

Исследование и разработка методов синтеза наноструктур с фотонной запрещенной зоной

Токарев С.В.

*Студент,
кафедра «Проектирование и технология ЭВС»*

Научный руководитель: Власов А.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

Основные методы нанесения тонких пленок: метод термовакuumного напыления, электронно-лучевое испарение, диодное распыление, катодное распыление, лазерные метод, химическое осаждение из газовой фазы, магнетронное напыление.

Метод термовакuumного напыления.

Метод основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсации его на поверхность. Нагрев резистивным способом обеспечивается за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока непосредственно через напыляемый материал или через испаритель, в котором он помещается. Способ применяется при испарении материалов, температура нагрева которых не превышает 1500°C.

Достоинствами метода являются простота и его отработанность, недостатками - необходимость высоких температур (поэтому сложность нанесения материалов и многокомпонентных сплавов); инерционность процесса; разбрызгивание материала при кипении; неравномерность толщины напыляемого слоя.

Электронно-лучевое испарение

Ускоренный пучок электронов с помощью отклоняющей системы непосредственно направляется на поверхность испаряемого материала. При столкновении с частицами окружающей среды электроны могут терять свою энергию и изменять направление движения.

Диодное распыление.

Диодная установка для напыления состоит из двух плоских электродов, расположенных параллельно и отстоящих друг от друга на расстоянии от 5 до 15 см. Катод изготавливают из напыляемого материала. Камера предварительно вакуумируется до 10^{-3} Па и на катод подается потенциал от 3 до 5 кВ. При определенном напряжении возбуждается в аргоне тлеющий разряд постоянного тока. Положительные ионы, ускоренные в прикатодной области, бомбардируют и распыляют поверхность катода – напыляемого материала. Поток распыленных атомов осаждается на подложке в виде тонких пленок. Незначительные скорости осаждения (0,01 мкм/мин), обусловлены низкой плотностью ионного тока на катоде и невысокий вакуум ограничивают применение метода. Кроме того, эмитированные катодом и ускоренные в электрическом поле (от 2 до 5 кэВ) электроны интенсивно бомбардируют анод и размещенные на нем подложки, вызывая их перегрев и радиационные дефекты в структуре.

Катодное распыление.

Положительно заряженные ионы газа двигаются с большой скоростью к катоду,

ударяются о него и за счет кинетической энергии выбивают из катода атомы. Эти атомы двигаются случайным образом и осаждаются во всех возможных точках вакуумной камеры.

Причиной ионизации газа или появление плазмы являются электроны, вылетающие из катода и двигающиеся с большой энергией к положительно заряженным стенкам вакуумной камеры. На пути эти электроны ионизируют ионы газа. Положительные ионы газа, в свою очередь, приложенным отрицательным напряжением ускоряются по направлению к катоду.

Достоинствами метода являются применимость к тугоплавким материалам и сплавам; малоинерционные (не требуют высокой температуры), недостатками высокое давление остаточных газов и Ag (поэтому не очень чистая пленка); неприменимость к диэлектрическим материалам.

Лазерный метод.

Он позволяет получать тонкие пленки (до нескольких нанометров) металлов, оксидов, нитридов, сульфидов и др. в одинаковых условиях и на поверхности определенной минеральной матрицы.

Главное достоинство – возможность одинаково хорошо испарять все химические элементы, содержащиеся в мишени. Динамика процесса такова, что состав пленки почти полностью повторяет состав мишени. При правильном подборе температуры и давления происходит послойный рост с необходимой структурной фазой.

Химическое осаждение из газовой фазы.

По качеству получаемых пленок этот метод не уступает лазерному испарению. К преимуществам метода относят высокую скорость осаждения при сохранении высокого качества пленок, а также возможность нанесения пленок на детали сложной конфигурации и большой площади.

Магнетронное напыление.

Технология получения пленочных покрытий основана на явлении магнетронного распыления вещества мишени под действием бомбардировки мишени ионами плазмы. При этом распыляемый металл мишени или химические соединения металла осаждаются на поверхности стекла в виде слоя заданного стехиометрического состава.

Поскольку ионы закручиваются и разгоняются магнитным полем, их скорость выше, значит, возможно еще более низкое, чем при ионно-плазменном распылении, давление Ar, а, значит, еще лучшая чистота пленки. Наиболее подходящий метод для получения пленок на стекле.

