

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.1>

УДК 628.953.2: 533.9.082.74:681.7.068

ОСАЖДЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР СО ФТОРСИЛИКАТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ НА КРЕМНИЕВЫЕ И КВАРЦЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ В ЛОКАЛЬНОМ СВЧ-РАЗРЯДЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Л. Ю. Кочмарев, И. П. Шилов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им В. А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.

Аннотация. Представлен эффективный метод газофазного многослойного гетерогенного осаждения кварцевого и фторсиликатного стекла в неизотермической плазме резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления на подложки из кварцевого стекла и кремниевые пластины для формирования оптических структур волноводов и других волноводных элементов на их основе. Показано, что неизотермическая плазма резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления является эффективным инструментом формирования на кремниевых и кварцевых подложках пленок как чистой двуокиси кремния, так и легированной фтором. Не наблюдается наличия трещин в пленках, легированных фтором даже при значительных их толщинах (20...60 мкм). Достигнуты высокие скорости и эффективности осаждения кварцевого стекла, легированного фтором (до 7 вес.% легирования стекла фтором при скорости осаждения пленки свыше 3 мкм/мин). Созданы планарные и полосковые многомодовые и одномодовые оптические волноводы, которые являются базовыми структурами различных волоконно-оптических компонентов локальных систем передачи информации.

Ключевые слова: СВЧ-плазмохимическая технология, плазмотрон на волне H_{10} , осаждение фторсиликатных нанослоев, кремниевые пластины,

стехиометрия, планарный оптический волновод, интегрально-оптические волноводы, кремниевая микроэлектроника, радиофотоника.

Abstract: An efficient method of gas-phase multilayer heterogeneous deposition of quartz and fluorosilicate glass in a non-isothermal plasma of a resonant local low pressure microwave discharge on quartz glass substrates and silicon wafers for the optical structures formation of waveguides and other waveguide elements based on them, is presented. It is shown that the nonisothermal plasma of a resonant local low pressure microwave discharge is an effective tool for the films formation on silicon and quartz substrates, both pure silicon dioxide and doped with fluorine. The cracks presence in films doped with fluorine is not observed even at their considerable thicknesses (20...60 μm). Deposition high rates and efficiency of silica glass doped with fluorine have been achieved (up to 7 wt.% of glass doping with fluorine at a film deposition rate of more than 3 $\mu\text{m}/\text{min}$). Planar and strip multimode and single-mode optical waveguides have been created. They are the basic structures of various fiber-optic components of local information transmission systems.

Key words: microwave plasma-chemical technology, plasmatron on the H_{10} wave, fluorosilicate nanolayers deposition, silicon wafers, stoichiometry, planar optical waveguide, integrated optical waveguides, silicon microelectronics, radiophotonics.

Введение

Повышенный интерес к СВЧ плазмохимическим технологиям, обеспечивающим эффективную плазмохимическую обработку различных диэлектрических материалов, в том числе кварцевых и кремниевых изделий, и эффективное газофазное осаждение на них оптических наноструктур на основе чистого кварцевого и фторсиликатного стекла, вызван интенсивным развитием наноэлектроники, нанофотоники и интегральной оптики. В настоящее время планарные оптические волноводы (ПОВ) на кремниевых и кварцевых подложках широко применяются в МОEMS-технологиях, интегрально-оптических датчиках, в системах передачи и обработки информации, в компонентах оптической связи, в частности в пассивных и активных

оптических разветвителях [1], мультиплексорах-демультиплексорах [2,3], переключаемых оптических линиях задержки [4], используемых в радиофотонных технологиях и в др. оптических информационных системах. При этом важным требованием к такого рода современным разработкам являются устойчивость ПОВ к воздействию радиации и их механическая прочность, устойчивость к вибрациям.

В настоящее время наиболее радиационно-стойкими являются оптические структуры на основе синтетического кварцевого стекла с чисто кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой [5-10], полученные методом PCVD. Метод PCVD (осаждение из газовой фазы, активированное СВЧ-плазмой пониженного давления), обладает целым рядом присущих ему достоинств:

- реакция идет гетерогенно сразу с образованием оптически прозрачных тонких диэлектрических слоев (толщина монослоя 10...1000 нм), что позволяет создавать структуры с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью и служит основой для создания фотонных кристаллов;

- высокая эффективность (для $\text{SiO}_2 \sim 100\%$, $\text{GeO}_2 \sim 80\text{--}90\%$, фторсодержащие соединения — 90%) и скорость осаждения (процесс осуществляется при давлениях 1...20 Торр);

- активация плазмой весьма эффективна, поэтому диапазон используемых реагентов и легирующих добавок очень широк, процесс получается хорошо контролируемым и воспроизводимым;

- профиль показателя преломления может быть аппроксимирован с хорошим пространственным разрешением при нанесении нескольких тысяч слоев;

- система вакуумирована и герметизирована, что исключает возможность загрязнения процесса и окружающей среды.

