



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.793; 621.3.049.77

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

А. П. ДОСТАНКО, С. И. МАДВЕЙКО, Е. В. ТЕЛЕШ,
С. Н. МЕЛЬНИКОВ, С. М. ЗАВАДСКИЙ, Д. А. ГОЛОСОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 12.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. В статье изложены современные тенденции развития ионно-плазменных систем для ионной обработки и нанесения тонких пленок. Рассмотрены применение импульсного реактивного магнетронного распыления для формирования пленок оксида ванадия и зависимость параметров процесса от частотных характеристик электропитания, особенности и применение процесса прямого осаждения из ионного пучка для формирования ориентирующих покрытий из SiO_2 , CH , CN , CHF для жидкокристаллических дисплеев, износостойких покрытий из алмазоподобного углерода ($\alpha\text{-C}$) и нитрида углерода (CN_x). Показаны преимущества непрерывного режима электропитания сверхвысокочастотного магнетрона по сравнению с импульсным. Приведена математическая модель расчета магнетронных распылительных систем и процессов магнетронного распыления, представлены основные возможности разработанного программного комплекса Deposition.

Ключевые слова: ионно-плазменная система, ионно-лучевой источник, магнетронная распылительная система, нанесение тонких пленок, реактивное распыление, модель магнетронного распыления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ионно-плазменные системы в технологии тонких пленок / А. П. Достанко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 20–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31>.

PLASMA SYSTEMS IN THIN FILM TECHNOLOGY

ANATOLIY P. DOSTANKO, SERGEY I. MADVEYKO, EVGENI V. TELESH,
SERGEY N. MELNIKOV, SERGEY M. ZAVADSKI, DMITRIY A. GOLOSOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 12.02.2024

Abstract. The article discusses the current trends in the development of ion-plasma systems for ion processing and thin film deposition. Application of pulsed reactive magnetron sputtering for deposition of vanadium oxide films and dependence of process parameters on power supply frequency characteristics, peculiarities and application of direct ion-beam deposition for formation of coatings based on SiO_2 for optical coatings, SiO_2 , CH , CN , CHF for orientation coatings of LCD displays, wear-resistant coatings of diamond-like carbon ($\alpha\text{-C}$) and carbon nitride (CN_x) are considered. The advantages of continuous microwave magnetron power over pulsed mode are shown. The mathematical model for calculating magnetron sputtering systems, processes of magnetron sputtering and the main capabilities of the developed software complex Deposition are shown.

Keywords: ion-plasma system, ion-beam source, magnetron sputtering system, thin film deposition, reactive sputtering, magnetron sputtering model.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Dostanko A. P., Madveyko S. I., Telesh E. V., Melnikov S. N., Zavadski S. M., Golosov D. A. (2024) Plasma Systems in Thin Film Technology. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 20–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31> (in Russian).

Введение

Одним из широко используемых методов получения тонкопленочных покрытий являются процессы ионного распыления благодаря их исключительным возможностям и достоинствам, таким как высокая воспроизводимость, применимость для нанесения широкого спектра пленочных материалов, гибкость и прецизионность в управлении процессом нанесения. Среди большого разнообразия технической реализации этих методов для промышленного использования основные – процессы магнетронного и ионно-лучевого распыления, сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмохимической обработки материалов. В Центре «Ионно-плазменные системы и технологии» (Центр 2.1) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в течение многих лет ведутся работы в области исследования и разработки устройств и технологий ионной обработки и формирования тонкопленочных структур для оптики, опто- и микроэлектроники. Среди них – метод импульсного реактивного магнетронного распыления, который исследуется и используется в Центре 2.1 для нанесения пленок металлов и многокомпонентных материалов. Также ведутся исследования по развитию метода прямого осаждения из ионных пучков, при котором формирование тонкопленочных покрытий осуществляется из пучка ионов химически активных частиц, формируемых ионным источником. Возрастает интерес к использованию для решения практических задач в микро- и нанoeлектронике, оптике и мехатронике СВЧ низкотемпературной неравновесной плазмы. Это обусловлено рядом достоинств СВЧ-разрядов по сравнению с другими типами электрических газовых разрядов. Кроме того, в Центре 2.1 активно ведутся разработки математических моделей и программного обеспечения для расчета и проектирования как отдельных высокоэффективных магнетронных распылительных систем (МРС), так и технологических процессов нанесения тонких пленок, и систем магнетронного распыления с различным взаимным расположением МРС относительно подложек.

Применение методов компьютерного моделирования позволяет лучше понять основы функционирования ионно-плазменных устройств, исследовать различные конфигурации систем при изменяющихся физических условиях без их разрушения и проведения дорогостоящих комплексных экспериментов. Успешные результаты в этом направлении позволят значительно сократить период разработки и оптимизации конструкций реальных систем, время и затраты на проведение предварительных исследований, количество и разнообразие испытаний, а также минимизировать возможные ошибки при проектировании таких систем за счет исключения многочисленных итераций физического макетирования.

Формирование слоев методом импульсного реактивного магнетронного распыления

Среди плазменных методов нанесения тонких пленок одним из широко используемых является магнетронное распыление. Высокая производительность, простота использования – основные достоинства этого метода. Реактивное магнетронное распыление применяется для нанесения многокомпонентных тонких пленок оксидов, нитридов, оксинитридов, карбидов. Одна из проблем, возникающая при этом, – эффекты дугообразования. Для предотвращения данных явлений получил развитие метод импульсного магнетронного распыления (Pulsed Magnetron Sputtering, PMS) [1, 2]. Импульсный разряд постоянного тока при средней частоте 10–250 кГц предохраняет от образования дуг и стабилизирует процесс реактивного магнетронного распыления [3].

При работе магнетронной распылительной системы на постоянном токе в случае использования реактивного газа, например, кислорода, на поверхности металлической мишени в эрозивной зоне происходит образование микродуг, вызванное ростом оксидной пленки. В процессе ионной бомбардировки этой оксидной пленки на ее поверхности накапливается положительный заряд и происходит ее дуговой пробой. Развитие дуги носит лавинообразный характер, сопровождается резким увеличением тока разряда, что приводит к локальному изменению условий распыления, может сопровождаться капельным выбросом материала мишени и является причи-

ной нарушения стабильности процесса нанесения. При увеличении тока разряда активное формирование микродуг происходило при все большей концентрации кислорода. Так, для $I_t = 0,5$ А дуги отмечались при концентрации кислорода Γ_{O_2} более 22 %, а для $I_t = 1,5$ А – при $\Gamma_{O_2} > 50$ %. При $I_t = 1,5$ А и $\Gamma_{O_2} > 70$ % из-за большого количества дуг блок питания магнетрона не обеспечивал стабилизацию параметров питания МРС.

