

Д. ф.-м. н. В. В. ГРИГОРЬЯНЦ, А. П. ДОЛГОВ,
Л. Ю. КОЧМАРЁВ, к. т. н. И. П. ШИЛОВ

Россия, г. Фрязино, ФО Института радиотехники и
электроники
E-mail: ipshilov@mtu-net.ru

Дата поступления в редакцию
27.09 2005 г.

Оппонент В. Н. ИВАНОВ
(НИИ "Орион", г. Киев)

СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Представлены результаты разработки технологии и исследования оптических характеристик высокоапертурных ПОВ на основе $\text{SiO}_2\text{-F|SiO}_2\text{|SiO}_2\text{-F}$ -структур, формируемых в плазме СВЧ-разряда.

Планарные оптические волноводы (ПОВ) на кремниевых и кварцевых подложках широко применяются в МОEMS-технологиях, интегрально-оптических датчиках, в компонентах оптической связи, в частности в пассивных и активных оптических разветвителях [1, 2].

В большинстве случаев для формирования ПОВ используются методы парофазного химического осаждения (CVD), осаждения пламенным гидролизом (FHD), ВЧ-плазменным химическим парофазным осаждением (PECVD). При этом волноводные структуры базируются преимущественно на SiO_2 -слоях отражающей оболочки и слоях сердцевин из нитрида кремния (Si_3N_4) или оксинитрида кремния (SiO_xN_y), а также из легированного кварцевого стекла ($\text{SiO}_2\cdot\text{GeO}_2$). Однако при формировании волноводных слоев перечисленными методами возникают значительные внутренние напряжения. Это не позволяет создавать волноводные структуры с достаточно высокой апертурой (более 0,25) и с поперечными размерами волноводной области, обеспечивающими эффективное согласование со стандартными многомодовыми волокнами с диаметром сердцевин 50 и 100 мкм.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии и исследования оптических характеристик высокоапертурных ПОВ на основе $\text{SiO}_2\text{-F|SiO}_2\text{|SiO}_2\text{-F}$ -структур, формируемых в плазме СВЧ-разряда пониженного давления.

Экспериментальная установка

Формирование ПОВ производилось путем осаждения слоев чистого и легированного фтором SiO_2 на подложки из кварцевого стекла размерами $60\times 10\times 1$ мм в плазмохимическом реакторе (кварцевая труба с внутренним диаметром до 24 мм) с помощью опытной СВЧ-плазмохимической установки разработки ФИРЭ РАН. Плазмохимический реактор (ПХР) с подложками помещен в электрическую печь сопротивления; соосно с ПХР в центре печи расположен СВЧ-плазмотрон волноводного типа, соединенный волноводным трактом с СВЧ-генератором (мощность 5 кВт, частота 2,45 ГГц). В ПХР при воздействии СВЧ-энер-

гии на газовую среду (аргон) возбуждается локальное плазменное образование. С помощью механизма перемещения ПХР совершает вдоль СВЧ-разряда (СВЧР) возвратно-поступательные перемещения, в результате чего после каждого прохода на подложку осаждается тонкая прозрачная пленка стекла толщиной 0,1—0,5 мкм.

Известно, что для эффективного образования в плазме газового разряда свободных радикалов, ответственных за проведение требуемых плазмохимических реакций на поверхности подложки с целью получения нужного продукта, необходимо, чтобы температура электронов в разряде T_e была существенно выше газовой T_g . Отношение T_e/T_g почти линейно зависит от параметра E/P (E — напряженность электрического поля, P — давление газа), который определяет как свойства плазмы, так и скорости протекания плазмохимических реакций. Основная физическая проблема сводится, таким образом, к созданию в СВЧР максимально возможной напряженности электрического поля при рабочих давлениях газа 1—10 Торр.

Для повышения эффективности процесса плазмохимического осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, нами предлагается в качестве СВЧ-плазмотрона использование устройства возбуждения СВЧР на волне H_{10} , которое представляет собой короткозамкнутый (КЗ) отрезок волновода сечением 72×34 мм (или 72×20 мм) с КЗ-поршнем (КЗП) и введенной в него опорной кварцевой трубой (ОКТ) нормально к широкой стенке. Вне волновода ОКТ окружена металлическим экраном.

Структура электрического поля вдоль широкой стенки волновода a такова, что на оси наблюдается максимум электрического поля, а при выполнении соотношения $a/2r > 5$ ($2r$ — внутренний диаметр ОКТ) образуется квазиоднородная в поперечном сечении ОКТ СВЧ-плазма, длина области существования которой определяется подводимой СВЧ-мощностью, давлением газа, размерами ОКТ и т. д.

