

Д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,
к. т. н. Е. В. БУЛЫГИНА

Дата поступления в редакцию
23.11 2004 г.

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ЦНИТИ «Техномаш»
E-mail: panfilov@mx.bmstu.ru

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. СЕМЕНОВ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ НА ПОДЛОЖКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО ОПАЛА

Рассмотрено влияние методов термического испарения, ионно-плазменного магнетронного распыления и осаждения тонких пленок из ионного пучка на характеристики поверхности фотонных кристаллов.

Интерес к опаловым матрицам (плотнупакованным наносферам диоксида кремния с диаметром от 200 до 600 нм) [1] с тонкопленочными покрытиями вызван практически неограниченной номенклатурой материалов тонких пленок, диапазоном толщин отдельных слоев и многослойных структур от десятков ангстрем до единиц микрометров, а также другими достоинствами технологии тонких пленок.

В настоящее время отсутствуют публикации об исследованиях различных методов нанесения тонких пленок в вакууме на подложки с рельефом поверхности синтетического опала. Особенностью процесса формирования тонких пленок на строго упорядоченных полусферах поверхности опаловой матрицы является переменный угол осаждения пленкообразующих частиц. В результате этого искажается, по сравнению с «гладкими» образцами, характер появления зародышей, образования монослоя осаждаемого материала и дальнейшего формирования тонкопленочного покрытия.

Целью данного направления исследований является экспериментальное определение влияния метода нанесения тонких пленок в вакууме на геометрические, электрические, оптические и другие свойства поверхности опаловых матриц с тонкопленочными покрытиями.

В представленной работе рассмотрены методы термического испарения, ионно-плазменного магнетрон-

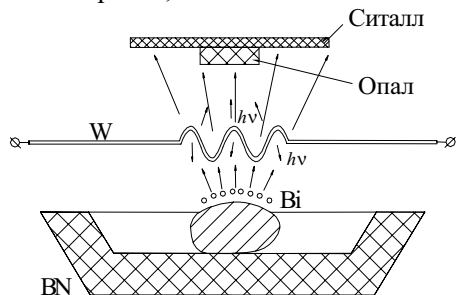


Рис. 1. Схема осаждения тонкой пленки Bi методом термического испарения

ного распыления и осаждения тонких пленок из ионного пучка [2]. В качестве исследуемых характеристик выбраны рельеф тонкопленочного покрытия и электрическое сопротивление поверхности. Эти характеристики определялись на подложках из синтетического опала и на «гладких» ситалловых пластинах, на которые тонкопленочное покрытие наносилось одновременно.

В качестве осаждаемых методом термического испарения материалов были выбраны Sn, Pb, Ni и Bi, небольшие кусочки которых помещались в тигель из нитрида бора (рис. 1) и нагревались вольфрамовой спиралью до температуры испарения. Тонкая пленка наносилась на ситалловую подложку с закрепленным на ней образцом опала.

Метод термического испарения очень прост в реализации, но имеет ограничения по номенклатуре наносимых материалов и обладает самой низкой энергией (доли эВ) пленкообразующих частиц, равной $kT_{\text{и}}$, где k — постоянная Больцмана, $T_{\text{и}}$ — температура испарения материала.

Более универсальными (практически любые материалы тонких пленок, энергии частиц от единиц до сотен эВ, подложки большого размера и т. д.) явля-

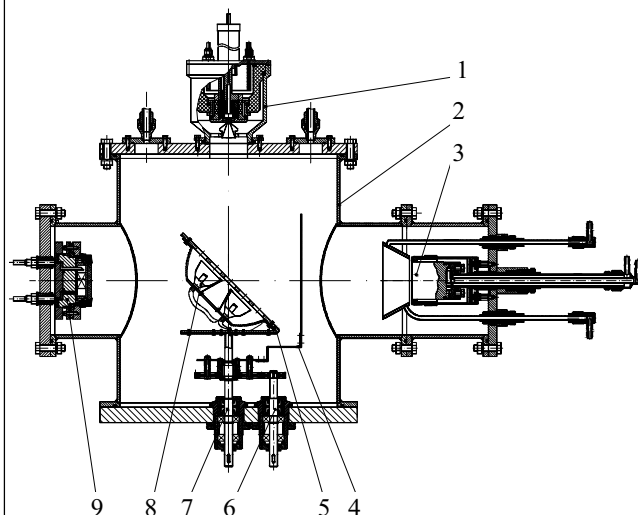


Рис. 2. Схема трехпозиционной установки для нанесения тонких пленок в вакууме:

