

УДК 621.793.2:539.234

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Е.В. ТЕЛЕШ, А.П. ДОСТАНКО, А.Ю. ВАШУРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 октября 2015*

Исследовано влияние парциального давления смеси моносилана и аргона и температуры подложки на оптические характеристики тонкопленочных покрытий из диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков на подложках из стекла и кремния с использованием торцевого холловского ускорителя в качестве источника ионов. Установлено, что увеличение парциального давления смеси моносилана и аргона приводит к росту скорости нанесения и коэффициента преломления и снижению оптического пропускания покрытий. Повышение температуры подложки способствовало улучшению оптических характеристик слоев диоксида кремния, что объясняется увеличением подвижности адатомов и стимулированием химического взаимодействия между кремнием и кислородом.

*Ключевые слова:* ионные пучки, прямое осаждение, торцевой холловский ускоритель, диоксид кремния, оптические покрытия, оптические характеристики.

### Введение

Разработка процессов формирования оптических покрытий с заданными параметрами является актуальной проблемой. Это связано с ужесточением требований к характеристикам как самих покрытий, так и к границам раздела между подложкой и оптическими слоями. В настоящее время основными методами получения оптических покрытий являются термическое испарение, ионное распыление, плазмохимическое осаждение из газовой фазы. Возможности этих методов ограничены возможностью управления энергией осаждаемых частиц, отсутствием направленного переноса и точного прямого контроля количества осаждаемого вещества. Вакуумные методы формирования покрытий, основанные на термическом испарении и ионном распылении, связаны с использованием дорогостоящих мишеней и материалов для испарения. Энергия осаждаемых на подложку атомов составляет 0,01–10 эВ, что не позволяет получать тонкопленочные покрытия с высокой адгезией и требуемой микроструктурой при низких температурах подложки. Осаждаемое вещество распространяется в пространстве по закону косинуса. Отсутствие ионной компоненты затрудняет оперативный контроль роста покрытия.

Метод прямого осаждения из ионных пучков предполагает использование только рабочего газа, стоимость которого намного ниже стоимости мишеней и материалов для испарения [1]. Такой способ позволяет контролировать параметры процесса осаждения (энергия и плотность потока осаждаемых частиц, направленность ионного пучка, контроль скорости нанесения), оказывающих влияние на свойства формирующегося покрытия. Отличительные особенности осаждения пленок из ионных пучков состоят в следующем:

– ускорение ионов до требуемой энергии и формирование пучка осуществляются в ионно-оптической системе источника ионов, при этом энергия ионов определяется ускоряющим напряжением источника;

– пространственная направленность при условии малой расходимости ионного пучка позволяет проводить нанесение пленок на структуры сложного профиля;

– доля ионной компоненты в потоке осаждаемого вещества достигает 100 %, что позволяет осуществлять строго дозированный перенос вещества к подложке посредством контроля плотности тока ионов пучка в процессе осаждения.

Основными оптическими характеристиками тонкопленочных покрытий являются оптическое пропускание ( $T$ ), оптическое поглощение ( $\alpha$ ) и коэффициент преломления ( $n$ ). Они зависят от таких параметров процесса формирования покрытия, как давление и состав рабочих газов, температура подложки, скорость осаждения покрытия и др. [2]. В настоящей работе изучено влияние состава рабочего газа и температуры подложки на скорость нанесения и на характеристики оптических покрытий из диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков.

### Методика эксперимента

Для нанесения покрытий использовалась модернизированная установка вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенная ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ). Такие ионные источники позволяют формировать широкие пучки ионов любых газов с энергией 25...200 эВ и током до 5 А, имеют простую конструкцию, надежны в эксплуатации. Для функционирования таких устройств не нужно применения высоковольтного питания. Упрощенная схема подколпачного устройства установки приведена на рис. 1, внешний вид – на рис. 2.