Позволяет получать пленки, по характеристикам не уступающие выращенным методом лазерного испарения и при этом имеющие более однородную толщину и более гладкую поверхность. При магнетронном распылении состав пленок, как правило, соответствует составу мишеней, но при использовании оксидных мишеней для предотвращения дефицита кислорода в растущей пленке в рабочую камеру подают кислород.

Как и при лазерном испарении, в результате образования плазмы возникают возбужденные атомы и ионы, что, в принципе, позволяет выращивать пленки в одну стадию при невысоких температурах. Однако если подложка расположена близко к мишени, а давление среды недостаточно, подложка подвергается интенсивной бомбардировке отрицательными ионами кислорода, которые разрушают структуру растущей пленки.

Достоинством высокочастотного магнетронного распыления: применимость для распыления диэлектриков (из-за переменного напряжения в течение одной полуволны ионы выбивают атомы, в течение другой - в плазму вытягиваются электроны).

Различие методов нанесения тонких пленок в вакууме заключается в способе генерации частиц материала (атомы, молекулы, ионы, кластеры), в их энергии и плотности потока. Наиболее распространенными являются термические и ионно-плазменные методы. В качестве осаждаемых методом термического испарения материалов были выбраны Sn, Pb, Ni и Bi, небольшие кусочки которых помещались в тигель из нитрида бора (рисунок 1) и нагревались вольфрамовой спиралью до температуры испарения.

Метод термического испарения очень прост в реализации, но имеет ограничения по номенклатуре наносимых материалов и обладает самой низкой энергией (доли эВ) пленкообразующих частиц, равной kT_u , где k – постоянная Больцмана, T_u – температура испарения материала.

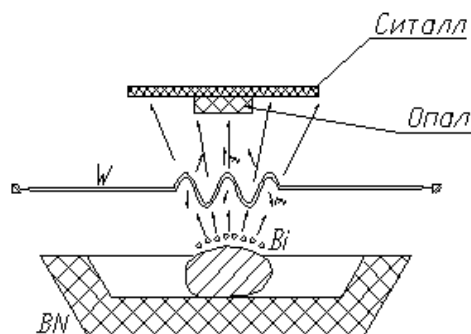
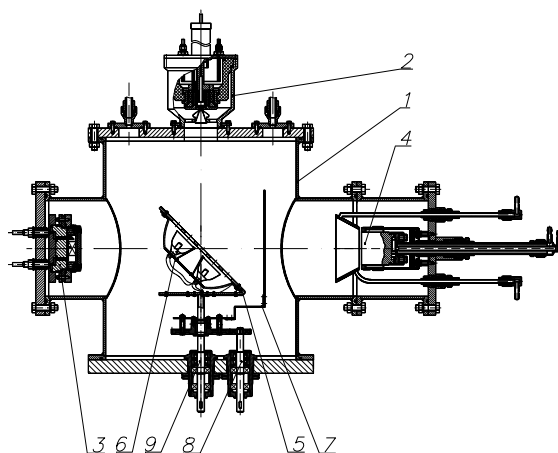


Рис. 1. Схема осаждения тонкой пленки Bi методом термического испарения

Более универсальными (практически любые материалы тонких пленок, энергии частиц от единиц до сотен эВ, подложки большого размера и т.д.) являются ионно-плазменные методы осаждения тонких пленок в вакууме, часть из которых может быть реализована на трехпозиционной установке (рисунок 2), оснащенной магнетронной распылительной системой (МРС), дуговым (ДИ) и автономным (АИИ) источниками ионов. Образцы подложек могут закрепляться на наклоняемом столике, размещенном на вводе вращения.



1 – вакуумная камера, 2 – ионно-лучевой источник, 3 – магнетрон, 4 – дуговой источник, 5 – наклоняемый подложкодержатель, 6 – нагреватель подложек, 7 – заслонка, 8 – привод поворота заслонки, 9 – привод вращения подложкодержателя.

Рис. 2. Схема трехпозиционной установки для нанесения тонких пленок в вакууме

Наличие трех источников и наклоняемого столика позволило реализовать несколько вариантов нанесения тонкопленочных покрытий:

- проводить активацию поверхности подложки перед нанесением пленки с помощью АИИ;
- наносить пленку с помощью МРС или ДИ с ионно-лучевым ассистированием;
- наносить пленку под углом к поверхности подложки;
- наносить многокомпонентную пленку при одновременной работе двух или трех источников, причем одним из компонентов может быть, например, алмазоподобный углерод, осаждаемый с помощью АИИ из ионного пучка;

- наносить многослойные тонкопленочные покрытия при последовательной работе двух или трех источников.