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

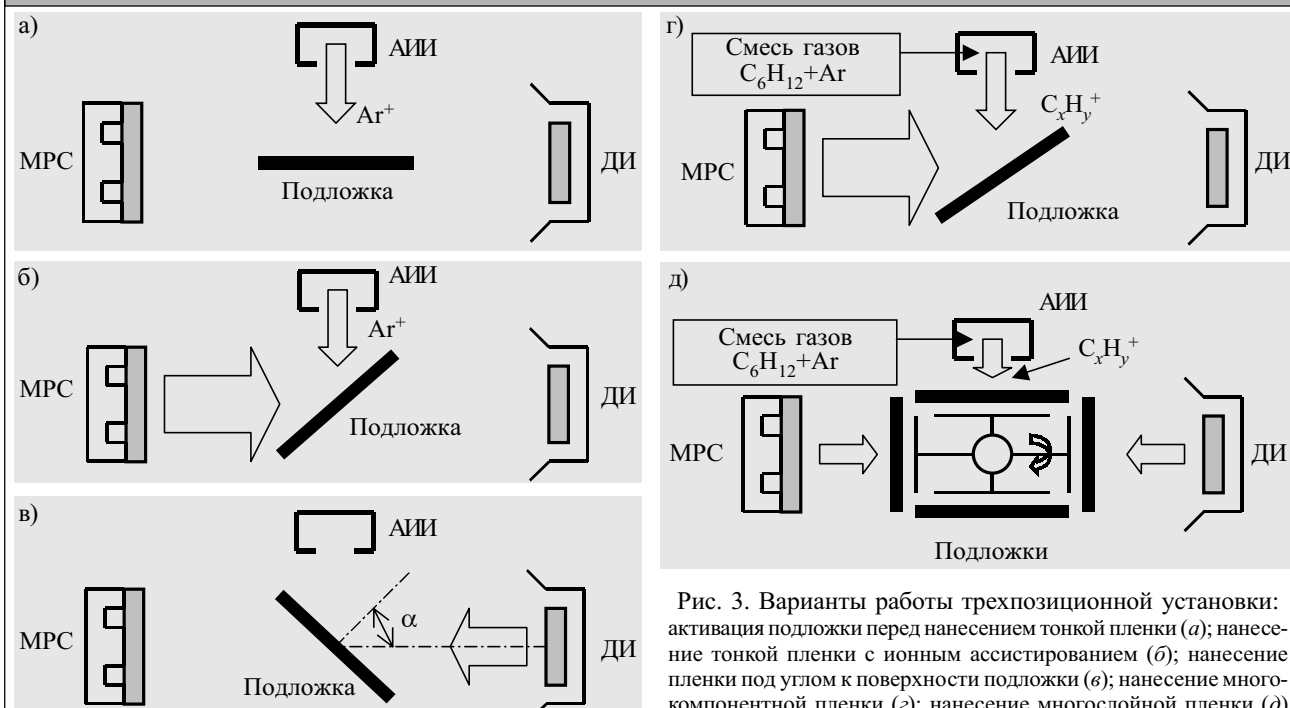


Рис. 3. Варианты работы трехпозиционной установки: активация подложки перед нанесением тонкой пленки (а); нанесение тонкой пленки с ионным ассистированием (б); нанесение пленки под углом к поверхности подложки (в); нанесение многокомпонентной пленки (г); нанесение многослойной пленки (д)

ются ионно-плазменные методы осаждения тонких пленок в вакууме, часть из которых реализована на трехпозиционной установке (рис. 2), оснащенной магнетронной распылительной системой (МРС), дуговым источником (ДИ) и автономным источником ионов (АИИ). Образцы могут закрепляться на наклоняемом столике, размещенном на вводе вращения.

Наличие трех источников и наклоняемого столика позволяет осуществлять несколько вариантов нанесения тонкопленочных покрытий (рис. 3):

- проводить активацию поверхности подложки перед нанесением пленки с помощью АИИ (рис. 3, а);
- наносить пленку с помощью МРС или ДИ с ионно-лучевым ассистированием (рис. 3, б);
- наносить пленку под углом к поверхности подложки (рис. 3, в);
- наносить многокомпонентную пленку при одновременной работе двух или трех источников (рис. 3, г), 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 (рис. 3, д).