Ранее было показано, что газоразрядная плазма СВЧ-разряда пониженного давления является неизотермической ($T_e \gg T_g$, где T_e –

температура электронов, а T_g – температура газа) и неравновесной, что обусловлено неравновесным распределением электронов по энергиям и существенным превышением средней энергии электронов над средней энергией ионов, атомов, радикалов и молекул газа.

Для оценки плазмохимической эффективности неизотермической плазмы СВЧ-разряда пониженного давления используется отношение напряженности электрического поля E к давлению P . Эта величина (фактор E/P) определяет свойства СВЧ-плазмы и значения скорости, с которой в ней реализуются плазмохимические реакции.

Предполагается, что основным механизмом фрагментации молекул SiCl_4 в плазме СВЧ-разряда пониженного давления являются соударения с электронами и что образование SiO_2 происходит благодаря химической адсорбции на поверхности трубки (стержня, пластины) радикалов, содержащих атомы кремния. Основным каналом фрагментации фторсодержащих реагентов (C_2F_6 , C_3F_8 , SF_6) являются их соударения с атомами кислорода и электронно-возбужденными молекулами кислорода.

Рассчитанная функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) показывает, что при фиксированных параметрах подобия E/N (E/P), ω/N (ω/P), где ω — круговая частота электромагнитных колебаний, добавление к O_2 10% газов с многоатомными молекулами (SiCl_4) почти не изменяет ФРЭЭ и что ФРЭЭ в рассматриваемом СВЧ-разряде зависит только от локальных значений параметров подобия E/N (E/P), ω/N (ω/P). При достаточно малых N , ФРЭЭ в СВЧ-разряде пониженного давления становится функцией единственного параметра E/ω . Для O_2 “критическое значение” параметра ω/N равно приблизительно 10^{-6} см³/сек, при частоте $\omega/2\pi = 2,45$ ГГц оно соответствует давлению 0,5...1 Торр.

Зная ФРЭЭ, можно вычислить диэлектрическую проницаемость, проводимость и энерговклад в расчете на один электрон, среднюю энергию электронов и подвижность, коэффициент диффузии, константы скоростей процессов диссоциации, ионизации и константы плазмохимических реакций.

Таким образом, было показано, что эффективность процесса образования и осаждения кварцевого стекла, в том числе, легированного фтором, зависит, в основном, от величины напряженности электрического поля E , давления рабочего газа P (плотности частиц N) и частоты электромагнитного поля ω . Известно, что резонатор обладает частотной избирательностью по отношению к внешнему гармоническому воздействию: амплитуда его колебаний максимальна на резонансной частоте и уменьшается по мере удаления от него [8]. Следовательно, использование плазмы резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления является оптимальным для этих целей.

Целью данной работы являлась задача демонстрации возможности применимости метода PCVD для создания ПОВ на кремниевых и кварцевых пластинах осаждением кварцевого стекла, легированного фтором. Данный процесс может представлять интерес для задач кремниевой микроэлектроники, для создания компонентной базы радиофотоники и для других направлений практического применения.

1. Материалы и методы

Для получения качественных ПОВ, формируемых с высокой скоростью и эффективностью осаждения, требуется высокоплотная плазма с концентрацией электронов и ионов $> 10^{11} \text{ см}^{-3}$, работающая при пониженных давлениях. Этому условию удовлетворяет метод PCVD, использующий неизотермическую плазму резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления. Осаждение слоев чистого и легированного фтором кварцевого стекла на кремниевые и кварцевые подложки производилось на экспериментальной лабораторной СВЧ-плазмохимической установке (разработка ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Схема СВЧ плазмохимической установки и практическая реализация метода PCVD, применительно к осаждению слоев синтетического кварцевого стекла описаны в [11–12].