Формирование нанокомпозитов состоит из двух основных этапов: формирование матрицы и внедрение в поры матрицы материала. Существует много способов, как формирования матрицы, так и внедрения материала. Наиболее практичным сочетанием методов, гарантирующих необходимое качество, можно считать седиментацию и пропитку (рисунок 3).

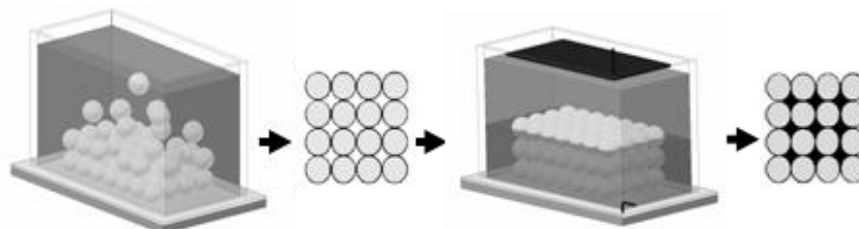


Рис. 3. Формирование опалового нанокомпозита

Естественная седиментация – один из простейших способов получения пленки синтетического опала, так как для проведения эксперимента требуются: емкость, раствор и подложка. Но этот метод неприменим в случае необходимости нанесения опаловой матрицы на внутренние поверхности. Поэтому для внедрения материала необходимо использовать пропитку. Процесс пропитки требует нескольких повторов для достижения необходимой степени заполнения пор. Достоинством данного метода является простота реализации, нетребовательность к дорогостоящему оборудованию. Недостатком метода являются большие временные затраты: процесс пропитки медленный и требует нескольких повторов.

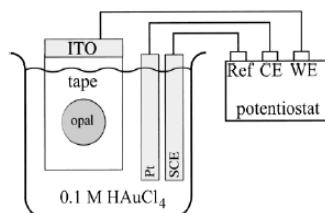
Таким образом, сочетание седиментации и пропитки даёт гарантированный результат формирования опалового нанокомпозита с требуемыми магнитооптическими свойствами и с минимальными материальными затратами.

Если в растворе присутствуют глобулы разного диаметра, то при осаждении структура получится неупорядоченная. Для устранения этого дефекта при седиментации возможно применение электрофореза.

Для внедрения материалов в пустоты опаловой матрицы может использоваться метод электрохимического осаждения. Использование электрохимического осаждения позволяет равномерно распределить материал внедрения (в экспериментах использовался никель) по порам опаловой матрицы.

При создании оснастки для реализации процесса гальванического внедрения за основу была взята технология заполнения упорядоченных микропор опала золотом.

Схема этого процесса представлена на рисунке 4.



ITO – стеклянная подложка с пленкой оксида титана, на которой выращен опал (*opal*), tape – защитный непроводящий слой, Pt, SCE, Ref, CE, WE – электроды.

Рис. 4. Схема оснастки для процесса

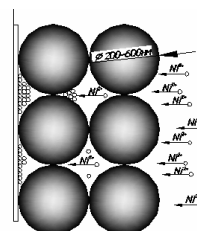


Рисунок 5 - Схема процесса внедрения никеля в поры опаловой матрицы при электрохимическом осаждении

электрохимического заполнения
упорядоченных макропор опала золотом

Отличительная особенность представляемой технологии состоит в предварительном нанесении методом термовакуумного испарения тонкопленочного подслоя никеля на одну из сторон образца опала. При закреплении образца на электроде гальванической ванны подслоем обращается к электроду, в результате чего свободные от пленки поверхности образца имеют возможность беспрепятственно пропускать электролит. Таким образом, внедрение никеля в поры происходит в соответствии со схемой, показанной на рисунке 5.

Использование различных способов формирования нанокомпозитов на основе опаловых матриц позволяет изменять в широких пределах их механические, оптические, электрические и магнитные свойства.

Применение различных методов нанесения пленок, варьирование режимами технологических процессов нанесения тонких пленок и электрохимического осаждения дает возможность формировать наноструктуры с заданными характеристиками

Во второй главе приведено описание оборудования, использованного для нанесения тонких пленок и получения опаловых нанокомпозитов, проведено моделирование технологического процесса получения тонкой пленки на поверхности опаловой матрицы, разработан процесс формирования волноводного фильтра, отработаны режимы формирования опаловых нанокомпозитов.