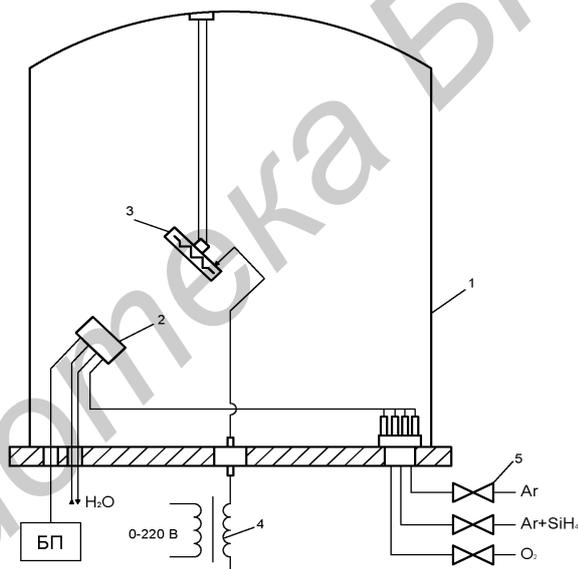


Рис. 1. Схема подколпачного устройства установки ВУ-1А: 1 – вакуумная камера; 2 – ионный источник; 3 – подложкодержатель с подогревом; 4 – трансформатор питания подложкодержателя; 5 – газовые нагекатели



Рис. 2. Внешний вид подколпачного устройства

Покрyтия наносились на подложки из оптического стекла К8 и кремния, устанавливаемые на неподвижный держатель с возможностью их предварительного нагрева. Нагрев осуществлялся резистивным нагревателем. Температура контролировалась термопарой хромель–копель. В качестве рабочих газов использовалась смесь моносилана с аргоном (5 %  $\text{SiH}_4$  + 95 %  $\text{Ar}$ ) и кислород. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения  $5,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Парциальное давление кислорода составляло  $6,65 \cdot 10^{-2}$  Па. Давление смеси моносилана и аргона изменялось в диапазоне  $(1,33 \dots 2,93) \cdot 10^{-1}$  Па. Оптимальные режимы работы ионного источника были следующими: анодное напряжение – 90...120 В, ток разряда – 2,5...3,0 А, ток соленоида – 3...4 А, ток эмиттера электронов – 11...12 А. Такие режимы способствовали горению стабильного разряда с хорошей степенью компенсации.

Спектры оптического пропускания и поглощения определялись при помощи спектрофотометра МС-121. Для измерения коэффициента преломления покрытий использовался эллипсометр ЛЭФ-3 ( $\lambda = 633$  нм). Толщина покрытий определялась по цвету и с применением ЛЭФ-3.

### Результаты и их обсуждение

Скорость нанесения  $V_n$ , кроме влияния на параметры покрытий, определяет и производительность процесса формирования последних. Она зависит, в первую очередь, от состава рабочего газа. Важно выбрать оптимальный состав газа, при котором будут достигнуты заданные параметры покрытий и приемлемая производительность. На рис. 3, а приведена зависимость  $V_n$  от парциального давления смеси 5%  $\text{SiH}_4$  + 95%  $\text{Ar}$ . Температура подложки находилась в пределах 343...383 К. Скорость нанесения практически линейно возрастала от 0,21 до 0,58  $\text{нм} \cdot \text{см}^{-1}$  в вышеуказанном диапазоне давлений. Следует отметить, что  $V_n$  была значительно выше, чем при ВЧ распылении кварцевой мишени при мощности разряда 500 Вт (0,11  $\text{нм} \cdot \text{см}^{-1}$ ), но несколько ниже по сравнению с электронно-лучевым испарением кварца (1,0  $\text{нм} \cdot \text{см}^{-1}$ ) [3–4]. Коэффициент преломления покрытий  $n$  также возрастал от 1,50 до 1,57. Следует отметить, что  $n$  имел значения выше 1,5, что объясняется, прежде всего, повышенной плотностью покрытий. При формировании пленок  $\text{SiO}_2$  ионно-лучевым распылением кварцевой мишени ионами аргона с энергией 1200 эВ коэффициент преломления также составлял  $\sim 1,53$  [4]. При этом энергия конденсирующихся частиц составляла 3–6 эВ, а скорость нанесения 0,09...0,11  $\text{нм} \cdot \text{см}^{-1}$ . В экспериментах энергия частиц находилась в диапазоне 30...45 эВ, что на порядок выше. Это способствовало формированию более плотной структуры покрытий и росту коэффициента преломления. С другой стороны, увеличение доли  $\text{SiH}_4$  в рабочем газе могло привести к росту количества атомов кремния, не вступивших в реакцию с кислородом, что также способствовало росту  $n$ . Об этом свидетельствует и зависимость оптического пропускания  $T$  на  $\lambda = 555$  нм от парциального давления смеси 5%  $\text{SiH}_4$  + 95%  $\text{Ar}$  (рис. 3, б). Установлено, что  $T$  уменьшилось почти на 10%, что может быть связано с наличием в покрытии атомов неокисленного кремния. Влияние парциального давления смеси моносилана и аргона на коэффициент поглощения незначительно.