Проведены расчеты для следующих экспериментальных условий:

- размеры ОКТ: $2r=14$ мм (внутренний диаметр), $2R=18$ мм (наружный диаметр);
- сечение прямоугольного волновода: $a=72$ мм, $b=34$ мм (узкая стенка);
- подводимая СВЧ-мощность $W_{\text{под}}=600$ Вт;
- рабочая частота СВЧ-генератора 2,45 ГГц.

В результате расчетов получили:

$$E_V = 3,68 \cdot 10^4 \text{ В/м}, E_A = 1,2 \cdot 10^5 \text{ В/м},$$

где E_A и E_V — амплитуды СВЧ-поля в случаях, когда СВЧР соответственно существует и отсутствует в кварцевой трубе при постоянной подводимой СВЧ-мощности $W_{\text{под}}$.

В случае использования прямоугольного волновода размерами $a=72$ мм, $b=20$ мм при тех же экспериментальных условиях получим:

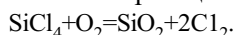
$$E_V = 4,8 \cdot 10^4 \text{ В/м}, E_A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

Таким образом, сравнительный анализ основных электродинамических параметров устройств возбуждения СВЧР показывает, что СВЧ-плазмотрон волноводного типа на волне H_{10} с размером узкой стенки 20 мм, обеспечивая наибольшую величину напряженности электрического поля, наиболее перспективен для разработки ПОВ с повышенной числовой апертурой.

Синтез кварцевого стекла в СВЧР

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 отщеплении атомов хлора от радикалов SiCl_n ($n=1, \dots, 4$) электронным ударом. Анализ функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) показывает, что в данном типе разряда средняя энергия электронов превышает 1 эВ, а энергия "горячих" электронов в высокоэнергетическом "хвосте" ФРЭЭ составляет 4—6 эВ. При этом, как указывают измерения ФРЭЭ, концентрация электронов с энергией $\epsilon > 1$ эВ больше в СВЧ-разряде на смеси тетрахлорида кремния с кислородом, чем в чистом кислороде.

Впервые анализ кинетики процессов, происходящих в смеси $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$ в СВЧР при осаждении пленок кварцевого стекла, проделан в [3]. Модель, которой описывался процесс, была, по-видимому, самой простой из возможных. Принималось, что область, занимаемая плазмой в резонаторе, имеет резкую границу; в потоке газа, пересекающем эту границу, сразу начинается реакция:



Возникающие при этом частицы SiO_2 , не образуя кластеров, диффундируют к подложкам и при первом же столкновении закрепляются на них.

В работе была подобрана константа реакции, наилучшим образом описывающая получающийся в эксперименте профиль осаждения:

$$K = 4480 \text{ с}^{-1}.$$

Однако ценность полученной константы невелика, поскольку данная реакция ни в коей мере не может описывать многочисленные процессы с участием молекул, радикалов, электронов, ионов, возбужденных частиц, которые имеют место в плазме.

Нами была разработана модель процесса синтеза кварцевого стекла в плазме СВЧР, куда были включены следующие виды частиц: SiCl_4 , SiCl_3 , SiCl_2 , SiCl , Si , SiO , Cl , O_2 , O , электроны. Некоторые результаты расчетов в виде концентрационных зависимостей (Y) от времени (t) даны на **рис. 1** (здесь обозначение

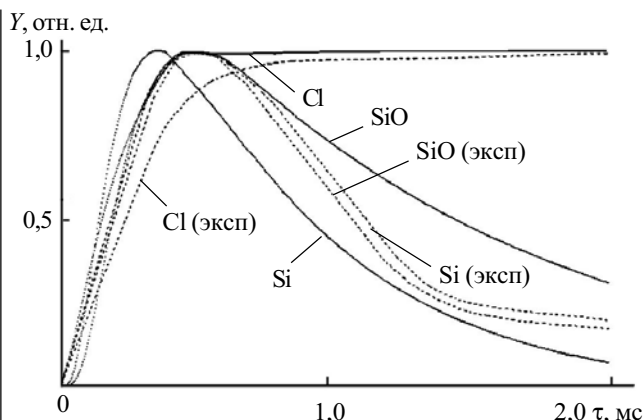


Рис. 1. Концентрационные зависимости от времени для SiO , Si , Cl

"эксп" означает "экспериментальный"). Из рисунка видно, что наиболее долгоживущими в плазме СВЧР являются такие компоненты как SiO , Si , Cl ($\tau > 1$ мс). Время реакции для тетрахлорида кремния составляет около 10^{-4} с, т. е. этот компонент, попав в зону СВЧР, практически моментально разваливается.

