

Нанесение металлических пленок с использованием магнетронного разряда в системе с полым катодом

Ю.П.Царьгородцев, Н.П.Полуэктов, В.Н.Харченко, И.А.Камышов

Московский государственный университет леса

И.И.Усатов

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

Проведены исследования плазмы в магнетронном разряде с полым катодом для осаждения металлических пленок, применяемых в изделиях микро- и нанoeлектроники. Медный катод выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра диаметром 8 см, длиной 7 см. Давление разряда 0,5–10 мТор, мощность до 6 кВт. С помощью зонда измерены радиальные распределения параметров плазмы. Концентрация плазмы достигает 10^{12} см^{-3} на расстоянии 20 см от магнетрона. Большая степень ионизации распыленных атомов металла позволяет контролировать энергию и поток осаждаемых частиц полем внешнего электромагнита.

Магнетрон с полым катодом – новый тип источника плазмы для осаждения пленок с использованием атомов и ионов металла. Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более 10^{12} см^{-3} при давлении 1 мТор), создаваемая в большом объеме (10^3 см^{-3}), низкая (10–50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку, что обуславливает его применение для создания адгезионных, диффузионных и затравочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях субмикронных структур с большим аспектным отношением [1, 2]. В разряде на смеси инертных и реактивных газов можно получать компаундные многослойные пленки с наноразмерными структурами [3]. Образование пленок в таком разряде сопровождается большими потоками низкоэнергетических ионов, что позволяет получать пленки с уникальными свойствами.

В настоящей работе приведены результаты исследования магнетронного разряда с полым катодом. На рис.1 показана схема установки. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 8 см, длина 7 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов, изготовленные из листов толщиной 1–3 мм. Питание катода производится от инверторного источника мощностью до 12 кВт (20 А, 600 В). Вакуумная камера состоит из катода – источника плазмы и реактора диаметром 35 см, длиной 55 см. Для откачки использовался турбомолекулярный насос (ТМН), подача газа осуществлялась через электронный регулятор расхода. Магнитное поле создавалось столбиками из Fe–Ne–В-магнитов (12 шт), расположенных вокруг катода. Концы столбиков соединены кольцевыми железными магнито-проводами. Индукция магнитного поля вблизи цилиндрической поверхности катода

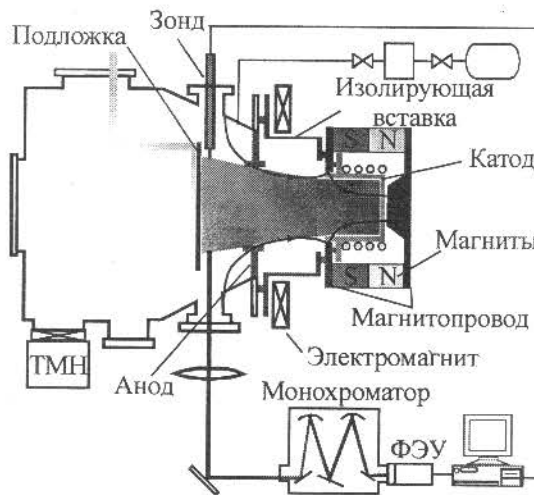


Рис. 1. Схема установки

составляет 800 Гс для Fe–Ne–В-магнитов. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Скрещенные $E \times B$ поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более 10^{12} см^{-3}). Коэффициент использования мишени в таком катоде высок, зона эрозии занимает почти всю цилиндрическую часть. Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покинуть полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального ядра потока составляет порядка 5 см на расстоянии 20 см от среза магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов. Чтобы уменьшить радиальные потери плазмы, между катодом и заземленным анодом устанавливалась цилиндрическая вставка диаметром 160 мм и длиной 110 мм, находящаяся под плавающим потенциалом.

Радиальные профили температуры электронов, функции распределения электронов по энергиям, концентрации ионов и электронов, а также плавающего потенциала V_f и потенциала плазмы V_s определялись из зондовых характеристик цилиндрического зонда Лэнгмюра ($r = 0,175 \text{ мм}$, $l = 5 \text{ мм}$). Зонд располагался на расстоянии 20 см от среза магнетрона и 1 см перед подложкой. Для регистрации и анализа ВАХ зондов разработана специальная компьютерная автоматизированная система. Ее аппаратная часть реализована на базе PCI-платы сбора данных NI6221 фирмы National Instruments. Напряжение на зонд подается с выхода специально изготовленного мощного высоковольтного усилителя ($U_{\text{вых}}$ варьировалось от -80 до $+80 \text{ В}$, $I_{\text{вых}} = 0,8 \text{ А}$). Для программного управления напряжением зонда в плате сбора данных задействован один канал ЦАП с разрешением 16 бит и выходным напряжением от 10 до 10 В. Кроме того, для измерения напряжения на зонде и зондового тока задействованы еще два канала АЦП с разрешением 16 бит и входным напряжением от 5 до $+5 \text{ В}$ (устанавливается программно). Напряжение, пропорциональное зондovому току, берется с резистора 10 Ом, включенного последовательно зонду, а напряжение зонда – с омического делителя 1:20. Для увеличения помехозащищенности указанные входы и выход NI6221 подключаются к зонду через модули гальванической развязки AI03 и AO10 соответственно. Последние располагаются в блоке подготовки сигналов SC-2345 фирмы National Instruments.