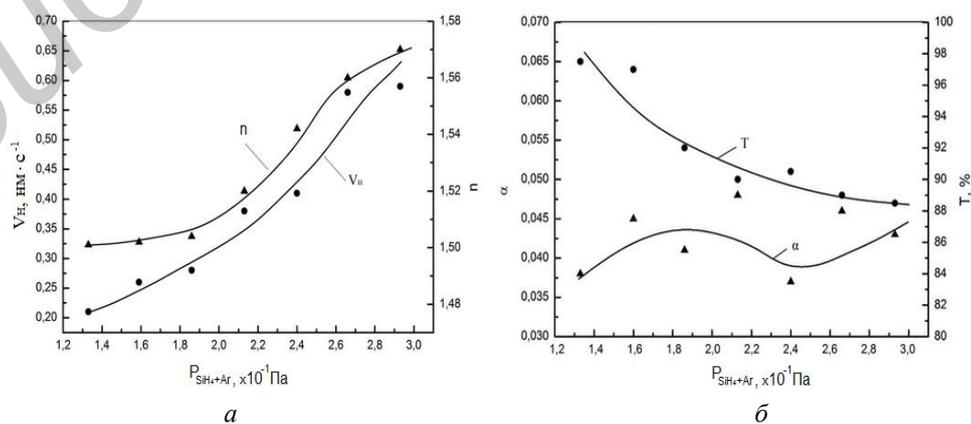


Рис. 3. Зависимость скорости нанесения и коэффициента преломления (а), пропускания и поглощения от парциального давления смеси моносилана и аргона (б)

Исследованы спектральные зависимости оптического пропускания и поглощения тонкопленочных покрытий из  $\text{SiO}_2$  в диапазоне  $\lambda = 400 \dots 900$  нм. На рис. 4 приведены спектры оптического пропускания и поглощения покрытия, нанесенного при температуре подложки 383 К и парциальном давлении смеси моносилана и аргона  $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па.

Для исследования влияния температуры подложки на оптические характеристики покрытий были получены образцы при температурах 413, 463, 510, 533, 563 и 613 К. Парциальное давление смеси моносилана и аргона при этом составляло  $1,6 \cdot 10^{-1}$  Па. На рис. 5, а приведены зависимости коэффициента пропускания и поглощения от  $T_{\text{п}}$ . Установлено, что величина  $T$  возрастает на  $\sim 2\%$  при повышении  $T_{\text{п}}$  с 413 до 563 К, а  $\alpha$  снижается с 0,060 до 0,054. Это можно объяснить повышением химической активности конденсирующихся ионов и атомов кремния и кислорода. Обычно повышение температуры конденсации при процессах реактивного испарения или распыления приводит к десорбции кислорода с поверхности подложки, что вызывает ухудшение оптических характеристик покрытий [5]. В проведенных экспериментах происходит обратное, что может быть связано с тем, что взаимодействие кремния с кислородом происходит в основном при генерации и транспортировке ионного пучка. Об этом свидетельствуют и результаты исследований ионных пучков моносилана и кислорода с применением оптической эмиссионной спектроскопии [6].

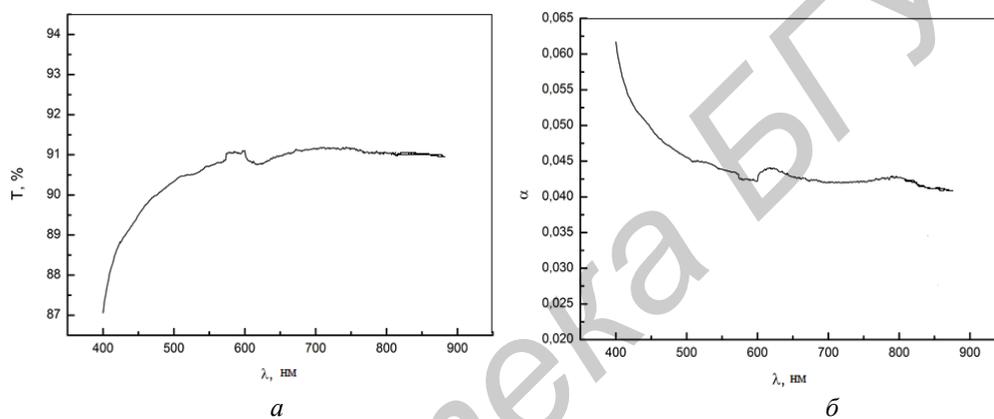


Рис. 4. Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б)