СВЧ-плазмотрон, как устройство возбуждения СВЧ-разряда на волне H_{10} , представлял собой проходной призматический резонатор на виде колебаний H_{10n} , где $n = 1, 2, 3, \dots$, с укорачивающей H -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 H-образного волновода введена опорная кварцевая труба, служащая плазмохимическим реактором (ПХР).

Размеры сечения плазмотрона: $a = 72$ мм, $b = 34$ мм. Структура электрического поля вдоль широкой стенки волновода – «а» такова, что на оси ОКТ наблюдается максимум электрического поля и в ней образуется квазиоднородная в поперечном сечении ОКТ СВЧ-плазма, длина области существования которой определяется подводимой СВЧ-мощностью, давлением газа (фактор E/P). Принцип работы установки основан на последовательном осаждении большого числа тонких (менее 1 мкм) прозрачных слоев кварцевого стекла, в том числе легированного фтором.

Микротвердость осажденных слоев фторированного кварцевого стекла, определялась на микротвердомере марки DURASCAN.

Стехиометрические исследования осажденных пленок осуществлялись на Оже-электронном спектрометре типа Jamp-9510F компании JEOL.

2. Экспериментальная часть

2.1. Осаждение на кремниевых подложках слоев отражающих оболочек на основе $\text{SiO}_2+\text{F}/\text{SiO}_2$

Для многослойного осаждения на кремниевой подложке слоев кварцевого стекла, легированного фтором нами был использован СВЧ-плазмотрон на волне H_{10} [5]. При этом можно охарактеризовать локальную плазму, создаваемую СВЧ-плазмотроном на волне H_{10} в резонансном режиме, как высокоплотную ($n_e > N_{\text{кр}}$), а сам СВЧ-разряд и применяемый PCVD-метод, как высокоэффективный технологический инструмент для проведения плазмохимических реакций окисления тетрахлорида кремния и синтеза кварцевого стекла, легированного фтором.

Следует также отметить, что плазменное образование поддерживается за счет диссипации электромагнитной энергии, подводимой по волноводу H_{10} , которая частично отражается от разряда или проходит через него. Степень

ионизации газа в объеме может быть оценена, исходя из значения критической концентрации электронов:

$$N_{кр} = \frac{m_4(\omega^2 + \nu_{эф}^2)}{4\pi e^2}, \quad (1)$$

где $\nu_{эф}$, e , m_e – эффективная частота столкновений электронов, заряд и масса электрона, соответственно.

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

КЗ-поршень и соотношение E/P позволяют настраивать СВЧ плазматрон на резонансный режим работы для обеспечения повышенной эффективности процесса плазмохимического осаждения кварцевого стекла и легирования его фтором. Настройка СВЧ плазматрона на резонансный режим, при рабочих условиях развития СВЧ-разряда производилась по максимальному уровню оптического излучения из плазмы, выводимого по световоду из центральной области СВЧ-плазматрона на светодиод и по минимальной отраженной СВЧ мощности от входа СВЧ плазматрона в плече ферритового циркулятора.

В процессе исследований метода осаждения кварцевых слоев, легированных фтором с повышенной концентрацией, с использованием конструкции СВЧ плазматрона на волне H_{10} , было установлено, что оптимальное качество слоев для фиксированной исходной частоты электромагнитных колебаний достигается положением КЗ поршня на конце волноводно-резонаторного СВЧ плазматрона и подбором значений СВЧ мощности и рабочего давления газа состава $SiCl_4 + O_2 + C_3F_8$ в плазме СВЧ-разряда пониженного давления. При этом следует учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, максимум осажденного слоя, даже при низких E ,

всегда находится при входе смеси в плазму. Это связано с высокой скоростью диссоциации SiCl_4 и последующих реакций окисления радикалов. Вторым фактором является то, что, по всей видимости, из-за низких констант скоростей диссоциации фторсодержащих соединений, образованных атомов фтора в плазме, ответственных за легирование слоев кварцевого стекла, много меньше по сравнению с SiO , и их образование по времени задерживается, что приводит к значительному отрыву SiO от F . Это характерно для дорезонансного режима горения СВЧ-разряда при малых уровнях СВЧ мощности, когда напряженность поля E в плазме невысока. Чтобы получить максимальную эффективность легирования стекла фтором (более 5 вес.%), необходимо положение максимума концентрации фтора приблизить к максимуму осаждения SiO_2 , то есть, уменьшить время диссоциации фторсодержащего реагента. Следовательно, E и n_e должны быть достаточно высоки, и чем выше E и крутизна нарастания n_e в передней граничной зоне СВЧ-разряда, тем ближе максимум концентрации фтора приближается к максимуму SiO . Этого можно добиться, если плазма СВЧ-разряда создается в открытой (неэкранированной) части кварцевой трубы, расположенной на участке СВЧ плазмотрона, что характерно для резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления, обеспечивающего максимальное значение напряженности электрического поля в плазме при минимальной входной СВЧ мощности.