Эффективным средством для устранения дуг является асимметричное импульсное питание магнетрона током средней частоты (1–100 кГц) [4]. В течение рабочего отрицательного импульса происходит распыление материала мишени с одновременным накоплением заряда на оксидной пленке, затем во время импульса положительной полярности – компенсация заряда оксидной пленки электронами из области плазм. Анализ, проведенный в [3], показал, что время накопления заряда зависит от параметров разряда распылительной системы и свойств наносимого материала.

Установлено, что увеличение частоты импульсного питания магнетрона приводит к увеличению напряжения разряда U_t (рис. 1). Так, при токе разряда $I_t = 1,5$ А и частоте $F = 82$ кГц напряжение разряда U_t достигало максимально возможных значений для выходного напряжения используемого источника питания магнетрона (–800 В). Аналогичная зависимость характерна и для случая увеличения длительности положительного импульса (рис. 2). При фиксированной частоте 50 кГц увеличение длительности положительного импульса τ от 3 до 7 мкс приводило соответственно к увеличению напряжения разряда U_t от 613 до 744 В. При реактивном распылении металлической (ванадиевой) мишени наблюдалось уменьшение количества микродуг в разрядной зоне при частоте питающего напряжения более 5 кГц и длительности положительного импульса $\tau > 3$ мкс. В случае частоты питающего напряжения более 10 кГц и $\tau > 3$ мкс образование микродуг не регистрировалось, и таким образом обеспечивалась устойчивая работа МРС для всего используемого диапазона концентраций кислорода в смеси рабочих газов.

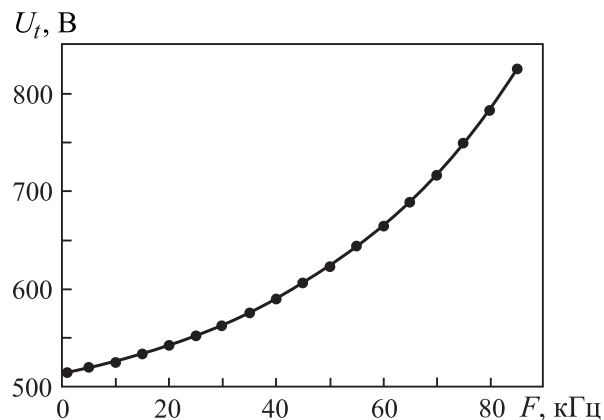


Рис. 1. Зависимость напряжения разряда от частоты следования импульсов ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1,5$ А, $\tau = 3$ мкс)

Fig. 1. Discharge voltage as a function of pulse frequency ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1.5$ А, $\tau = 3$ μ s)

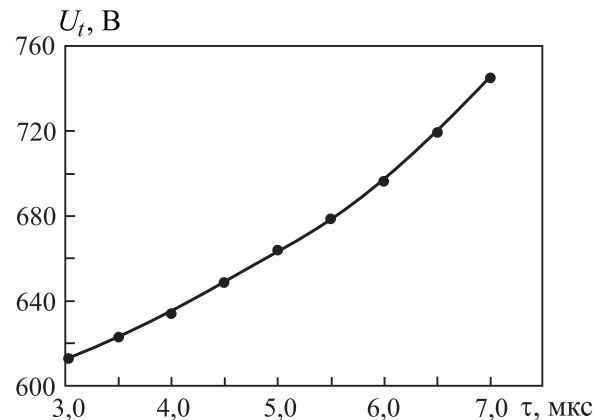


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда от длительности положительного импульса ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1,5$ А, $F = 50$ кГц)

Fig. 2. Discharge voltage as a function of positive pulse duration ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1.5$ А, $F = 50$ kHz)

На рис. 3 представлены зависимости напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси рабочих газов при реактивном импульсном магнетронном распылении металлической ванадиевой мишени (V-мишени) в режиме стабилизации тока ($F = 10$ кГц, $\tau = 3$ мкс, $U^+ = 25$ В) для токов разряда от 0,5 до 1,5 А. Характер зависимостей соответствует аналогичным зависимостям $U_t(\Gamma_{O_2})$ при работе на постоянном токе. Однако для сопоставимых режимов работы напряжение разряда при импульсном распылении принимает более высокие значения относительно напряжения постоянного тока. Также для обеих групп зависимостей отсутствуют зоны гистерезиса при увеличении и уменьшении концентрации кислорода. На рис. 4 приведены зависимости скорости нанесения слоев оксида ванадия от содержания кислорода в смеси рабочих газов для режимов распыления на постоянном токе и импульсном. Условия формирования для обоих случаев были одинаковыми: для расстояния мишень–подложка $h = 85$ мм – $F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс, для тока разряда $I_t = 1,5$ А – режим стабилизации тока.

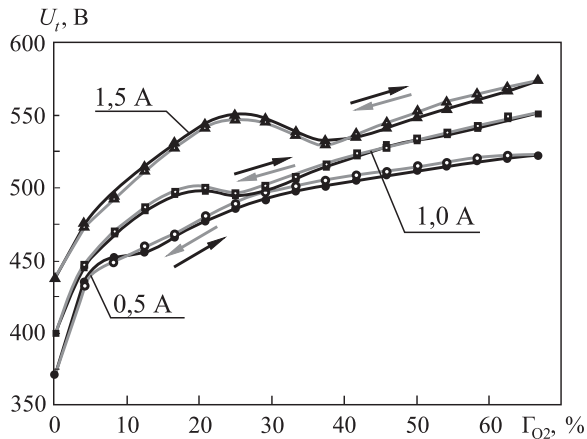


Рис. 3. Зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси газов при распылении V-мишени импульсным током при различном токе разряда ($F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс)

Fig. 3. Discharge voltage as a function of oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture at pulse sputtering of V target and different discharge current ($F = 10$ kHz, $U^+ = 25$ V, $\tau = 3$ μ s)