В данной работе ионно-плазменными методами наносились пленки Ti (МРС) и пленки алмазоподобного углерода α-C:H (АИИ), а также комбинации этих материалов.

Электрическое сопротивление измерялось между двумя контактными полосками с одинаковыми длиной и расстоянием между полосками. Сравнивались показания мультиметра для ситалловой и опаловой подложек, на которые пленки наносились одновременно. В результате для всех без исключения случаев сопротивление пленки на опаловой подложке оказывалось существенно больше, чем на ситалле. Так, для пленки Vi толщиной 40 нм сопротивление составило 12 МОм/□ на ситалле и более 200 МОм/□ на опале.

Объяснение этому факту было дано после получения изображения поверхностей с помощью зондовых микроскопов. Увеличение электрического сопротивления тонкой пленки на «рельефной» поверхности опала связано, по нашему мнению, с двумя факторами: разнотолщинностью проводящего слоя (во впадинах пленка в десятки раз тоньше, чем на вершинах полусфер) и уменьшением фактической площади контакта между контактной полоской и пленкой на поверхности опала (рис. 4).

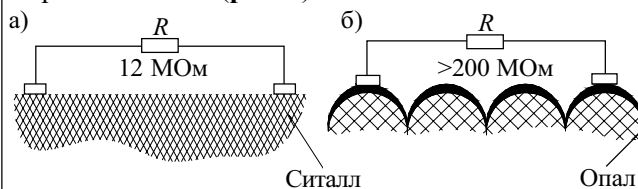


Рис. 4. Схема измерения электрического сопротивления тонкой пленки Vi на «гладком» ситалле (а) и на подложке из синтетического опала (б)

Пленка Ti толщиной 550 нм имела сопротивление 25 Ом/□ на ситалле и 150 Ом/□ на опале. Пятислойная пленка Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti, нанесенная последовательно источниками МРС и АИИ под углом 45°, имела сопротивление 5 кОм/□ на ситалле и 150 кОм/□ на опале.

Тонкая пленка, нанесенная на «гладкий» ситалл, независимо от материала и метода нанесения имела шероховатость порядка $R_a=2,1...2,3$ нм. Рельеф исходной опаловой подложки без пленки, полученный на сканирующем зондовом микроскопе «ФемтоСкан» (МГУ им. М. В. Ломоносова), показан на рис. 5.

Исследования поверхности опаловой подложки с пленкой Vi, нанесенной методом термического испарения, показали (рис. 6), что преобладающим оказался рост пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы, что дало увеличение шероховатости с $R_q=12,02$ нм для исходного опала до $R_q=60,98$ нм для опала с пленкой Vi.