Осаждение слоев чистого и легированного фтором кварцевого стекла на кремниевые пластины производилось в ОКТ диаметром 20x16, 18x14 мм. Кремниевые пластины (поликристаллический кремний) шириной 12...14 мм, длиной до 50 мм и толщиной 0.5 мм фиксировались внутри ОКТ.

В реакторе при воздействии СВЧ-энергии на газовую среду возбуждается объемный стационарный СВЧ-разряд. С помощью механизма перемещения 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 на подложку происходит в результате гетерогенной

плазмохимической реакции в СВЧ-разряде при взаимодействии плазмы с потоком парогазовой смеси, поступающей от химического блока с галогенидами. Продукты реакции откачиваются вакуумным насосом, использование которого обеспечивает также поддержание заданного пониженного давления в реакторе.

На рис.1 и рис.2 представлены профили осаждаемых слоев в статическом режиме (без перемещения ОКТ). Максимум осаждаемого слоя находится в самом начале плазменного сгустка, что характеризует высокую скорость диссоциации SiCl_4 .

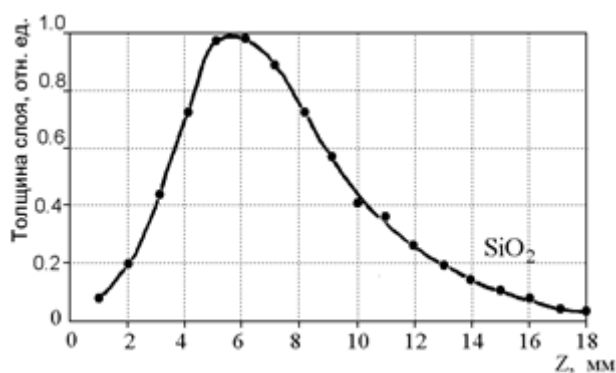


Рис.1. Профиль толщины осаждаемого слоя в направлении оси ПХР в статическом режиме.

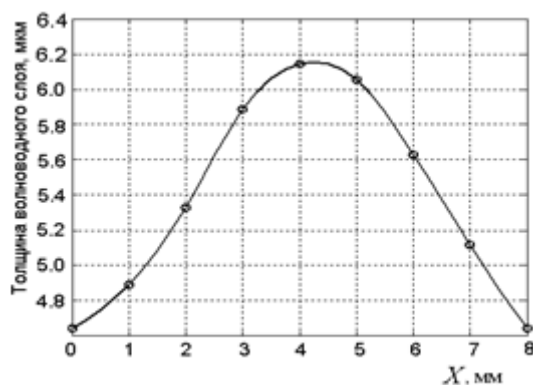
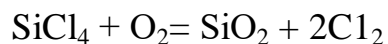


Рис.2. Профиль толщины волноводного слоя в направлении поперечном к оси ПХР.

Плазмохимический синтез и формирование тонких слоев кварцевого стекла, легированного фтором на кремниевые подложки, производилось реакцией окисления SiCl_4 при избытке кислорода:



Исследования проводились, в основном, при использовании СВЧ мощности в пределах 600...800 Вт, и при рабочих давлениях парогазовой смеси 8...10 Торр. Плазмообразующим газом являлся кислород. Основные реагенты — SiCl_4 , O_2 и C_3F_8 . Расходы: O_2 : 350...700 см³/мин, O_2 на барбатер с SiCl_4 : 60...80 см³/мин и C_3F_8 : 5...7 см³/мин. Температура ОКТ: 1050...1250 °С.

Эксперименты показали, что на кремниевых подложках растет прочная, твердая (устойчивая к механическому воздействию – царапанию острым стальным предметом), прозрачная пленка фторированного кварцевого стекла толщиной 1...60 мкм. Микротвердость осажденных слоев фторированного кварцевого стекла находится в пределах $HV_{0,1} = 1000...1140$, что сопоставимо с микротвердостью кристаллического кварца.

Скорость роста пленок в данном цикле экспериментов находилась в пределах от 1 до 3 мкм/мин. Толщина пленок определялась на микроскопе (на сколе пластины). Анализ стехиометрии полученных пленок проводился на Оже-электронном спектрометре.