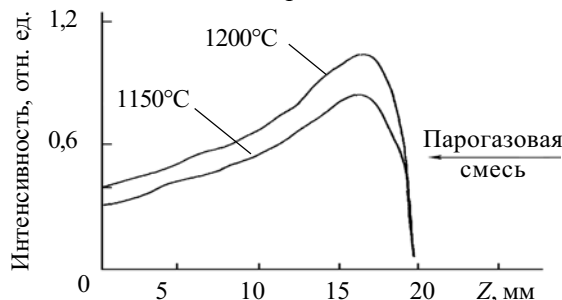


Рис. 2. Продольное распределение интенсивности линии SiO (425 нм) по длине СВЧР при различных температурах стенки опорной трубки ($Z=0$ — центр СВЧР)

Преобразование SiCl_4 в SiO и адсорбция последнего стенками опорной кварцевой трубки в основном завершается на длине 3—4 см СВЧР. Это подтверждается измерениями распределения интенсивности эмиссионной полосы SiO на длине волны 425 нм вдоль оси разряда (**рис. 2**). В спектре излучения отсутствуют полосы SiO_2 , что свидетельствует о гетерогенном механизме синтеза кварцевого стекла [4]. В дальнейшем адсорбированные молекулы монооксида доокисляются на поверхности подложек до SiO_2 .

Экспериментальные результаты

На начальной стадии отработки методики формирования высокоапертурных $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2\text{/SiO}_2\text{-F}$ ПОВ-структур нами изучался процесс осаждения чистого кварцевого стекла в статическом режиме (т. е. без перемещения ПХР относительно плазмотрона) с целью определения профиля осаждаемых слоев и нахождения его максимума. На **рис. 3** представлен экспериментальный профиль осаждения SiO_2 .

Как видно из рисунка, максимум осаждаемого слоя находится в самом начале плазменного сгустка, что объясняется высокой скоростью диссоциации SiCl_4 . Характер экспериментального профиля осаждения во многом совпадает со спектральными исследованиями распределения интенсивности линии SiO

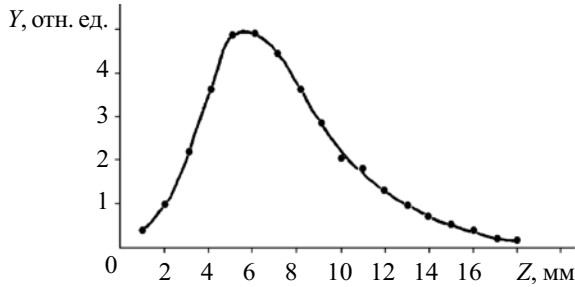


Рис. 3. Профиль осаждения SiO_2 в статическом режиме СВЧР

вдоль оси опорной трубки (рис. 2). При перемещении ПХР относительно плазматрона осуществлялся процесс гетерогенного осаждения оптически прозрачных слоев чистого кварцевого стекла с достаточно равномерным (не хуже 5%) профилем осаждения по длине подложки.

Добавление к исходной газовой смеси фторагента (что необходимо для легирования кварцевого стекла фтором при формировании фторсиликатной светоотражающей оболочки) приводит к тому, что за транспорт кремния в газовой фазе уже будут отвечать молекулы SiF_4 или радикалы SiF_m ($m < 4$), а в конденсированной фазе будут, по всей видимости, образовываться молекулы типа $\text{SiO}_{1,5}\text{F}$, в которых тетраэдрически расположенный атом кремния связан с одним атомом фтора и тремя атомами кислорода.

Для оптимизации процесса осаждения фторсиликатного стекла нами были апробированы различные фторреагенты ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}$, SF_6 и т. д.). Самым эффективным фторагентом оказалась фреон-218 (C_3F_8). Использование фреона-218 обеспечивает достижение числовой апертуры вплоть до 0,28 при использовании волноводного плазматрона H_{10} с шириной узкой стенки 20 мм. На наш взгляд, для получения высокого уровня легирования кварцевого стекла фтором необходимо добиваться совпадения концентрационного максимума F в газовой фазе с максимумом профиля осаждения кварцевого стекла, который локализован в самом начале разряда. Поскольку константа скорости диссоциации $k_{\text{дис}}$ фторсодержащих реагентов ниже, чем у тетраоксида кремния, необходимо уменьшать время диссоциации фторагентов τ , увеличивая удельный энерговыход в СВЧ-разряде и тем самым повышая концентрацию электронов N_e ($\tau \approx 1/k_{\text{дис}} N_e$). Эту задачу в значительной степени и помогает решить использование СВЧ-плазматрона волноводного типа с уменьшенным размером узкой стенки.