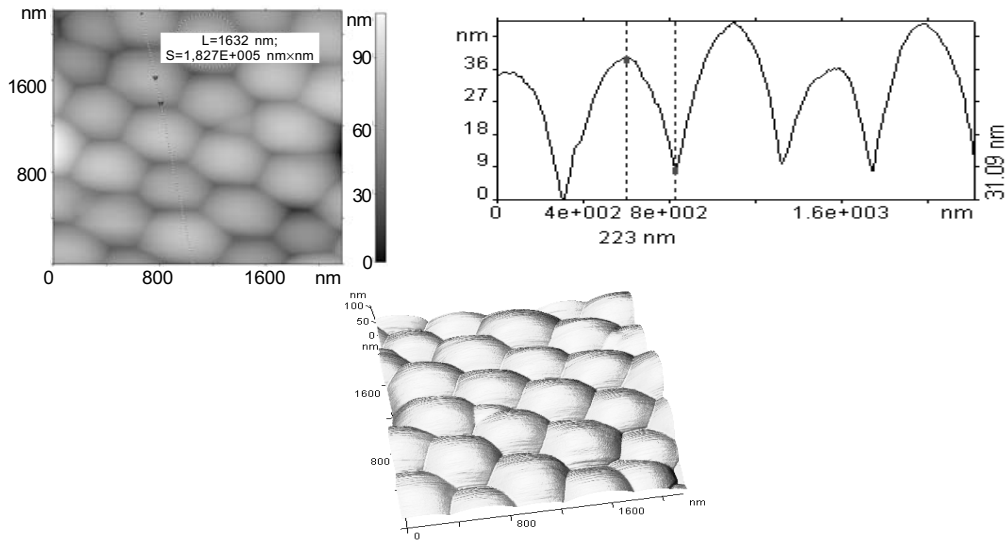


Рис. 5. AFM-изображение поверхности исходного (без пленки) образца опала

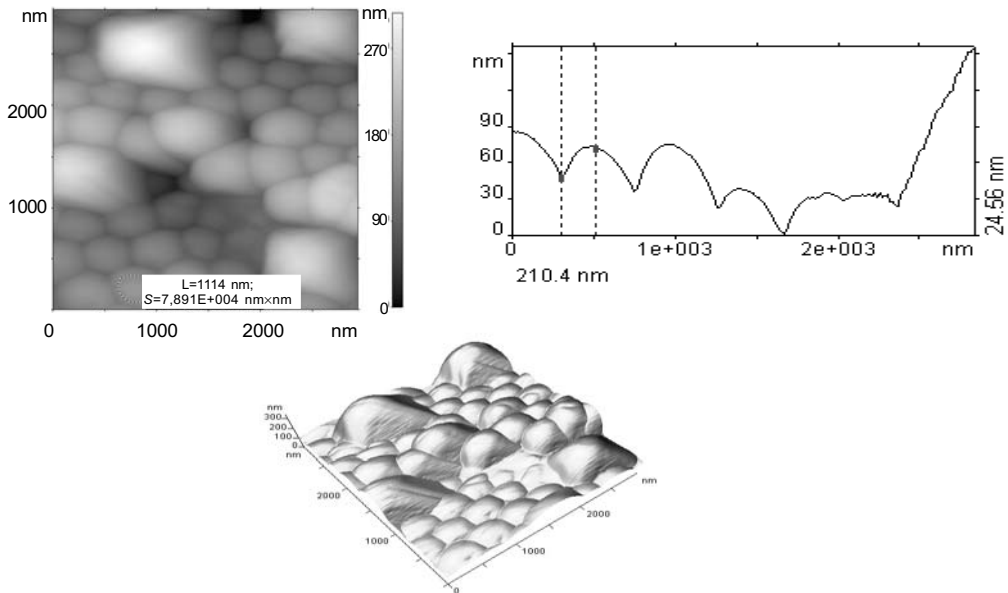


Рис. 6. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Bi

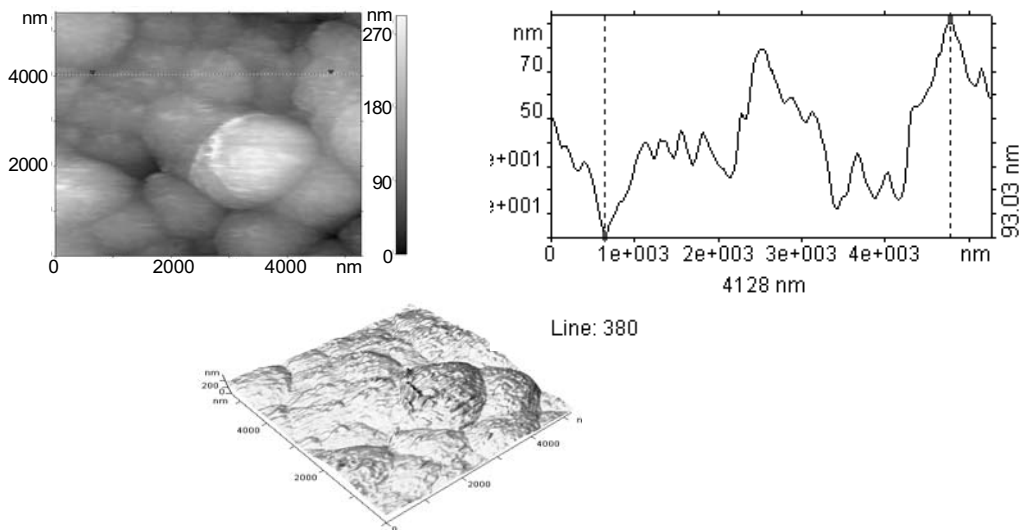


Рис. 7. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Ti

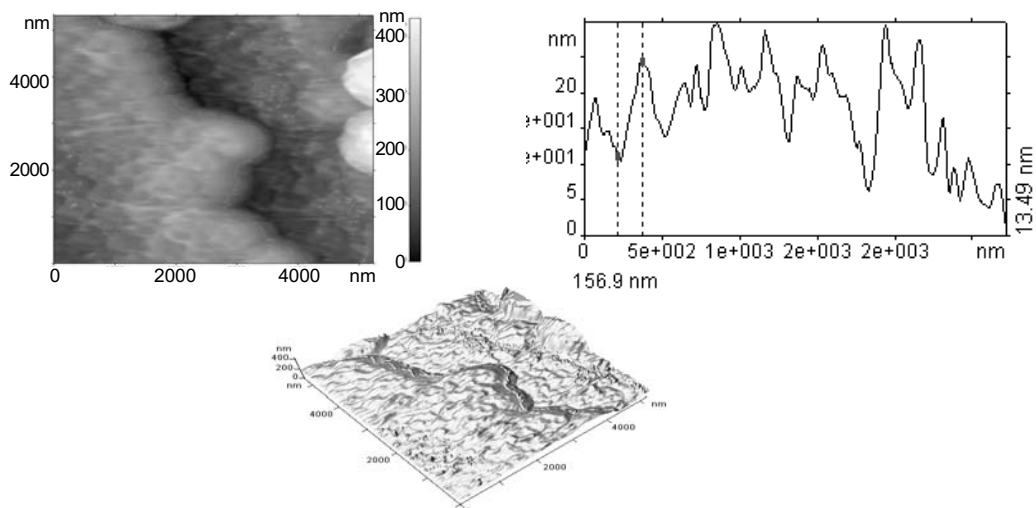


Рис. 8. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti

Характеристики топографии поверхности образцов фотонных кристаллов

Образец	Размер скана, нм	R_q , нм	Характерный периметр особенности, нм	Фрактальная размерность D_F	S , нм ²	ΔS , нм ²
Исходный опал	2172×2108×110	12,02	1641	2,00177±0,00006	4,9·10 ⁶	1,05·10 ⁵
Опал с пленкой Bi	2940×2940×340	60,98	1178÷3171	2,0097±0,0003	9,546·10 ⁶	9,03·10 ⁵
Опал с пленкой Ti	5264×5359×585	99,75	8360	2,0143±0,0010	3,286·10 ⁷	4,66·10 ⁶
Опал с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti	2641×2945×205	26,05	792	2,0194±0,0016	9,649·10 ⁶	1,87·10 ⁶

При магнетронном методе осаждения шероховатость поверхности опала с пленкой Ti также увеличилась ($R_q=99,75$ нм) по сравнению с исходным опалом, но уже без явного преобладания роста пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы (рис. 7).

Шероховатость же пленки Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti значительно уменьшилась (рис. 8) и составила $R_q=26,05$ нм.

В таблице приведены характеристики топографии поверхности исследованных образцов опаловой матрицы, из которых следует, что по сравнению с исходным опалом у образцов с тонкопленочными покрытиями существенно увеличилась шероховатость (R_q), фрактальная размерность (D_F) и площадь поверхности (S).