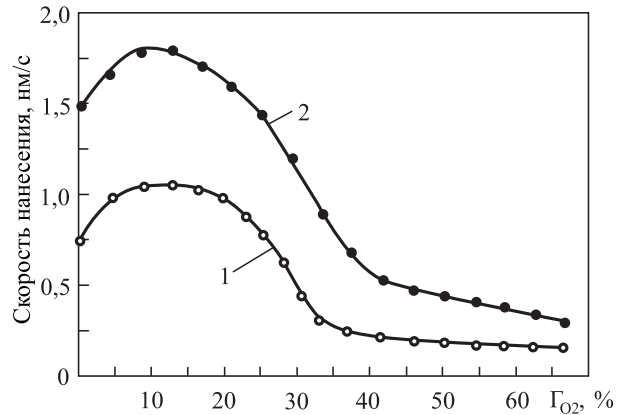


Рис. 4. Зависимость скорости нанесения пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси газов для различных режимов распыления: 1 – на постоянном токе; 2 – импульсного ($I_t = 1,5$ А, $h = 85$ мм)

Fig. 4. Dependence of the deposition rate of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture for various sputtering modes: 1 – direct current; 2 – pulse ($I_t = 1.5$ A, $h = 85$ mm)

При распылении на постоянном токе (рис. 4, кривая 1) ванадиевой мишени с увеличением содержания кислорода скорость нанесения первоначально увеличивалась и достигала максимума (1,1 нм/с) при $\Gamma_{O_2} = 12$ %. С дальнейшим повышением Γ_{O_2} скорость нанесения начинала интенсивно уменьшаться и при $\Gamma_{O_2} = 33$ % достигала точки перегиба (0,22 нм/с), а разряд переходил в реактивный режим работы, и скорость нанесения практически не зависела от Γ_{O_2} . При импульсном распылении характер зависимости не изменялся (рис. 4, кривая 2). Отличие заключается в повышенном практически на 70 % максимальном значении достигаемой скорости нанесения. Также сместилось в область больших концентраций кислорода и положение точки перегиба (с 33 до 40 %). Это поведение хорошо объясняется более высоким напряжением разряда и компенсацией заряда на оксидной пленке на поверхности мишени во время положительного импульса при реактивном импульсном распылении. Таким образом:

- напряжение разряда при реактивном магнетронном распылении как на постоянном токе, так и при импульсном режиме работы однозначно зависит от концентрации кислорода;
- при частоте импульсного питания магнетрона более 10 кГц и длительности $\tau > 3$ мкс на поверхности мишени не формируются микродуги, и обеспечивается устойчивая работа МРС во всем диапазоне концентраций кислорода;
- увеличение напряжения разряда U_d вызвано увеличением частоты и длительности положительного импульса. Повышение U_d при импульсном питании может приводить к увеличению влияния эффектов, связанных с ионной и электронной бомбардировкой растущей пленки. Это такие эффекты, как дефектообразование, имплантация ионов и атомов отдачи и распыление наносимой пленки. При этом могут происходить обогащение поверхности отдельным элементом, кристаллизация или аморфизация поверхностного слоя. Также в ряде случаев бомбардировка ионами высокой энергии ведет к возникновению дефектов в виде вакансий, межузельных атомов, дислокаций и появлению неоднородностей [5, 6].

Прямое осаждение покрытий из ионных пучков

В настоящее время методы нанесения покрытий, основанные на использовании ионных потоков из пленкообразующих газов, интенсивно развиваются в нашей стране и за рубежом [7, 8]. Для генерации ионных пучков в таких системах чаще всего используются ионные источники на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ) или сеточные ионные источники. Они позволяют формировать ионные пучки с энергией от 30 до 1000 эВ и током пучка до 1,2 А. Ионные источники на базе ускорителя с анодным слоем (УАС) могут работать как в обычных условиях, так и в режиме ионно-пучкового фокуса. При определенных условиях УАС может генери-

ровать низкоэнергетичный вторичный ионный пучок, который обладает высокой плотностью до 5 mA/cm^2 и низким энергетическим разбросом. Пиковая энергия вторичного пучка может легко варьироваться в диапазоне от 40 до 150 эВ. Преимуществами УАС являются простота конструкции, отсутствие термокатада, применение дешевых блоков питания постоянного напряжения. Благодаря высокой энергии конденсирующихся частиц обеспечиваются отличная адгезия к любым подложкам, повышенная плотность и однородность по толщине покрытий. В качестве пленкообразующих газов могут использоваться SiH_4 , CH_4 , CF_4 , O_2 , N_2 , CO_2 , металлосодержащие газы и др. Это позволяет синтезировать широкий спектр тонкопленочных покрытий, которые могут успешно применяться в различных областях науки и техники: Si, SiO_2 , Si_3N_4 , SiC, алмазоподобные покрытия, SiOF, SiOC, SiON, SiCN, CH, CHF, CN, CF, металлы и т. п. Энергия конденсирующихся на подложку ионов может контролируемо изменяться от 30 до 300 эВ, ионный ток – от 0,05 до 0,50 А. Таким образом, применение прямого осаждения позволит получить высококачественные покрытия при небольших затратах на изготовление технологического оборудования и материалы.

Разработаны и исследованы процессы низкотемпературного синтеза оптических покрытий из диоксида кремния из вторичного ионного пучка, формируемого в УАС [9]. В качестве рабочих газов использовались смесь моносилана с аргоном (5 % SiH_4 + 95 % Ar) и кислород. Скорость нанесения v_n зависела от давления рабочих газов, мощности первичного разряда и потенциала дифрагмы и составляла 0,15–0,45 нм/с. Температура подложек из стекла К8 не превышала 323 К. В видимом диапазоне коэффициент пропускания составил 0,86–0,95.

При использовании ТХУ формирование пленок SiO_2 осуществляли двумя путями: осаждением из ионных пучков смеси 5 % SiH_4 + 95 % Ar и кислорода, а также осаждением с использованием пара тетраэтоксисилана (ТЭОС). При использовании моносилана скорость нанесения составляла 0,22–0,65 нм/с, пропускание в видимом диапазоне – 90–91 % [10]. Увеличение тока разряда и парциального давления ТЭОС приводило к существенному росту v_n до 4,33 нм/с, что сравнимо со скоростью нанесения при электронно-лучевом испарении кварца. Покрытия имели пропускание на уровне 83–92 %, причем оно увеличивалось с ростом парциального давления кислорода (рис. 5). Полученные покрытия обладали высокой адгезией к стеклу и кремнию. Инфракрасные (ИК) спектры показали отсутствие ИК-поглощения группы OH, что свидетельствует о плотной структуре покрытий.