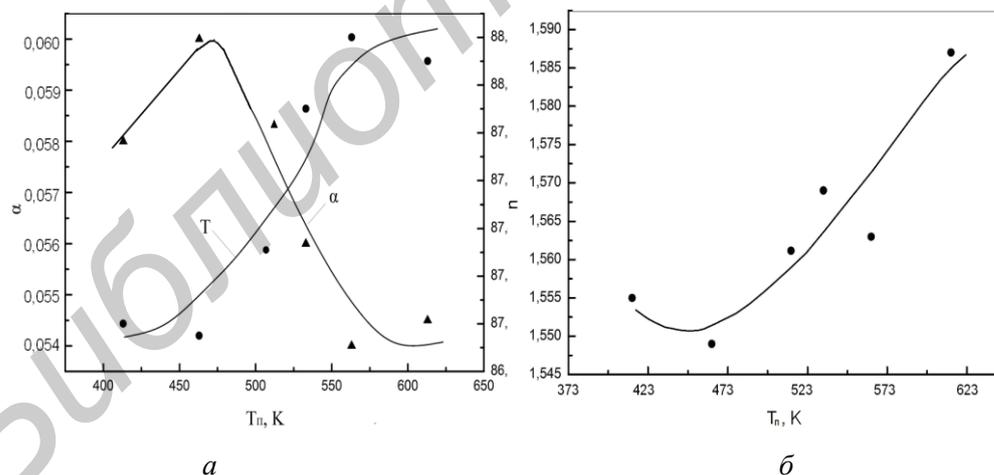


Рис. 5. Зависимость коэффициентов пропускания и поглощения (а) и преломления (б) от температуры подложки

Увеличение коэффициента преломления с ростом  $T_{\text{п}}$  связано с увеличением подвижности адатомов и, соответственно, плотности покрытий.

### Заключение

Исследовано влияние парциального давления смеси моносилана и аргона и температуры подложки на оптические характеристики тонкопленочных покрытий из диоксида

кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков, формируемых торцевым холловским ускорителем. Установлено, что увеличение парциального давления смеси моносилана и аргона приводит к росту скорости нанесения и коэффициента преломления и снижению оптического пропускания покрытий. Повышение температуры подложки способствовало улучшению оптических характеристик слоев диоксида кремния, что объясняется увеличением подвижности адатомов и стимулированием химического взаимодействия между кремнием и кислородом.

## OPTICAL PERFORMANCES OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS RECEIVED BY DIRECT DEPOSITION FROM ION BEAMS

E.V. TELESH, A.P. DOSTANKO, A.Y. VASHUROV

### Abstract

Influence of fractional pressure of monosilane and argon intermixture and substrate temperature on optical performances of thin-film coatings from the silicon dioxide, received by direct deposition from ion beams on substrates from a glass and silicon with use of the end Hall accelerator as a ion source is investigated. It is positioned, that the magnification of fractional pressure of monosilane and argon intermixture of results in to growth of deposition rate and a refractivity and decrease in an optical transmission of coatings. Rise in substrate temperature promoted improvement of optical performances of silicon dioxide layers that explains magnification of adatoms mobility and chemical interaction boost between silicon and oxygen.

### Список литературы

1. *Достанко А.П., Бордусов С.В., Залесский В.Г. и др.* Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. Минск, 2009.
2. *Nagendra C., Thutupalli G. et al* // Bull. Mater. Sci. 1986. Vol. 8, № 3. P. 351–355.
3. *Emiliani G, Scaglione S.* // J. Vac. Sci. Technol. 1987. A 5(4). P. 1824–1827.
4. *Литвиненко В.В., Родионов В.Е., Родионова Н.А. и др.* // Физическая инженерия поверхности. 2011. Т. 9, № 4. С. 346–349.
5. *Xiliang H., Jiehua W., Lingnan W. et al.* // Appl. Surface Sci. 2008. Vol. 252, P. 1730–1735.
6. *Телеш Е.В., Вашиуров А.Ю.* // Матер. II Всеросс. научн. интернет. конф. с междунар. участием «Спектрометрические методы анализа». Казань, сентябрь 2014 г. С. 154–157.