Результаты проведенных исследований электрического сопротивления и рельефа поверхности опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями позволяют сделать следующие заключения:

- метод и режимы осаждения тонкопленочных покрытий являются действенным инструментом управления геометрическими и электрическими характеристиками поверхности фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями;
- электрическое сопротивление тонких пленок на опаловой подложке определяется и шероховатостью

поверхности, и, естественно, материалом пленки (его удельным сопротивлением) — многослойное покрытие Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti имеет большее сопротивление, чем титановая пленка при той же толщине и значительно меньшей шероховатости поверхности.

Нанесение тонкопленочных покрытий на опаловую матрицу может являться как заключительной операцией, например для получения автоэмиссионных катодов или элементов оптических систем, так и промежуточной операцией перед электрохимическим заполнением пустот в объеме опала или перед формированием топологии на его поверхности, например для получения датчика Холла и других приборов.

Исследования в данном направлении будут продолжены для таких методов нанесения тонких пленок в вакууме как термоионное осаждение, стимулированное плазмой газозафазное осаждение и импульсное дуговое осаждение [2].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Нанотехнологии и фотонные кристаллы: Мат-лы I Международного семинара / Под ред. А. Ф. Белянина, М. И. Самойловича.— Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Т. Ш-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Под общ. ред. Ю. В. Панфилова.— М.: Машиностроение, 2000.