При моделировании операции нанесения тонкой пленки были предъявлены следующие требования к получаемой структуре: пленка должна обладать хорошей адгезией, однородностью поверхности, наличием иризации, хорошим коэффициентом отражения, а также иметь плотноупакованную структурированную матрицу.

Этапы данной технологической операции:

- 1) подготовка поверхности;
- 2) нанесение раствора;
- 3) сушка;
- 4) контроль качества.

Были выделены следующие входные и выходные параметры данной операции:

- входные контролируемые и управляемые параметры и пределы их изменения: метод нанесения – наличие седиментации (есть или нет), температура выдержки при отжиге (25°C – 450°C), температура сушки, оператор.

- входные контролируемые, но неуправляемые факторы: материал подложки, влажность окружающей среды, концентрация раствора.

- входные неконтролируемые и неуправляемые факторы: шероховатость поверхности, диаметр глобул.

- выходные параметры (параметры качества): интенсивность отражения в фотонной запрещенной зоне, топология поверхности, наличие блеска, однородность поверхности, качество адгезии.

Для контроля качества необходимо выбрать наиболее существенный выходной параметр. Наиболее существенным выходным параметром является интенсивность отражения – наличие фотонной запрещенной зоны, так как ее наличие свидетельствует о получении структуры необходимого качества: плотноупакованную структурированную матрицу с периодически расположенными пустотами.

Наиболее важными входными контролируемыми и управляемыми факторами являются наличие седиментации и температура отжига. Седиментация позволяет получить пленку одинаковой толщины, однородную с блеском. Отжиг упрочняет структуру матрицы, удаляет остатки жидкости и водяные пары. Результат отжига зависит от температуры выдержки, так как в диапазоне температур 600 – 950°C происходит схлопывание нанопор, а при дальнейшем повышении температуры, 1050 – 1100°C – схлопываются микропоры, то есть исчезает пористость. Таким образом, необходимо подобрать такую температуру отжига,

при которой поры останутся, а структура упрочнится, за счет спекания сфер диоксида кремния.

В результате моделирования было получено, что для формирования матрицы требуемого качества с высоким коэффициентом отражения необходимо проведение ступенчатого отжига: при температуре 250°C для удаления физически адсорбированной воды (за счет капиллярных сил) и при 400°C для спекания глобул кремнезема (рисунок 6).

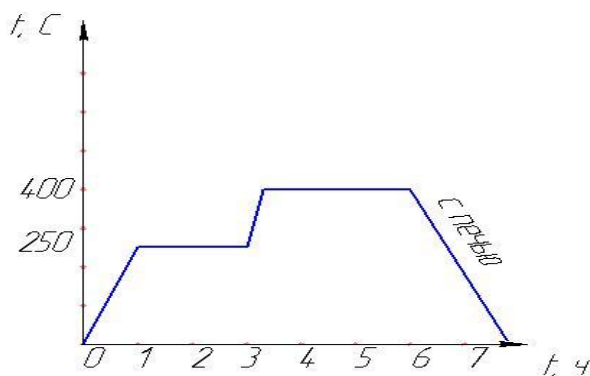


Рис. 6. Режим отжига

Стоит заметить, что способ получения пленки может варьироваться, но в любом случае рекомендовано использование седиментации.

В настоящее время рассматриваются 4 метода создания волноводных фильтров на основе опалового нанокompозита:

- Поместить трехмерный образец синтетического опала в резонатор.
- Поместить трехмерный образец синтетического опала в волновод, причем магнитное поле перпендикулярно электрическому полю.
- Поместить трехмерный образец синтетического опала в волновод, причем магнитное поле параллельно электрическому полю.
- Нанесение на стенки волновода нанокompозита.

Реализация методов одинаково сложна, в каждом случае есть ряд нюансов, которые необходимо учитывать при изготовлении. Трехмерный образец необходимо получить конкретных размеров под определенный волновод, что является довольно сложной задачей из-за хрупкости обрабатываемого материала

При помещении фильтра в резонатор преимуществом является то, что возможно изменение микроволнового сигнала при изменении напряженности внешнего поля. Недостаток же состоит в том, что частота волны изменяется дискретно.

Во втором и третьем случаях достоинством является то, что частота волны может изменяться непрерывно. В случае, при котором поле направлено перпендикулярно, наблюдается магнитный резонанс: при увеличении магнитного поля амплитуда магнитного резонанса увеличивается и на определенной частоте возникает резонансная особенность – коэффициент отражения уменьшается, а коэффициент прохождения увеличивается. При приложении магнитного поля параллельно напряженности электрического поля амплитуда резонанса уменьшается при возрастании величины магнитного поля.