Программа управления измерениями реализована в среде визуального программирования LabVIEW 8.0 и снабжена развитым графическим интерфейсом, позволяющим оперативно управлять процессом измерения, отображения и сохранения данных. Данные ВАХ сохраняются в виде табличных файлов объемом максимум 640 пар точек «напряжение–ток» со стандартизованным, автоматически формируемым именем.

Для обработки данных ВАХ использовалась программа MatLAB. На начальном этапе работы программы производится сглаживание данных В-сплайнами и вычисляются первая и вторая производные в интерактивном режиме. Необходимость такой процедуры продиктована тем, что экспериментальные данные содержат шумы, обусловленные колебаниями плазмы. В условиях рассматриваемого разряда отношение радиуса зонда к дебаевскому радиусу порядка 10, поэтому аналитическая теория Лэнгмюра не применима для анализа ВАХ. Для определения концентрации плазмы используется метод параметризации результатов Лафрамбойза, который, применяя метод численного моделирования, определил функциональное соотношение между нормированным значением потенциала плазмы и нормированным значением зондового тока.

Используемый в программе алгоритм является развитием метода, описанного в [4]. Температура электронов, используемая в алгоритме, определяется как средняя температура:

$$T_e = \frac{2}{3k} \int_0^{\infty} E f(E) dE \left[\int_0^{\infty} f(E) dE \right]^{-1},$$

где E – энергия; k – постоянная Больцмана; $f(E)$ – функция распределения электронов по энергиям, определяемая по второй производной ВАХ.

Измерение спектров излучения плазмы проводилось с помощью монохроматора с дисперсией 2,4 нм/мм в области расположения подложки на расстоянии 20 см от магнетрона. В качестве приемника излучения использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100 (см. рис.1). На рис.2 показаны ВАХ разряда для различных давлений. С увеличением давления напряжение разряда уменьшается, что связано с ростом концентрации плазмы. Вероятность ионизации атомов электронами пропорциональна концентрации нейтральных частиц, а уменьшение энергии электронов в данном диапазоне давлений, приводящее к обратному эффекту, незначительно.

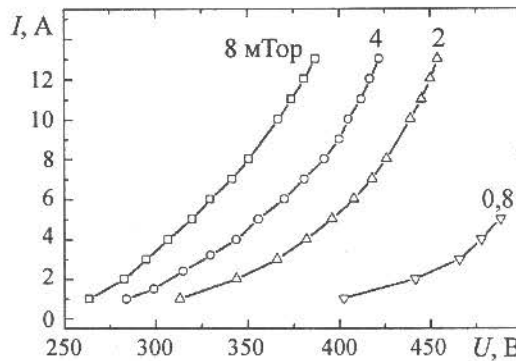


Рис.2. ВАХ разряда для различных давлений

Влияние магнитного поля электромагнита на радиальные характеристики плазмы, измеренные на расстоянии 20 см от среза магнетрона, показано на рис.3. Увеличение магнитного поля электромагнита, направленного навстречу магнитному полю постоянных магнитов, с одной стороны, приводит к росту однородности потока, с другой – к падению концентрации плазмы (рис.3,а). При мощности разряда 3 кВт и давлении 5 мТор концентрация плазмы на оси разряда уменьшается с $7,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при выключенном электромагните до $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при токе 1,25 А. Отметим, что внутри магнетрона концентрация плазмы изменяется очень мало, так как ВАХ разряда слабо зависят от тока электромагнита (при работе источника магнетрона в режиме постоянного тока напряжение изменяется на несколько вольт). Таким образом, изменение концентрации происходит вне магнетрона, где расходящееся магнитное поле электромагнита уводит замагниченные электроны на боковые стенки камеры, которые, в свою очередь, тянут за собой ионы.

Как следует из рис.3,б, на расстоянии 20 см от магнетрона температура электронов уменьшается при включении электромагнита. Вероятно, это происходит вследствие роста потерь на возбуждение и ионизацию атомов при увеличении сечения потока. Тем не менее, большие величины концентрации и температуры электронов на таком расстоянии позволяют эффективно ионизовать распыленные атомы металла на пути их движения к подложке.