На рис. 4 представлено схематическое изображение структуры и микрофотография торцевого участка планарного оптического волновода. Волновод включает в себя волноводный слой чистого SiO_2 (толщина 100 мкм, показатель преломления 1,456), два фторсиликатных отражающих слоя (толщина 15 мкм, показатель преломления 1,425) и буферный слой SiO_2 толщиной 5 мкм.

Для измерения оптических характеристик полученных структур из сформированных планарных волноводов были изготовлены образцы с полосковой геометрией с размерами $40 \times 2 \times 1$ мм. На боковые стенки волноводов наносился слой светоотражающего покрытия, в качестве которого использовался кремний-органический компаунд типа СИЭЛ с показателем пре-

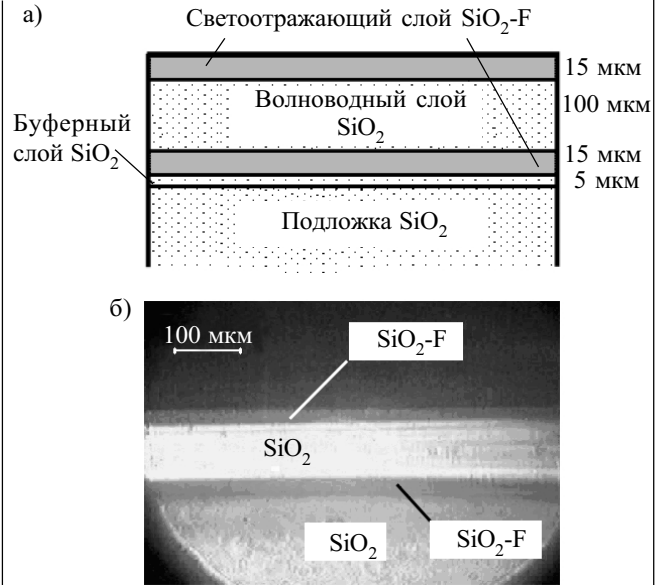


Рис. 4. Структура (а) и микрофотография (б) торцевого участка планарного оптического волновода

ломления 1,421. Коэффициент затухания изготовленных образцов составлял менее 0,005 дБ/см при числовой апертуре (измеренной по уровню 0,1) $NA=0,26$.

Основной характеристикой оптического волновода, определяющей возможность его использования в качестве смесительного элемента в оптических разветвителях, является степень равномерности распределения оптической мощности на выходном торце вдоль световедущего слоя при вводе излучения из волоконного световода. В общем случае вид распределения зависит от длины и оптической однородности волновода, а также от места ввода излучения.

На рис. 5 представлены микрофотография торцевого участка полоскового волновода и эксперимен-

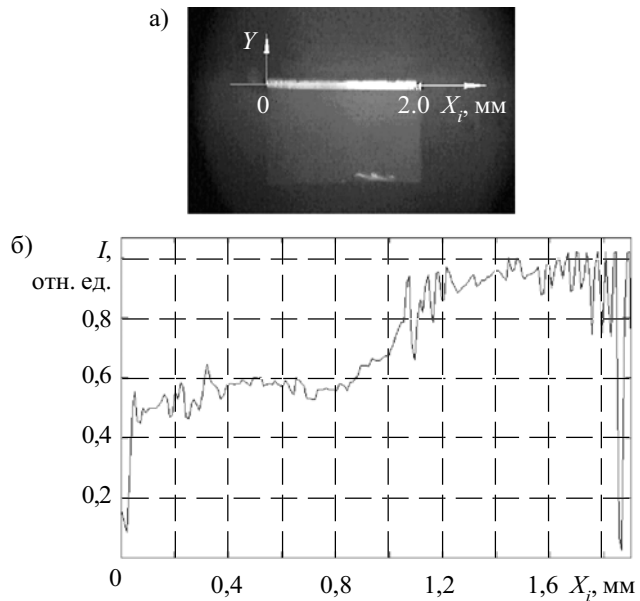


Рис. 5. Микрофотография торцевого участка (а) и распределение интенсивности I оптического излучения на выходном торце (б) полоскового волновода при вводе излучения в крайнюю область волноводного слоя