Четвертый метод отличает способ работы, основанный на поглощении избыточной энергии побочных колебаний материалом нанокompозита. Попадая в резонанс длины волн, не попадающие в рабочий диапазон, поглощаются материалом, нанесенным на внутренние стенки волновода. Проходит сквозь волновод только волны с необходимой длиной волны. Преимуществами являются защита от внешних помех и простота изготовления.

Разработан маршрут изготовления волноводного фильтра на основе опалового нанокompозита, нанесенного на стенки волновода, так как этот тип фильтров перспективен, обладает рядом преимуществ.

Маршрут создания волноводного фильтра состоит из нескольких этапов:

- 1) Подготовка внутренней поверхности волновода.
- 2) Нанесение адгезионного подслоя.
- 3) Получение пленки синтетического опала.
- 4) Сушка при температуре 100-150°C.
- 5) Сушка при давлении 1-10 Па.
- 6) Отжиг при температуре выдержки 500°C.
- 7) Внедрение ферромагнитного материала.
- 8) Отжиг.
- 9) Контроль качества полученной структуры.

В ходе отработки метода формирования структуры нанокompозита было установлено, что в качестве метода очищения подложки лучше использовать метод очищения в электролитической ванне. Было проведено определение оптимального режима отжига. В выборе режима получения пленки играет роль и материал подложки. Были сформулированы рекомендации для получения однородной структуры пленки синтетического опала с хорошей адгезией, с отсутствием трещин, обладающей иризацией:

- Использовать вакуумную печь.
- Использовать очищение в электролитической ванне.
- Уменьшить температуру выдержки.
- Увеличить время выдержки.
- Использовать медленный нагрев.
- Использовать медленное охлаждение (в используемой печи автоматически включался вентилятор, ускоряющий процесс остывания печи).
- Заменить отжиг сушкой при температуре от 100 до 160°C в течение 10 часов и сушкой при давлении от 1 до 10 Па в течение 10 часов.

В качестве способов оптимизации методов формирования структур фотонных нанокompозитов стоит отметить метод вертикального расположения подложки, метод центрифугирования, а также использование электрофореза при проведении седиментации.

Метод вертикального расположения подложки пользуется большим интересом, поскольку за счет вертикального расположения подложки и действия капиллярных сил глобулы кремнезема из раствора упорядоченно оседают на подложки. Для реализации данного метода необходимо специальное устройство, которое позволяет осуществить медленное постепенное вытягивание подложки из раствора.

Метод центрифугирования позволяет улучшать упорядоченность получаемой структуры за счет действия центробежных сил различного значения на глобулы кремнезема разного диаметра. При проведении центрифугирования необходимы:

- 1) небольшая скорость вращения;
- 2) повышенная влажность окружающей образец среды.

Седиментация – процесс осаждения частиц дисперсной фазы в жидкой среде в гравитационном поле или поле центробежных сил. Седиментация является простым и эффективным методом получения опаловых структур, поскольку частицы диоксида кремния обладают свойством самоорганизации.

Электрофорез – явление перемещения частиц дисперсной фазы в жидкой среде под действием электрического поля. С помощью электрофореза можно отделять мелкие частицы вещества от более крупных частиц. При осаждении частиц диоксида кремния электрофорез позволяет выделять мелкие частицы и осаждать их на поверхность, тем самым получая слои с частицами кремнезема приблизительно одинакового размера.

В третьей главе приведены экспериментальные данные по формированию опаловых наноструктур.

Был получен образец нанокompозита с частицами серебра. На рисунке 7 показано АСМ изображение полученного образца.

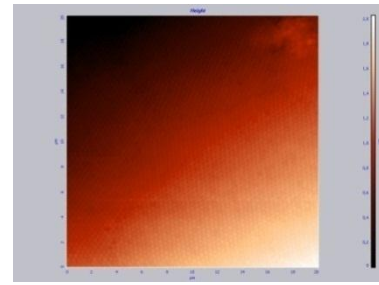
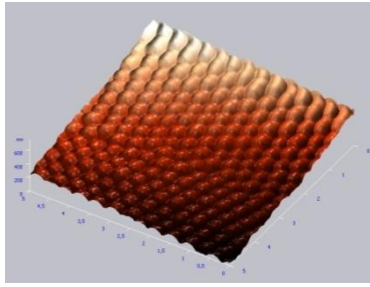