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. Точность определения регистрируемых концентраций внедряемых атомов применяемым методом порядка 0,1...0,3 ат%).

На рис.3. представлены характерные профили распределения атомов по глубине осаждаемых слоев.

Стоит 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.

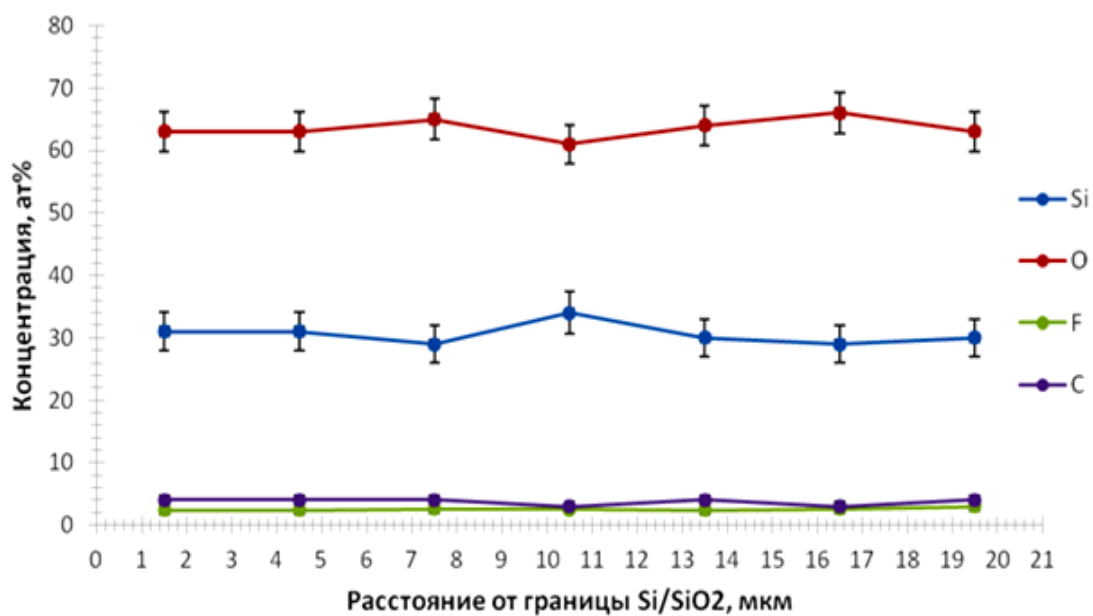


Рис.3. Распределение атомов Si, O, F, C по глубине слоя в 7 точках слоя SiO₂.

Ниже представлен снимок сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) – рис.4 скола пластины.

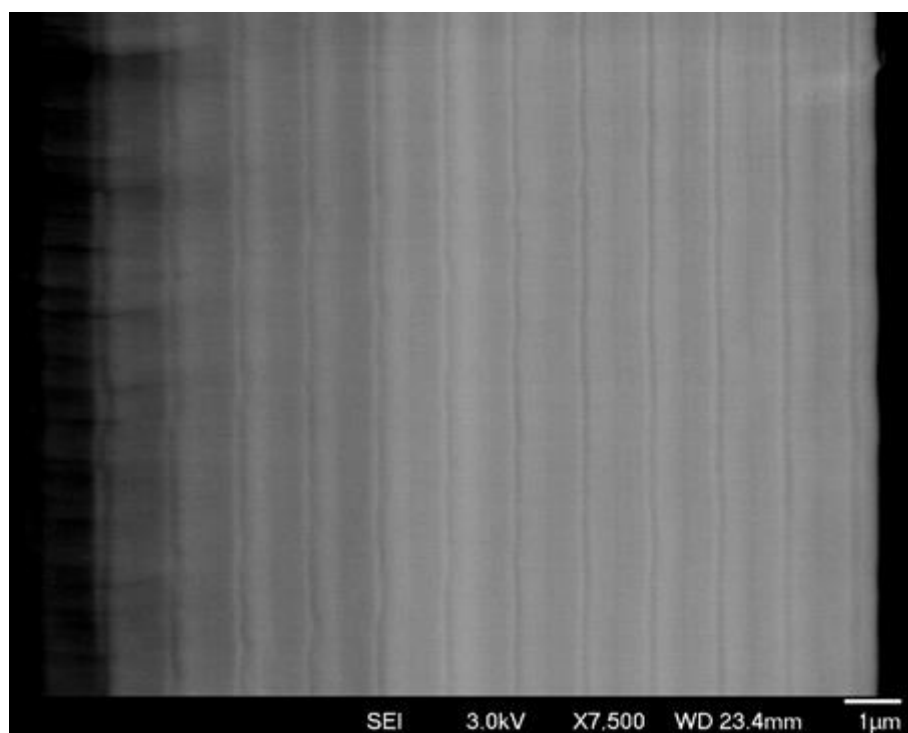


Рис.4. Снимок СЭМ скола пластины с более высоким увеличением. Вид сверху на торец.