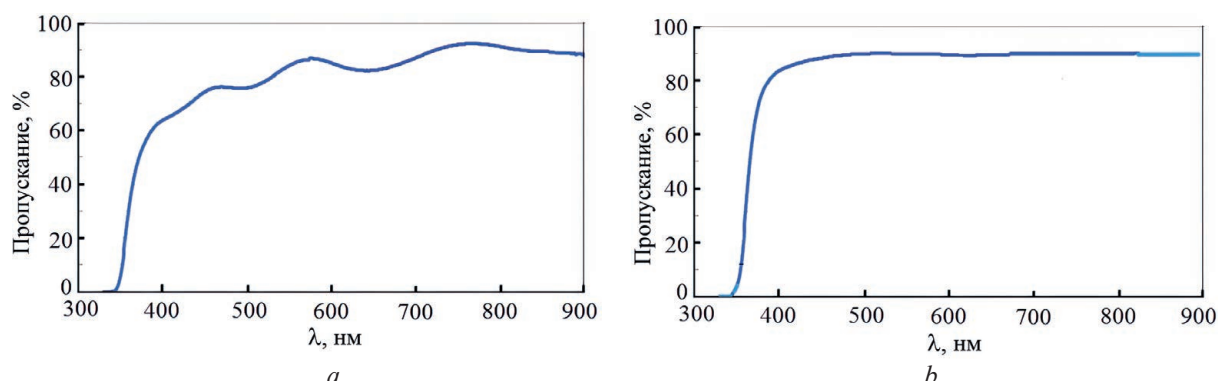


Рис. 5. Спектры пропускания покрытий, полученные при использовании тетраэтоксисилана (a) и смеси тетраэтоксисилана и кислорода (b)

Fig. 5. Transmission spectra of coatings obtained using tetraethoxysilane (a) and a mixture of tetraethoxysilane and oxygen (b)

Впервые ТХУ был успешно применен для формирования ориентирующих покрытий из SiO_2 , CH, CN, CHF для жидкокристаллических (ЖК) ячеек [6]. Покрытия наносили как на стеклянные, так и на гибкие полимерные (триацетилцеллюлоза, циклический олефиновый полимер) подложки, расположенные под углами 15° – 30° к ионному пучку. Сформированные ЖК-ячейки демонстрировали планарную и гомеотропную ориентацию очень высокого качества.

Разработаны процессы синтеза прямым осаждением из ионных пучков износостойких покрытий из алмазоподобного углерода (α -C) и нитрида углерода (CN_x). Для формирования пленок α -C применялся УАС. Рабочими газами являлись метан, пропан и толуол. Скорость нанесения составляла 0,15–0,20 нм/с. Установлено, что на $\lambda = 555 \text{ nm}$ средняя величина пропускания 40–65 %. ЭПР-спектры показали наличие ярко выраженного сигнала с $g = 2,00286$, что свиде-

тельствует об образовании структуры α -С. Это подтверждается также измерением электрической прочности покрытия, которая достигала $1,5 \cdot 10^7$ В/см. Полученные результаты свидетельствуют о высоком проценте содержания алмазной фазы в покрытиях. Измерение микротвердости покрытий по Кнупу дало результаты от 1145 до 2155 НК. Разработанные процессы синтеза пленок α -С были успешно применены при формировании просветляющих и защитных покрытий для германиевой оптики тепловизионных приборов.

Покрытия из нитрида углерода получали осаждением из ионных пучков, формируемых ТХУ и УАС. В качестве рабочих газов использовали метан и азот. При применении ТХУ скорость нанесения составила 0,54–1,33 нм/с, ширина запрещенной зоны (2,48–2,51 эВ) возрастала при повышении температуры конденсации. На рис. 6, а приведен спектр пропускания пленки CN_x , который свидетельствует о высоком уровне прозрачности в видимом диапазоне. Максимальная микротвердость 1246 НК получена при давлении азота $5,32 \cdot 10^{-2}$ Па. При оптимальных режимах синтеза получены покрытия с низким коэффициентом трения (0,1–0,2). В случае применения УАС скорость нанесения была меньше и составила 0,10–0,16 нм/с. Однако покрытия имели большую прозрачность (рис. 6, б). Максимальная микротвердость составила 2260 НК, коэффициент трения – 0,05–0,20, ширина запрещенной зоны – 2,65 эВ.

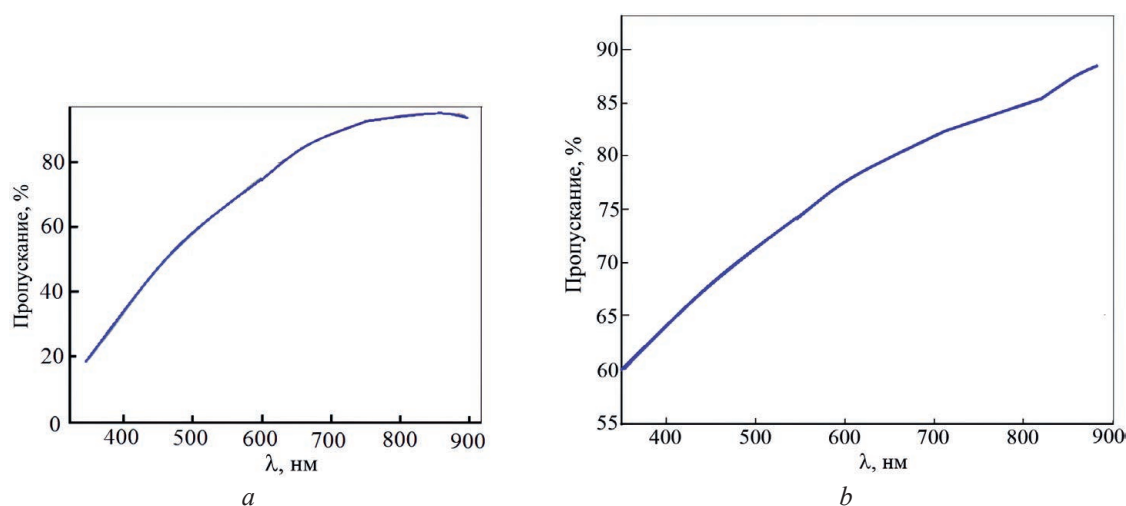


Рис. 6. Спектры пропускания пленок CN_x , полученные с применением торцевого холловского ускорителя (а) и ускорителя с анодным слоем (б)

Fig. 6. Transmission spectra of CN_x films obtained using an end Hall accelerator (a) and an accelerator with an anode layer (b)

Таким образом, разработанные процессы синтеза пленок CN_x позволяют получить покрытия с максимальным оптическим пропусканием 76 %, с высокими микротвердостью и трибологическими характеристиками, что делает их весьма перспективными для формирования защитных покрытий для дисплеев смартфонов, планшетов и т. п.