Рис. 7. Структура опала с серебром (седиментация)

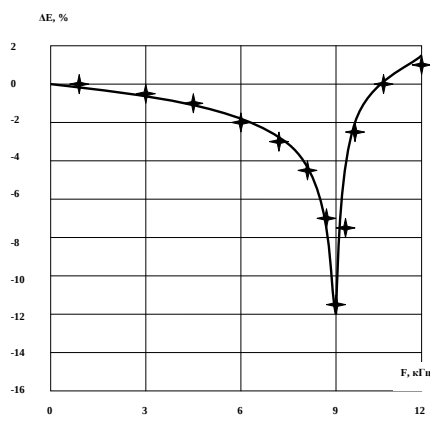
При седиментации частицы диоксида кремния оседают за счет силы тяжести, так как они тяжелее частиц серебра. При электрофорезе получается слоистая структура: сначала небольшой слой опала, затем серебро и еще слой опала. Это связано с тем, что серебро, обладая зарядом, под большим напряжением быстро оседает на подложку, а перемещение опала осуществляется только за счет силы тяжести. Скорость образования матрицы меньше скорости оседания частиц серебра, что и приводит к видимым на срезе слоям. Для устранения послойного осаждения возможно использовать следующие способы:

- Изменить концентрацию смеси растворов.
- Изменить pH раствора.
- Изменить конфигурацию электродов.
- Уменьшить величину напряжения.

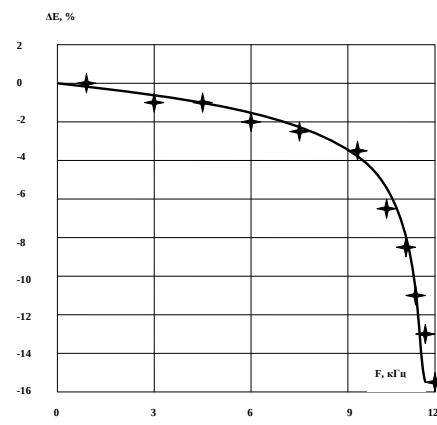
В четвертой главе проведены исследования свойств полученных образцов.

Так, в ходе измерения толщины нанесенных пленок было определено, что наилучшие результаты дало нанесение на поверхность опала пленки титана, с помощью магнетронного распыления. В ходе измерений методами эллипсометрии для двух образцов были получены толщины пленок в 900 нм и 600 нм.

В ходе исследования свойств опаловой матрицы допированной ферромагнитным материалом было установлено, что с увеличением частоты проходящих микроволн область магнитного резонанса смещается в область высоких частот. Данные эффект продемонстрирован на графиках на рисунке 8, где по оси ординат отложено процентное изменение отраженных микроволн, а по оси абсцисс частота магнитного поля.



(а)



(б)

(а) – частота микроволнового поля 26 ГГц, (б) – частота микроволнового поля 34 ГГц.

Рисунок 8 – Магнитный резонанс в опаловой матрицы с ферромагнитным материалом внедрения

Помимо этого были исследованы свойства сформированного оптического волновода. На рисунке 9 показан внешний вид полученного волновода с управляемым коэффициентом отражения.

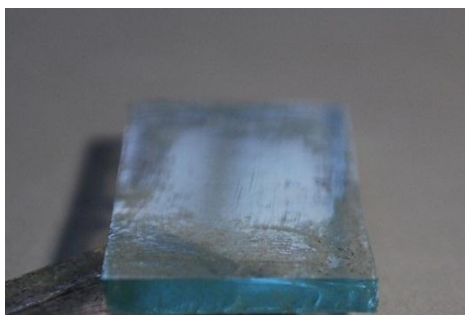


Рис. 9. Модель оптического волновода

На рисунке 10 показана зависимость коэффициента отражения от приложенной разности потенциалов. При увеличении разности потенциала коэффициент отражения уменьшается.