Наблюдаемые на снимке чередующие темные и светлые полосы параллельные плоскости кремниевой подложки, обусловлены особенностью действия установки, а именно наличием возвратно-поступательного перемещения ОКТ и несколько отличающимися скоростями прямого и обратного её хода, а также периодического изменения (более медленного), при этом, газодинамических условий в ОКТ и, соответственно, изменение условий развития СВЧ-разряда, приводящие к периодическому изменению температуры стенок ОКТ и самой кварцевой подложки. В результате чего меняется эффективность внедрения фтора в растущую пленку. При этом, видимо, несколько меняется, в небольших пределах, и соотношение концентраций внедряемых атомов Si и O в структуру осаждаемых слоев кварцевого стекла, легированного фтором. Следует отметить, что осаждение толстых пленок (свыше 2 мкм) чистого SiO₂ (без фтора) на кремниевую подложку даже при достаточно высоких температурах подложки (1150...1200°C) сопровождается наличием большого количества трещин 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°C). Этим объясняется высокая стойкость кварцевого стекла к термическим ударам. Чистый кремний имеет существенно более высокий КЛТР, равный $4,25 \times 10^{-6}$ К.

2.2. Формирование планарных волноведущих структур состава SiO₂-F/SiO₂ на кварцевых подложках

Эксперименты проводились на той же макетной СВЧ-плазмохимической установке. Процесс изготовления полосковых многомодовых волноводов включал несколько этапов. На первом этапе в ПХР на подложки из кварцевого стекла с размерами 60×8×1 мм последовательно производилось осаждение буферного слоя SiO₂ толщиной 5 мкм, далее нижнего фторсиликатного слоя SiO₂-F с толщиной 15 мкм и показателем преломления $n = 1,425$, волноводного

слоя SiO_2 с толщиной 85 мкм, $n = 1,46$ 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 $\text{SiO}_2\text{-F}$ -оболочкой. Изображение поперечной структуры краевой области торцевого участка полученных оптических волноводов представлено на рис.5.

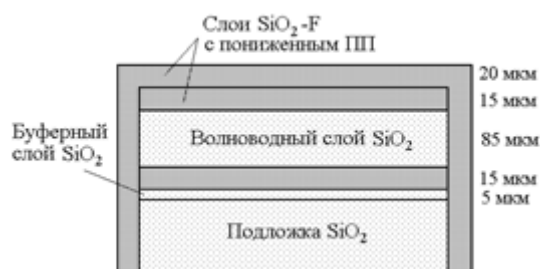


Рис.5. Схематическое изображение поперечной структуры полоскового волновода.

Для оптимизации процесса легирования кварцевого стекла фтором и осаждения фторсиликатного стекла нами были апробированы различные фторагенты ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}$, SF_6 и т.д.). Самым эффективным фторагентом оказался фреон-218 (C_3F_8). На рис.6 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 при различных температурах стенки ОКТ.

При расходе фреона-218 $\sim 6 \dots 7$ см³/мин и температуре стенки ОКТ $\sim 1050^\circ\text{C}$ обеспечивается достижение числовой апертуры вплоть до 0,32 (содержание фтора в стекле до 7 вес.%), что является результатом мирового уровня.