Сверхвысокочастотная плазмохимическая обработка материалов

Переход микроэлектронной промышленности на использование полупроводниковых пластин диаметром до 200–300 мм и необходимость эффективного проведения процессов групповой обработки пластин с меньшим диаметром на операциях активации поверхности, удаления фоторезистивных пленок, плазменной очистки и т. д. обуславливают потребность в разработке новых и модернизации существующих технологических процессов СВЧ плазмохимической обработки материалов. При увеличении количества обрабатываемых в камере плазмотрона полупроводниковых пластин для обеспечения требуемой скорости процесса обработки необходимо увеличивать мощность подводимого СВЧ-излучения. А поскольку СВЧ-магнетроны средней мощности технологического назначения имеют величину номинальной мощности порядка 0,7–1,5 кВт, возникает необходимость использовать дополнительные стимулирующие воздействия на процесс как в случаях групповой, так и индивидуальной СВЧ плазмохимической обработки кремниевых пластин.

Существует несколько способов решения данной проблемы: проводить процесс плазмохимического удаления фоторезиста в плазме, возбуждаемой при комбинировании высокочастотных

и СВЧ-полей; использовать для запитки плазмотрона несколько СВЧ-магнетронов, работающих на общую плазменную нагрузку; интенсифицировать процесс плазмохимического удаления фоторезиста путем разогрева полупроводниковых пластин ИК-излучением и др. Данные способы интенсификации применяются в технологии микроэлектроники для прецизионных процессов плазменной обработки единичных полупроводниковых пластин и экономически нецелесообразны для непрецизионной обработки. В связи с этим актуальной задачей является поиск более простых способов интенсификации процессов групповой обработки полупроводниковых пластин с минимальной доработкой существующего технологического оборудования, к которым в первую очередь можно отнести использование усовершенствованных источников электропитания СВЧ-магнетронов средней мощности и нагрев обрабатываемых материалов от имеющегося в составе плазмотрона источника СВЧ-энергии. Применительно к технологии обработки полупроводниковых материалов особый интерес представляют возможность увеличения энерговклада в плазму СВЧ-разряда и повышение эффективности процессов СВЧ плазменной обработки, в том числе путем перехода к такому режиму электропитания СВЧ-магнетрона, который позволил бы обеспечить управляемый непрерывный режим генерации плазмы СВ-разряда в отличие от распространенных сегодня импульсных.

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено [11, 12], что изменение режима электропитания СВЧ-магнетрона с импульсного питания на непрерывный приводит к изменению характера формируемого плазменного разряда. Это, в частности, проявляется в наличии постоянной составляющей сигнала интегрального оптического свечения плазмы. При минимальных уровнях постоянной составляющей анодного тока СВЧ-магнетрона, достаточных для устойчивой генерации плазмы в непрерывном режиме, проявляется эффект нелинейного увеличения амплитуды сигнала интегрального оптического свечения СВЧ-разряда с ростом подводимой к СВЧ-магнетрону мощности. Рост интенсивности регистрируемых спектральных линий свидетельствует о повышении концентрации химически активных частиц в объеме плазмы. Это является одним из важнейших факторов при разработке процессов вакуумно-плазменной обработки материалов. Таким образом, экспериментально установлена возможность формирования и устойчивого поддержания плазмы СВЧ-разряда большого объема (около 9000 см³) в крупногабаритной камере СВЧ-плазмотрона резонаторного типа в импульсном и непрерывном режимах ее генерации [13].

Известно, что методы вакуумно-плазменной обработки материалов при изменении энергетической составляющей плазмы могут вносить, как правило, значительную дополнительную дефектность в кристаллическую структуру приповерхностных слоев и пленок [14–16], что ухудшает их электрофизические свойства, а значит, и параметры приборов, изготовленных на их основе. Большую группу дефектов, возникающих в результате плазменного воздействия, составляют дефекты, связанные с нарушением электрических режимов функционирования сформированных структур в результате электрических пробоев.

Уменьшение уровня энергетического воздействия плазмы на структуру приповерхностных слоев и пленок является одной из актуальных проблем технологии микроэлектроники. Поэтому для условий перехода от импульсного к постоянному режиму формирования СВЧ-разряда, сопровождающегося увеличением энерговклада в плазму, были проведены исследования величины СВЧ-мощности, проникающей в плазменный объем. Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 7. Для обоих режимов электропитания наблюдается близкий к линейному характер роста величины мощности СВЧ-энергии в плазменном объеме с увеличением мощности, потребляемой СВЧ-генератором. Однако при постоянном режиме генерации плазмы наблюдаются меньшие значения проникающей в разряд СВЧ-мощности, чем при импульсном режиме при близких величинах потребляемой генератором мощности электропитания. Зарегистрированные показания измерителя мощности МЗ-28 на уровне ~1850 Вт указывают на уменьшение примерно в 2,3 раза уровня СВЧ-мощности в объеме плазмы СВЧ-разряда. Переход от импульсного к непрерывному режиму работы источника электропитания СВЧ-магнетрона при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема [8, 9], что оказывает влияние на химическую активность плазмы СВЧ-разряда. Полученные положительные результаты можно объяснить тем, что уменьшение скважности импульсов анодного тока источника электропитания СВЧ-магнетрона приводит к уменьшению скважности следования импульсов плазменных формирований.