тальная кривая распределения интенсивности излучения вдоль оси X волноводной области, полученная при вводе в краевую ($X_i=1,8$ мм) область волноводного слоя излучения с длиной волны 0,85 мкм. Неравномерность распределения интенсивности оптического излучения на выходе волновода составляла не более 50%. Наблюдаемая в краевой зоне осцилляция кривой объясняется эффектом многолучевой интерференции в полосковой структуре. Четкость интерференционной картины обусловлена как достаточным качеством оптической обработки боковых поверхностей волновода, так и высокой однородностью структуры полученных образцов.

На основе полосковых волноводов были изготовлены разветвители с матрицей передачи 16×16 , предназначенные для распределения мощности в волоконно-оптических системах информационного обмена. Структура разветвителя образуется путем соединения полоскового волновода с торцевыми участками уложенных в ряд оптических волокон с диаметром сердцевины 100 мкм и числовой апертурой 0,22.

Измеренное значение вносимых потерь изготовленного образца разветвителя составило не более 5 дБ при неравномерности распределения оптической мощности $\pm 1,5$ дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к разветвителям современными волоконно-оптическими системами передачи информации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Житковский В. Д., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я. Многоплоскостные 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. Ключник Н. Т., Гурьянов А. В., Белянин В. Ф. и др. Формирование оптической волноводной структуры, включающей область из нанокompозитного материала / Нанотехнологии и фотонные кристаллы. Мат-лы I Межрегион. семинара.— Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.— С. 50—59.
3. Welling F. // J. Appl. Phys.— 1985.— Vol. 57, N 9.— P. 4441—4446.
4. Bauch H., Krause D., Paquet V. et al. Properties of PICVD-fibers with pure SiO₂-core: the influence of the preform collapse process // J. Opt. Commun.— 1987.— Vol. 8, N 4.— P. 191—197.

*К. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО, Б. П. ПОЛОЗОВ,
к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ, к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ,
В. Н. ИВАНОВ, к. т. н. Ю. Н. СВЕШНИКОВ*

Украина, г. Киев, Ин-т ядерных исследований, НИИ «Орион»;
Россия, г. Москва, «Элма-малахит»
E-mail: boris@kinr.kiev.ua, interdep@kinr.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
05.07 2005 г.

Оппонент *к. ф.-м. н. С. В. ГРУШЕЦКИЙ*
(БГУИР, г. Минск)

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Описаны особенности технологии травления сложных наноструктур, содержащих эпитаксиальные слои нитрида галлия, нанесенные на подложку из сапфира. Изготовлены высокотемпературные датчики Холла.

Нитрид галлия — один из новых полупроводников, привлекающий к себе в последнее время все большее внимание со стороны исследователей и технологов. Это связано с наличием у него прямых зона-зона-переходов, ширина большой запрещенной зоны которых — 3,51 эВ для структуры вюрцита и 3,3 эВ для кубической структуры [1]. Благодаря этой особенности эпитаксиальные структуры нитрида галлия являются перспективными для применения в высокотемпературной оптоэлектронике, СВЧ-микронике, лазерной технике [2]. В частности, они используются для разработки высокоэффективных лазеров с диапазоном излучения от ультрафиолетовой до зеленой областей спектра.

Нитрид галлия используется также для изготовления других источников видимого излучения со спек-

тром, близким к солнечному, которые имеют в данный момент коэффициент преобразования электрической энергии в световое излучение >40% с планируемым КПД до 60% [3]. Представляет интерес и разработка высокотемпературных датчиков Холла для измерений магнитных полей, которые могут работать при температурах до 600°C.

Разработка эффективной технологии травления этого нового полупроводникового материала относится к числу актуальных задач. В настоящей работе описаны особенности технологии травления сложных наноструктур, содержащих эпитаксиальные слои нитрида галлия, нанесенные на подложку из сапфира.

Исследования проводились при разработке высокотемпературных датчиков Холла. Использовались сложные наноструктурные слои, содержащие эпитаксиальные слои нитрида галлия. Эпитаксиальные структуры, которые подвергались плазмохимическому травлению, были последовательно нанесены на подложку из сапфира и содержали следующие нанослои: n -структура нитрида галлия (n -GaN), титан, алюминий, борид титана (TiB_2), золото или n -структура нитрида галлия (n -GaN), титан, алюминий, титан,