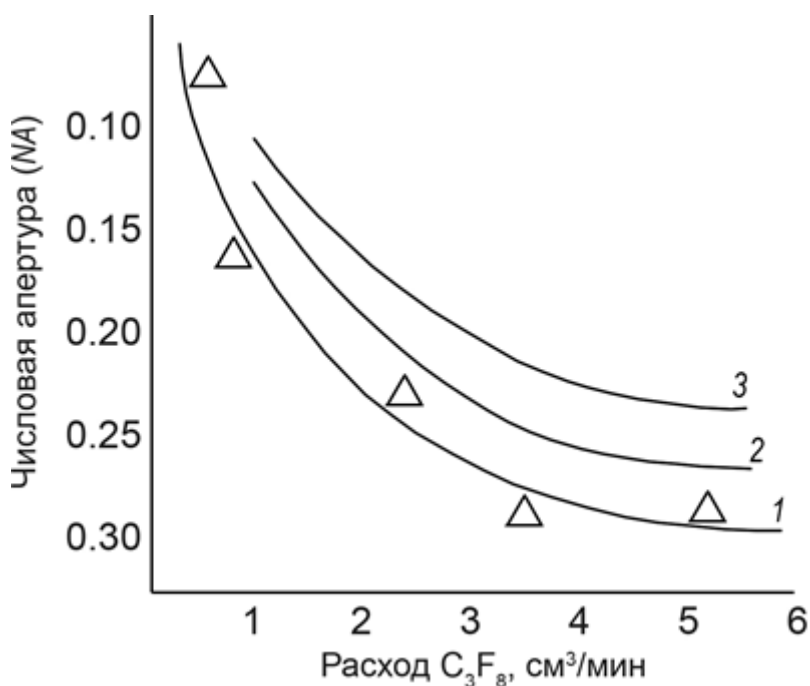


Рис.6. Зависимость числовой апертуры слоев SiO_2-F от расхода фреона в газовой фазе при различных температурах стенки ОКТ: 1 – температура стенки ОКТ $\sim 1050^\circ C$, 2 – температура стенки ОКТ $\sim 1150^\circ C$, 3 – температура стенки ОКТ $\sim 1200^\circ C$.

Планарные и полосковые многомодовые и одномодовые оптические волноводы являются базовыми структурами различных волоконно-оптических компонентов локальных систем передачи информации, Кроме того, такие волноводы находят применение для создания оптических компонентов информационных систем подвижных объектов, к которым предъявляются повышенные требования по стойкости к температуре и механическим воздействиям.

Основными характеристиками планарных волноводов, в значительной степени определяющими возможность их использования в оптических компонентах волоконно-оптических информационных систем, являются коэффициент затухания и числовая апертура. Коэффициент затухания оценивался по результатам измерения затухания тестовых образцов световодных элементов, формируемых при тех же технологических режимах. При этом коэффициент затухания α световодного элемента определялся путем измерения значений мощности излучения P_1 и P_2 на его выходе соответственно

при исходной длине образца L_1 и после укорочения волновода до длины L_2 с последующим вычислением по формуле:

$$\alpha = 10(L_1 - L_2)^{-1} \lg(P_2/P_1) \quad (2)$$

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, измерялась на уровне 10% световой мощности в сечении распределения света в дальнем поле на длине волны 1,3 мкм и составила около 0,24.

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 [13–15].

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 рис.7 показаны примеры применения полосковых многомодовых волноводов в волоконно-оптических разветвляющих устройствах. Структура представленных разветвителей образуется путем соединения полоскового волновода с торцевыми участками уложенных в ряд волоконных световодов состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$, образующих оптические полюса разветвителя. В рассматриваемых разветвителях планарный волновод служит для равномерного распределения оптического сигнала, подаваемого на один из входных оптических полюсов, по всем выходным полюсам.

Полосковые волноводы с толщиной волноводного слоя 85 мкм и шириной 1950 мкм, изготовленные по представленной выше технологии, были использованы в многополюсных разветвителях проходного типа с матрицей передачи 2×16 и 16×16 , предназначенных для работы в составе локальных

волоконно-оптических систем передачи информации. Разброс коэффициентов передачи между оптическими полюсами, обусловленный неоднородностью распределения излучения в волноводе и технологическими погрешностями при сборке, составил менее 1,5 дБ при средних вносимых потерях (с учетом коэффициента деления) не более 17,5 дБ.

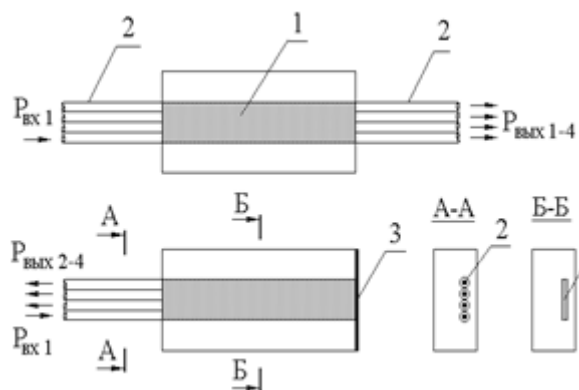


Рис.7. Волоконно-оптические многополюсный разветвители проходного (а) и отражательного (б) типов: 1 – полосковый оптический волновод, 2 – волоконные световоды, 3 – отражающее покрытие.