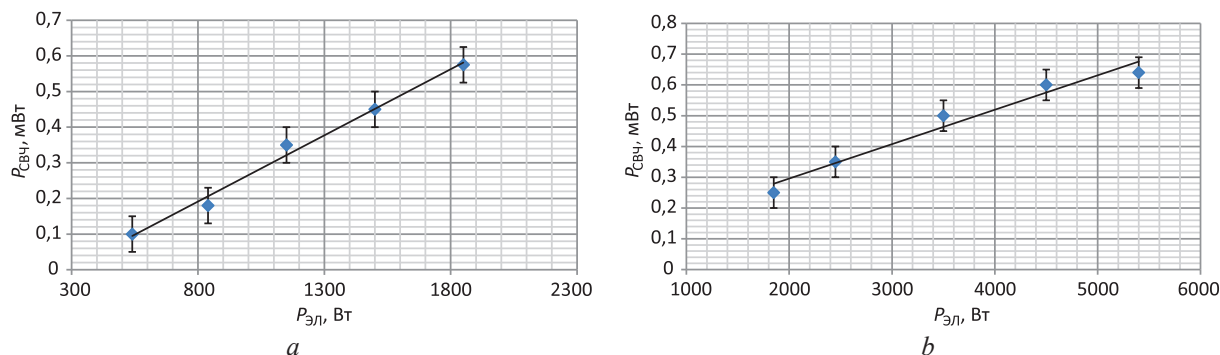


Рис. 7. Зависимость СВЧ-мощности, проникающей в плазменный объем, от мощности, потребляемой СВЧ-магнетроном, при режиме генерации плазмы: *a* – импульсным; *b* – непрерывном
Fig. 7. Dependence of the microwave power penetrating into the plasma volume on the power consumed by the microwave magnetron in the plasma generation mode: *a* – pulsed; *b* – continuous

Распад плазмы между импульсами плазменных формирований происходит не полностью, и значительная часть электронов и других возбужденных частиц может оставаться в разрядном объеме. Непрерывный режим генерации плазмы СВЧ-разряда может характеризоваться нарастанием концентрации электронов в плазменном объеме. Этому способствуют отсутствие эффекта деионизации плазменного объема в интервалах между плазменными импульсами, характерного для импульсного режима работы СВЧ-магнетрона, и, соответственно, повышение концентрации плазменных частиц. При этом увеличение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ-энергии в плазменном объеме по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы. Этот эффект может быть связан с наличием скин-слоя, способствующего переотражению части СВЧ-мощности в резонаторной камере, при этом большая часть СВЧ-энергии может поглощаться в нем. В этом случае электрофизические свойства плазмы в центральной области плазменного разряда будут характеризоваться энергией электронов, которые вырываются из скин-слоя.

Моделирование плазменных систем и процессов

Существующие сегодня модели магнетронных распылительных систем и процессов распыления представлены в виде разрозненных программных продуктов, не совместимых друг с другом и не привязанных непосредственно к устройствам, и чаще всего базируются на математическом описании протекающих физических процессов. Предложена математическая модель расчета разрядной зоны и распределения ионного тока мишени МРС, которая основана на определении относительной скорости ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона. В модели действует несколько допущений. Так, основная ионизация рабочего газа происходит в зоне скрещенных $E \times H$ полей, а индукция магнитного поля в этой зоне имеет величину от 0,02 Тл и более. Модель оперирует реальными параметрами процесса и позволяет вычислить время выработки мишени и массу распыленного материала, а также определить условия для повышения коэффициента использования материала мишени [17].

Расчет скорости нанесения осуществляли с использованием метода интегрирования плотности потока распыленного материала с каждой точки зоны распыления. При построении моделей принимали определенные допущения, а именно: распыленные атомы распространяются направленно, при соударении с подложкой распыленный атом конденсируется в точке соударения, рабочее давление находится ниже границы термализации (0,04–1,00 Па), расстояние «мишень – подложка» меньше или равно длине свободного пробега для указанного диапазона давлений. При расчете протяженных МРС зона распыления мишени разделялась на четыре участка: два оконечных закругленных и два прямолинейных. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами x_2, y_2 , расположенной на расстоянии l от точки распыления МРС с протяженной зоной распыления, может быть рассчитана как сумма скоростей нанесения из прямолинейных и закругленных участков зоны распыления:

$$v(x_2, y_2) = v_1(x_2, y_2) + v_2(x_2, y_2) + v_3(x_2, y_2) + v_4(x_2, y_2), \quad (1)$$

где $v_1(x_2, y_2), v_2(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени; $v_3(x_2, y_2), v_4(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с прямолинейных участков зоны распыления мишени.

Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления

$$v_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dr_1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 v_t(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) F(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} d\theta, \quad (2)$$

где R_{\min}, R_{\max} – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени; r_1 – текущий радиус на мишени; $v_t(r_1)$ – скорость распыления материала мишени на радиусе r_1 ; l – расстояние от точки распыления до точки конденсации; φ – угол конденсации; θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона; F – функция пространственного распределения распыленных частиц, использованная для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадал с направлением нормали к поверхности:

$$F(\theta) = \frac{\cos \theta}{\alpha^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}; \quad (3)$$

α – коэффициент, от которого зависит форма распределения распыленных частиц, при $\alpha > 1$ функция имеет форму надкосинусного, а при $\alpha < 1$ – подкосинусного распределения.

Для прямолинейных участков зоны распыления формула скорости нанесения имеет вид

$$v_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dx_1 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{v_t(x_1) \cos \varphi(x_1, y_1) F(x_1, \theta)}{l^2(x_1, y_1)} dy_1, \quad (4)$$

где L – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени; x_1, y_1 – координаты текущей точки распыления; $v_t(x_1)$ – скорость распыления материала мишени для координаты x_1 .

При расчете скорости аксиальных МРС в формуле (4) остаются только скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени. Для расчета толщины нанесенной пленки при линейном перемещении подложек учитываются время, скорость перемещения подложки и протяженность зоны нанесения пленки

$$W(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} v(x_2, t \times v_s) dt, \quad (5)$$

где $v(x_2, t \times v_s)$ – скорость нанесения в точке $t \times v_s$ на расстоянии x_2 от короткой оси магнетрона; v_s – скорость перемещения подложек; t – время нанесения; t_{dep} – время нахождения подложки в зоне нанесения, равное отношению протяженности зоны нанесения пленки к скорости перемещения подложки.