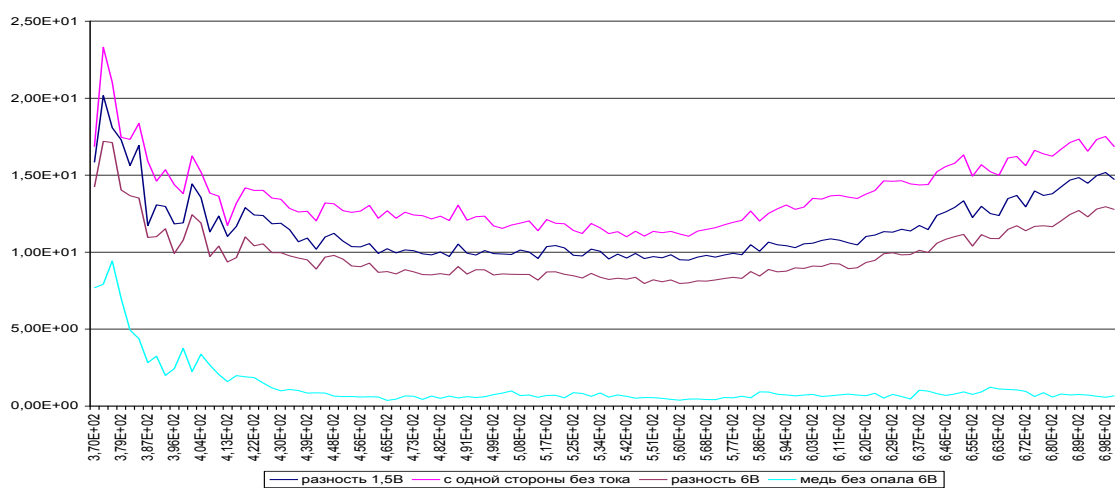


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения от приложенной разности потенциалов

Была визуализирована структура полученных образцов фотонных кристаллов. На рисунке 11 показана структура трехмерного образца опаловой матрицы.

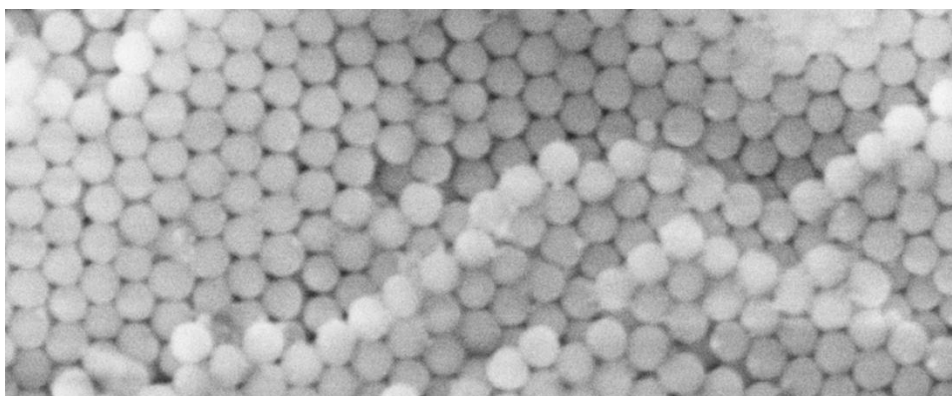


Рис. 11. Вид структуры трехмерного опала

На рисунке 12 показана структуру пленки опала на поверхности подложки ситалла.

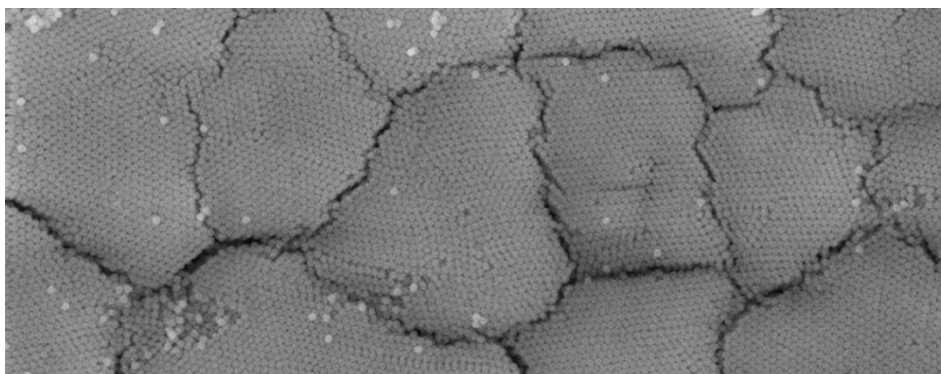


Рис. 12. Вид структуры опаловой пленки на подложке ситалла

Структура сформированной пленки получилась с разрывами, которые образовались из-за сильных напряжений, возникших в пленке при высыхании. Структура трехмерного образца более упорядочена и не имеет ярко выраженных неоднородностей.