Следует отметить, что энергия ионов на изолированную подложку, равная $e(V_p - V_f)$, не превышает 20 эВ.

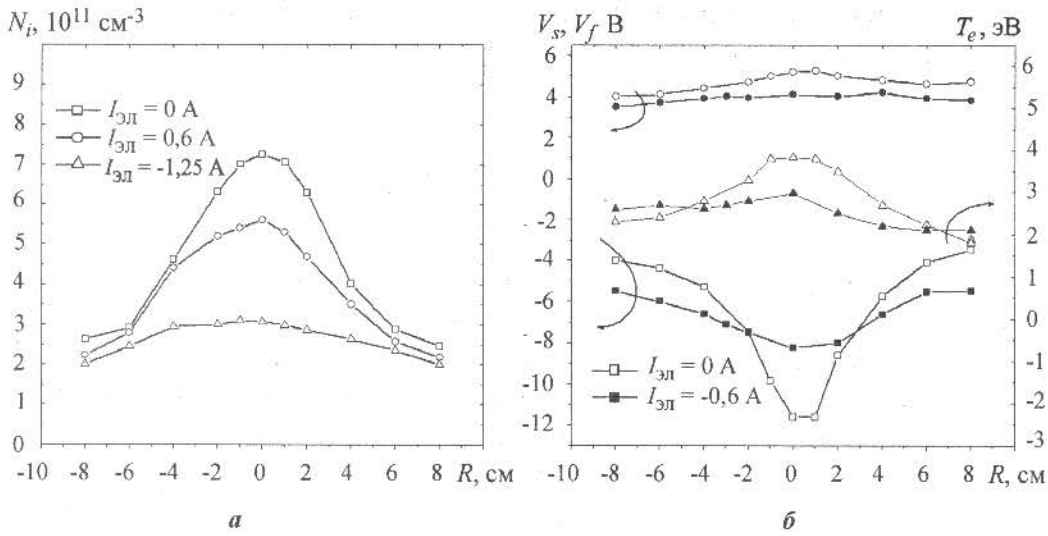


Рис.3. Радиальные распределения: а – концентрации электронов; б – потенциалы плазмы V_s (●, ○), плавающего потенциала V_f (■, □) и средней температуры электронов $\langle T_e \rangle$ (▲, Δ) в зависимости от тока электромагнита $I_{эл}$ (Ar, $p = 5$ мТор; расход Ar – 50 см³/мин; $I = 8$ А; $U = 384$ В; расстояние от магнетрона 20 см)

Влияние мощности на параметры разряда в его центре на расстоянии 20 см от магнетрона показано на рис.4. Плазменный и плавающий потенциалы, средняя температура электронов слабо зависят от мощности, а концентрация плазмы растет почти линейно с мощностью до уровня 1,5 кВт, затем показатель степени уменьшается до 0,6. При заданной мощности концентрация плазмы увеличивается с ростом давления разряда (до 10 мТор в наших экспериментах), так как увеличивается число столкновений электронов с атомами.

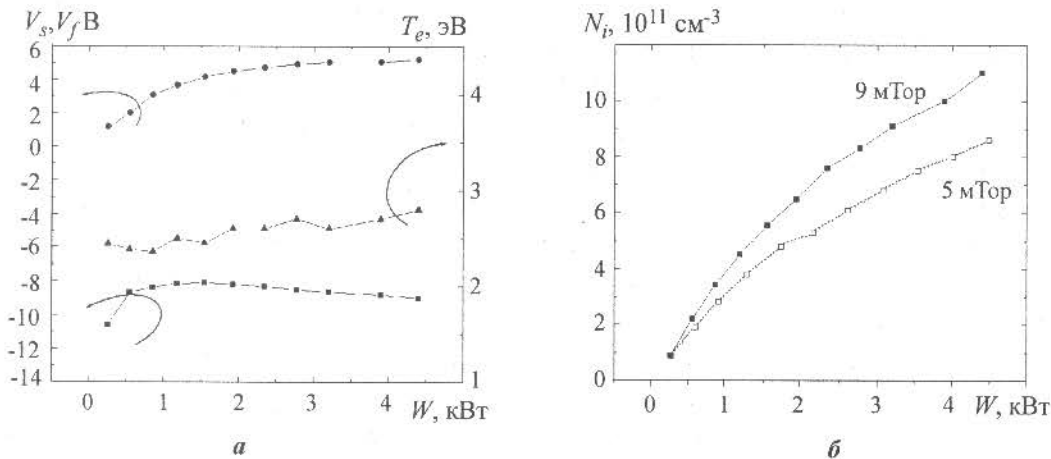


Рис.4. Зависимость потенциала плазмы V_s (●), плавающего потенциала V_f (■), средней температуры электронов $\langle T_e \rangle$ (▲) (а) и концентрации электронов N_e (■, □) (б) от мощности разряда. Электромагнит выключен; $r = 0$ см