В моделях с вращением подложки при расчете учитываются параметры угла наклона подложки и угловая скорость вращения подложки, в каждый момент времени рассчитывается положение точки распыления и точки конденсации. Новизной предложенных моделей является учет распределения плотности тока в зоне эрозии мишени, ионно-электронной эмиссии материала распыляемой мишени и пространственного распределения потока распыленных частиц. В моделях учтен как осесимметричный, так и протяженный вариант МРС. В отличие от большинства существующих моделей, где рассматривается вариант нанесения пленок на неподвижную подложку, впервые разработаны модели для наиболее часто применяемых в промышленности конфигураций систем (линейное перемещение подложек; нанесение на подложки, расположенные на вращающемся барабанном подложкодержателе для двух конфигураций процесса: магнетрон располагается снаружи вращающегося барабанного подложкодержателя; магнетрон располагается внутри вращающегося барабанного подложкодержателя; вращающаяся подложка, расположенная на расстоянии от оси магнетрона; прогнозирование элементного состава нанесенных пленок при распылении мозаичных мишеней с произвольным расположением вставок), учитывающих технологические и кинематические факторы, влияющие на распределение толщины покрытий. Предложенные модели при рабочем давлении 0,04–1,00 Па обеспечивают определение профилей скорости нанесения, компонентного состава и толщины пленок с погрешностью не более 10 %.

Для решения задачи расчета распределения скорости нанесения покрытия разработан программный комплекс Deposition (рис. 8–10), который позволяет рассчитать скорость нанесения слоев в любой точке подложки для аксиальных и протяженных магнетронных распылительных систем, толщину наносимых слоев для различных форм зон распыления и систем перемещения подложек.

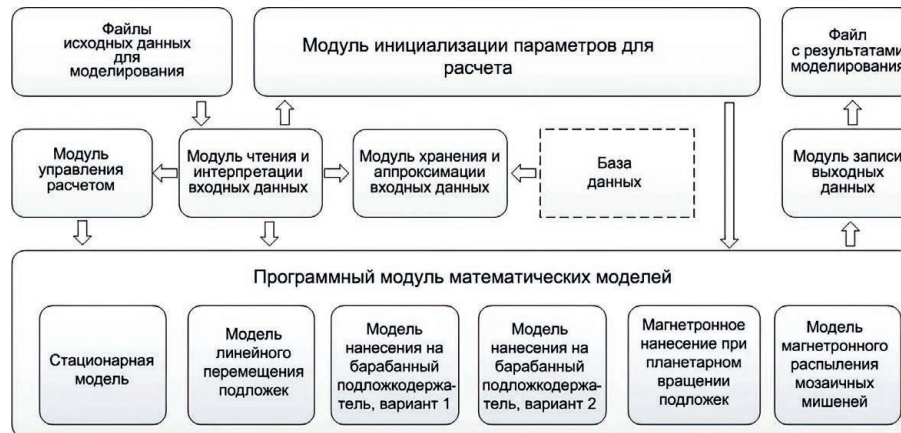


Рис. 8. Структура программного комплекса Deposition для моделирования нанесения тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления
Fig. 8. Structure of the software package Deposition for modeling thin film coating by magnetron sputtering

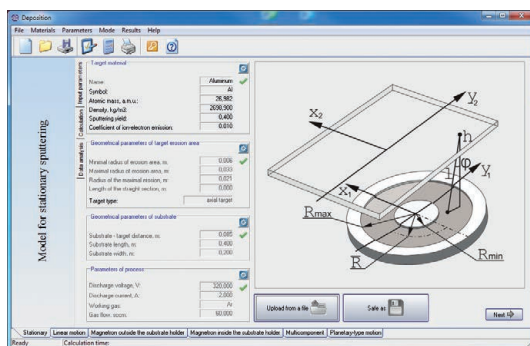


Рис. 9. Диалоговое окно ввода данных программного блока «Стационарный»
Fig. 9. Dialog window for input data program block “Stationary”

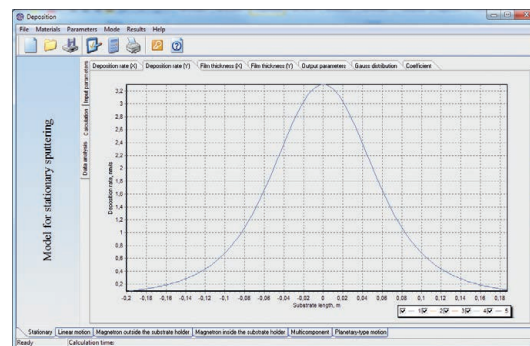


Рис. 10. Результаты расчета распределения скорости нанесения при использовании блока «Стационарный»
Fig. 10. Results of calculation of deposition rate distribution when using program block “Stationary”

Заключение

1. В настоящее время в производстве полупроводниковых интегральных схем актуально применение кластерных систем для нанесения отдельных тонкопленочных слоев и их последовательностей. В БГУИР активно ведутся исследования по разработке модели распыления с применением магнетронных систем с вращающейся магнитной системой, когда обеспечивается высокий коэффициент использования материала мишени, и можно достичь оптимального баланса между объемом вырабатываемого материала мишени и требуемой равномерностью толщины пленки на подложке.

2. Перспективны, но требуют экспериментальной апробации при изготовлении реальных микро- и оптоэлектронных приборов, процессы прямого осаждения *low-k* диэлектриков и элементов оптических волноводов с низким коэффициентом преломления. Для синтеза фторуглеродных покрытий с использованием плазменных разрядов в углерод- и фторсодержащих газах наиболее часто применяются высокочастотные плазмохимическое осаждение, индуктивно-связанная плазма, импульсная плазма высокой плотности, которые требуют сложных блоков питания и согласования высокочастотной мощности. Применение торцевого холловского ускорителя и ускорителя с анодным слоем потенциально может упростить процесс осаждения и повысить его управляемость.

3. Экспериментальные результаты исследований режимов работы сверхвысокочастотного генератора в составе технологической установки плазменной обработки материалов, обеспечивающего непрерывный характер формирования сверхвысокочастотного разряда, указывают на перспективность данных решений применительно к задачам модификации существующих и разработке новых эффективных сверхвысокочастотных вакуумно-плазменных процессов и оборудования для их работы в непрерывном режиме.