Предложенные методики формирования структур фотонных кристаллов могут быть использованы в дальнейшем для получения логических элементов фотоники. Полевая природа света обуславливает многочисленные преимущества оптических технологий для задач передачи, записи, обработки и хранения информации:

- передача информации фотонами происходит со скоростью света $c_0 = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, в то время как скорость распространения электрического импульса по чипу определяется временем перезарядки цепи и реально составляет величину в 20-30 раз меньше c_0 ;
- большое число световых пучков могут свободно проходить по одной и той же области пространства, пересекаться и из-за отсутствия у фотонов электрического заряда не влияют друг на друга;
- использование двумерного (изображения) и трехмерного (голограммы) характера световых полей позволяет значительно увеличить плотность и скорость передачи информации;
- два состояния поляризации (горизонтальная и вертикальная или круговая, по левому или правому кругу) увеличивают вдвое объем переносимой информации;
- оптическая система практически не излучает во внешнюю среду, обеспечивая защиту от перехвата информации и нечувствительна к электромагнитным помехам.

Основные результаты работы:

1. Проведен анализ и выбор методов формирования пленок веществ на поверхности структуры и самой структуры опаловой матрицы.
2. Разработаны процессы формирования наноструктур на основе опаловых матриц.
3. По разработанным методикам получены образцы нанокомпозитов.
4. Исследованы свойства полученных образцов.
5. Отработаны основные технологические операции и сформированы рекомендации.

Литература

- 1 J.D. Joannopoulos Self-assembly lights up // Nature. - 2001, V.414. - P.257-258.
- 2 R. Mayoral, J. Requena, C. Lypez, S.J. Moya, H. Mhquez, L. Vozquez, F. Meseguer, M. Holgado, A. Cintas, A. Blanco 3D long range ordering of submicrometric SiO₂ sintered superstructures // Adv. Mater. - 1997, V.9. - P.257-260.
- 3 Electrophoretic Sedimentation [Электронный ресурс]. (<http://luxrerum.icmm.csic.es/?q=node/research/electrophor>). Проверено 12.04.2010.
- 4 C. Lypez, H. Mhquez, L. Vozquez, F. Meseguer, R. Mayoral, M. Ocaca Photonic crystal made by close packing SiO₂ submicron spheres // Superlatt. and Microstr. - 1997, V.22. - P.399-404.

- 5 Е.А. Рябенко, А.И. Кузнецов, Б.З. Шалумов, М.Д. Широкова, О.П. Тимакова, Т.С. Литвякова О распределении примесей между фазами при глубокой очистке ТЭОС раствором аммиака // ЖПХ. - 1977, № 7. - С.1625-1627.
- 6 Э. Н. Самаров, А. Д. Мокрушин Структурная модификация синтетических опалов в процессе их термообработки // Физика твердого тела. – 2006.
- 7 М. И. Самойлович, А. Ф. Белянин, Н. И. Юрасов, С. М. Клещева, М. Ю. Цветков Металломагнитные диэлектрические нанокомпозиты на основе опаловых матриц // Высокие технологии в промышленности России.
- 8 А. С. Сигов Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике – 1996.
- 9 Fabrication of Colloidal Photonic Crystals with Heterostructure by Spin Coating Method // Chin. Phys. Lett. – 2009, V.26, N2.
- 10 Е. Д. Щукин Коллоидальная химия: учебник для университетов и химико-технологических вузов – М.: Высшая школа, 2007, Изд. 5. – 444 с.
- 11 Н. А. Шабанова, В. В. Попов, П. Д. Саркисов Химия и технология нанодисперсных оксидов. Учебное пособие. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 309 с.
- 12 А. И. Плеханов, Д. В. Калинин, В. В. Сердобинцева Нанокристаллизация монокристаллических пленок опала и пленочных опаловых гетероструктур // Российские нанотехнологии – 2006, N1-2.
- 13 А. Б. Ринкевич, В. В. Устинов, М. И. Самойлович, С. М. Клещева, Е. А. Кузнецов Магнитный резонанс в опаловых матрицах с 3D-структурой, образованной наночастицами никель-цинкового и марганец-цинкового феррита.
- 14 А. С. Синицкий Синтез и оптические свойства фотонных кристаллов на основе диоксида кремния – Москва, 2003.
- 15 Е. В. Булыгина Электрохимическое внедрение металлов в пустоты опаловой матрицы.
- 16 Коммерческое предложение на производство композиционных магнитных материалов и устройств СВЧ техники.