинов Л. М., Гуляев Ю.В., Дианов Е.М., Прохоров А.М., Шилов И. П «Кварцевые волоконные световоды для передачи мощного лазерного излучения» // Ж. Известия АН СССР, 1990, Т. 54, №8, С. 1570-1573.
7. Artjushenko V.G., Blinov L.M., Gulyaev Yu.V., Dianov E.M., Prokhorov A.M., Shilov I.P. «Plasmo-chemical synthesis of power fiber silica structures in a plasma of RF- and SRF-discharges» // *J. Sov. Lightwave Commun.*, 1992, V. 2, N. 2, P. 171-182. Printed in the UK.
8. Бабенко В.А., Григорьянц В. В., Шилов И.П. и др. «Кварцевые волоконные световоды для передачи лазерного излучения повышенной мощности»//10-ая Международная научно-техническая конференция «Лазеры в науке, технике и медицине». Тезисы докладов, 1999, С. 71-73.
9. Бабенко В. А., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П. «Сверхвысокоочастотный разряд волноводного плазмотрона для осаждения высокоапертурных структур на основе кварцевого стекла» //Радиотехника и Электроника, Т. 50, №1, 2005, С. 100-107.
10. Бабенко В. А., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П. “Устройство для изготовления оптических волноводов”, Патент на полезную модель № 7428 от 10.07.2008.
11. Кайрыев Н. Ж., Кулумбаев Э. Б., Лелевкин В. М. «Численное исследование СВЧ-разряда на волне типа H_{10} » //Физика плазмы, 2000, Т. 26, №5, С. 488-493.

12. Бабенко В.А., Григорьянц В.В., Шилов И.П. и др. «Осаждение диэлектрических структур на основе кварцевого стекла в волноводном плазматроне»//XVI Международная научная конференция “ Математические методы в технике и технологиях“. Сб. трудов. Ростов-на-Дону, 2003, Т. 5, С. 94-95.
13. Babenko V. A., Blinov L. M., Volodko V. V. Plasma chemical process modelling in fibre waveguide technology.//Sov. Lightwave Commun., 1992, V. 2, P. 199-212. Printed in the UK.
14. K. M. Golant, E. M. Dianov, R. R. Khrapko, A. L. Tomaschuk "Nitrogen doped silica fibers and fiber-based optoelectronic components"// Proc. of SPIE "Advances in Fiber Optics" (E. M. Dianov ed.) Vol. 4083, pp. 2 - 11, 2000.
15. Даниелян Г. Л., Шилов И. П., Кочмарев Л. Ю., Иванов А. В., Замятин А.А., Маковецкий А.А., Кузнецов О. О. « Волоконно-оптические зонды на основе кварцевых световодов повышенной числовой апертуры для люминесцентной диагностики опухолей» // Ж. Медицинская физика. Т. 61, №1, С. 51-58, 2014.
16. Берикашвили В.Ш., Григорьянц В.В., Шилов И.П. и др. «СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла»//Ж. Микросистемная техника (МСТ), 2004, №8, С. 28-33
17. Шилов И.П., Григорьянц В.В., Кочмарев Л.Ю., Берикашвили В.Ш., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. «Планарные и полосковые многомодовые волноводы из кварцевого стекла, полученные в микроволновой плазме пониженного давления». //Труды XII Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники). Москва, ОАО ЦНИТИ ТЕХНОМАШ, 7-9 сентября 2006 г., С.363-369.
18. Шилов И.П., Берикашвили В.Ш., Григорьянц В.В., Кочмарев Л.Ю., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. «Многоканальные оптические разветвители на основе планарных многомодовых волноводов из кварцевого стекла»// Ж. Радиотехника и Электроника, 2008, Т. 53, № 8, С. 1017-1022.

19. И. П. Шилов, Л. Ю. Кочмарев, Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев.

«Планарные волноводы градиентного типа на основе наноразмерных слоев кварцевого стекла, полученные в микроволновой плазме пониженного давления»// Изв. Высших учебных заведений. Ж. Материалы электронной техники, №4, С.59-64, 2012.