Литература

1. Kelly, P. J. Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications / P. J. Kelly, R. D. Arnell // *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
2. Sproul, W. D. High-Rate Reactive DC Magnetron Sputtering of Oxide and Nitride Superlattice Coatings / W. D. Sproul // *Vacuum*. 1998. Vol. 51, No 4. P. 641–646.
3. Технологические процессы и системы в микроэлектронике / А. П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2009.
4. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А. П. Достанко. Минск: Бестпринт, 2011.
5. Chapman, B. Glow Discharge Processes / B. Chapman. NY: Wiley, 1980.
6. Tachi, Sh. Impact of Plasma Processing on Integrated Circuit Technology Migration: From 1 mm to 100 nm and Beyond / Sh. Tachi // *Journal of Vacuum Science Technology*. 2003. Vol. 21, No 5. P. S131–S138.
7. Dielectric Properties of the Ion Beam Deposited SiO_x Doped DLC Films / Š. Meškiniš [et al.] // *Material Sci.* 2009. Vol. 15, No 1. P. 3–6.
8. Телеш, Е. В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е. В. Телеш, А. П. Достанко // *Контенант*. 2014. Т. 13, № 2. С. 31–33.
9. Телеш, Е. В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, Н. К. Касинский // *Контенант*. 2014. Т. 1, № 2. С. 27–30.
10. Телеш, Е. В. Оптические характеристики тонких пленок диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, А. П. Достанко, А. Ю. Вашуров // *Доклады БГУИР*. 2015. № 8. С. 81–85.
11. Tsikhan, O. I. Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron / O. I. Tsikhan, S. I. Madveika, S. V. Bordusau // *High Temperature Material Processes*. 2021. Vol. 25, No 2. P. 65–75.
12. Регулируемый трехфазный источник питания, работающего на плазменную нагрузку СВЧ магнетрона: полез. модель ВУ 13119 / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов. Опубл. 28.02.2023.
13. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов // *Проблемы физики, математики и техники*. 2022. Т. 52, № 3. С. 42–47.
14. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев. М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Плазменная технология в производстве СБИС, пер. с англ. / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987.
16. Fonash, S. J. Plasma Processing Damage in Etching and Deposition / S. J. Fonash // *IBM J. Res. Develop.* 1999. Vol. 43, No 12. P. 103–106.
17. Голосов, Д. А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика*. 2013. № 4. С. 75–82.

References

1. Kelly P. J., Arnell R. D. (2000) Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications. *Vacuum*. 56, 159–172.
2. Sproul W. D. (1998) High-Rate Reactive DC Magnetron Sputtering of Oxide and Nitride Superlattice Coatings. *Vacuum*. 51 (4), 641–646.
3. Dostanko A. P., Zalessky V. G., Rusetsky A. M., Lanin V. L., Petukhov I. B., Golosov D. A., et al. (2009) *Technological Processes and Systems in Microelectronics: Plasma, Elektron-Ion-Beam, Ultrasonic*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Dostanko A. P., Rusetsky A. M., Bordusov S. V., Lanin V. L., Anufriev L. P., Karpovich S. V. (2011) *Electrophysical Processes and Equipment in Micro- and Nanoelectronics Technology*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Chapman B. (1980) *Glow Discharge Processes*. NY, Wiley Publ.

6. Tachi Sh. (2003) Impact of Plasma Processing on Integrated Circuit Technology Migration: From 1 mm to 100 nm and Beyond. *Journal of Vacuum Science Technology*. 21 (5), S131–S138.
7. Meškiniš S., Gudaitis R., Tamulevičius S., Kopustinskis V., Andrulevičius M. (2009) Dielectric Properties of the Ion Beam Deposited SiO_x Doped DLC Films. *Material Sci.* 15 (1), 3–6.
8. Telesh E. V., Dostanko A. P. (2014) Application of a Secondary Discharge in an Accelerator with an Anode Layer for the Formation of Optical Coatings from Silicon Dioxide. *Contentant*. 13 (2), 31–33 (in Russian).
9. Telesh E. V., Kasinsky N. K. (2014) Formation of Optical Coatings by Direct Deposition from Ion Beams. *Contentant*. 1 (2), 27–30 (in Russian).
10. Telesh E. V., Dostanko A. P., Vashurov A. Y. (2015) Optical Performances of Silicon Dioxide Thin Films Received by Direct Deposition from Ion Beams. *Doklady BGUIR*. 8 (94), 81–85 (in Russian).
11. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2021) Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron. *High Temperature Material Processes*. 25 (2), 65–75.
12. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2023) *Adjustable Three-Phase Power Supply for a Microwave Magnetron Operating on a Plasma Load*. Useful. Model BY. Published 28.02.2023 (in Russian).
13. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2022) The Study of the Microwave Magnetron Pulse Power Supply Electrical Parameters Influence on the Microwave Discharge Plasma Generation Modes. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 52 (3), 42–47 (in Russian).
14. Danilin B. S., Kireev V. Yu. (1987) *Application of Low-Temperature Plasma for Etching and Cleaning of Materials*. Moscow, Energoatomizdat Publ. (in Russian).
15. Einspruck N., Brown D. (ed.) (1987) *Plasma Technology in VLSI Production*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
16. Fonash S. J. (1999) Plasma Processing Damage in Etching and Deposition. *IBM J. Res. Develop.* 43 (12), 103–106.
17. Golosov D. A., Zavadsky S. M., Melnikov S. N. (2013) End-to-End Modeling of Coating Processes Using Magnetron Sputtering. *Vestnik of Polotsk State University. Series S: Fundamental Sciences. Physics*. (4), 75–82 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Достанко А. П., акад. Национальной академии наук Беларуси, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Центра «Ионно-плазменные системы и технологии» (Центр 2.1) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мадвейко С. И., канд. техн. наук, доц., зав. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Телеш Е. В., ст. препод. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Мельников С. Н., канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Завадский С. М., канд. техн. наук, доц., нач. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Голосов Д. А., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-79
E-mail: szavad@bsuir.by
Завадский Сергей Михайлович

Information about the authors

Dostanko A. P., Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Principal Researcher at the Center “Ion Plasma Systems and Technologies” (Center 2.1) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Madveyko S. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Telesh E. V., Senior Lecturer at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Melnikov S. N., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Zavadski S. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Golosov D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-79
E-mail: szavad@bsuir.by
Zavadski Sergey Mikhaylovich