Подобным образом формировались структуры планарных одномодовых волноводов (ОВ), включающей волноводный слой SiO_2 с толщиной 6 мкм и показателем преломления $n_d = 1,456$, два фторсиликатных светоотражающих слоя с толщиной 10 мкм и $n_d = 1,452$ и буферный слой SiO_2 толщиной 5 мкм.

Заключение

1. Показано, что неизотермическая плазма резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления является эффективным инструментом формирования на кремниевых и кварцевых подложках пленок как чистой двуокиси кремния, так и легированной фтором. Достигнуты высокие скорости и эффективности осаждения кварцевого стекла, легированного фтором (до 7 вес.% легирования стекла фтором, при скорости осаждения пленки свыше 3 мкм/мин).

2. Созданы планарные и полосковые многомодовые и одномодовые оптические волноводы на кварцевых подложках, которые являются базовыми

структурами различных волоконно-оптических компонентов локальных систем передачи информации.

3. Не наблюдается наличие трещин в пленках, легированных фтором, формируемых на кремниевых подложках даже при значительных их толщинах (20...60 мкм). При этом плавное контролируемое снижение показателя преломления до значений 1,40...1,43 по сравнению с показателем преломления чистого кварцевого стекла (1,456) позволит в более широких пределах изменять свойства разрабатываемых ПОВ (толщины сердцевины и оболочки, концентрационный профиль и т. д.).

4. Применение метода PCVD позволяет достигнуть лучшей беспримесной стехиометрии при образовании пленок SiO₂, чем другими известными методами (включая PECVD-метод).

Литература

1. 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.
2. Meint K. Smit, Van Dam C. PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. 1996. Vol.2. No.2. P.236-250. <https://doi.org/10.1109/2944.577370>
3. Гончаров А.А., Кузмин С.В., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Трусов Н.В. Интегрально-оптический демультиплексор на основе волноводной структуры SiO₂-SiON. *Квантовая электроника*. 2005. Т.35. №12. С.1163-1166. <https://doi.org/10.1070%2FQE2005v035n12ABEH013044>
4. Wang X., Zhou L., Li R., Xie J., Lu L., Wu K., Chen J. Continuously tunable ultra-thin silicon waveguide optical delay line. *Optica*. 2017. Vol.4. No.5. P.507-515. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000507>
5. Гонтарев Г.Г., Блинов Л.М., Володько В.В., Лысов Г.В., Заморенов А.Т.,

- Трухин А.В. СВЧ плазматрон на волне H_{10} . Авт. свид. № 231037, 20.09.1967.
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. *Известия АН СССР*. 1990. Т.54. №8. С.1570-1573.
7. 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/jre/dec14/4/text.pdf>
8. Блинов Л.М., Заморенов А.Т., Кирсанов А.В., Лысов Г.В., Петров Е.А. Установка для сверхвысокочастотной плазменной обработки. Авторское свид. СССР № 876039, 29.02.1980.
9. 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*. Москва, 1999. С.71-73.
10. Долгов И.И., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной. *Фотон-Экспресс*. 2005. Т.46. №6. С.4-10.
11. Бабенко В.А., Кочмарев Л.Ю., Шилов И.П. Сверхвысокочастотный разряд волноводного плазматрона для осаждения высокоапертурных структур на основе кварцевого стекла. *Радиотехника и электроника*. 2005. Т.50, №1. С.100-107.
12. Бабенко В.А., Кочмарев Л.Ю., Шилов И.П. Устройство для изготовления оптических волноводов. Патент на полезную модель № 7428, 10.07.2008.
13. Берикашвили В.Ш., Григорьянц В.В., Шилов И.П. и др. СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла. *Микросистемная техника*. 2004. №8. С.28-33.
14. 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. С.363-369.

15. 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. *Радиотехника и электроника*. 2008. Т.53. №8. С.1017-1022.

Для цитирования:

Кочмарев Л.Ю., Шилов И.П. Осаждение планарных волноведущих структур со фторсиликатной оболочкой на кремниевые и кварцевые подложки в локальном СВЧ-разряде пониженного давления. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.1>