Возрастание концентрации и числа высокоэнергетичных электронов с увеличением мощности разряда вызывает эффективную ионизацию распыленных атомов меди. На рис.5 показаны зависимости нормализованных интенсивностей спектральных линий атомов и ионов Ag и Cu от мощности разряда (интенсивность линий при $W = 300$ Вт принята за 1, при меньших мощностях излучение ионов меди на уровне шумов). С увеличением мощности в 10 раз интенсивность излучения атомов аргона возрастает

в 10 раз, атомов меди в 20–25 раз, а ионов меди и аргона в 100–120 раз. Эти измерения указывают на возможность достижения больших степеней ионизации потоков распыленных атомов. На рис.6 приведен профиль эрозии (черные значки): длина зоны распыления составляет 5 см, эрозия неравномерна по длине катода. Как известно, наибольшая величина эрозии происходит в области, где магнитные силовые линии параллельны поверхности мишени. Данный профиль эрозии был получен при длине столбиков магнитов 7,5 см. При увеличении длины магнитных столбиков до 10 см размер области, где магнитные силовые линии параллельны стенкам катода, возрос и профиль эрозии стал более плоским (светлые значки). По этим измерениям рабочая площадь катода составляет порядка 125 см². Задняя (торцевая) поверхность катода не распыляется, на ней имеет место осаждение металла.

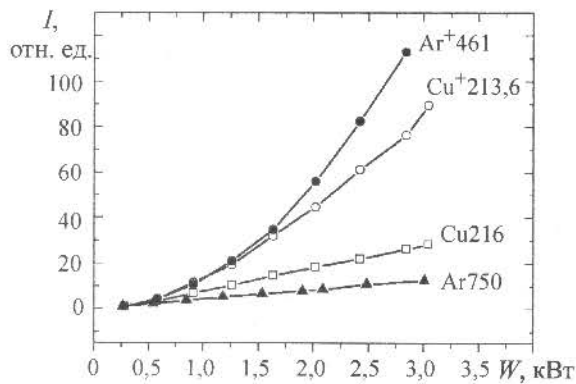


Рис.5. Зависимость нормализованных интенсивностей спектральных линий от мощности разряда ($p = 4$ мТор, 20 см от магнетрона)

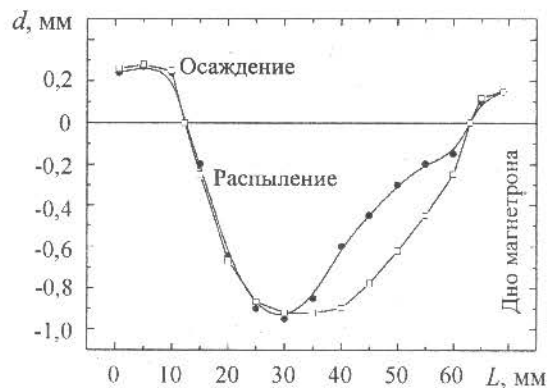


Рис.6. Профиль эрозии мишени магнетрона по его длине

Плазма при низких давлениях характеризуется сильной неравновесностью: температура электронов составляет 2–10 эВ, в то время как температура атомов и ионов на два порядка меньше. Образование пленок при воздействии больших потоков ионов и атомов не может быть описано равновесной термодинамикой и, как следствие, часто наблюдается образование метастабильных фаз. Способность синтезировать материалы при существенно более низких температурах по сравнению с равновесными – важное свойство разрядов при низких давлениях в установках плотной плазмы [3].

При температуре подложки $0,3T_{\text{плавл}} < T < 0,5T_{\text{плавл}}$ и значительных потоках ионов пленка имеет волокнистую структуру, в которой кристаллы растут перпендикулярно поверхности подложки с плотной упаковкой (пустоты 5%) [5]. Поток энергетических частиц перераспыляет атомы металла со слабой адгезией, стимулирует поверхностную миграцию атомов металла и, в конечном счете, приводит к образованию пленок с высокими физическими и электрическими параметрами. Кроме того, только под действием потока энергетических частиц можно получать пленки с различной кристаллической структурой. Эффект ионной бомбардировки зависит от плотности потока ионов Γ_i и их энергии E_i . Используя формулу для плотности потока ионов: $\Gamma_i = 0,6 \ln_i \sqrt{kT_e / M_i}$ при $T_e = 3$ эВ и концентрации ионов аргона $n_{\text{Ar}^+} = 6 \cdot 10^{11}$ см⁻³, получаем $\Gamma_{\text{Ar}^+} = 2,4 \cdot 10^{16}$ см⁻² с. Для ионов меди $n_{\text{Cu}^+} = 8 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и $\Gamma_{\text{Cu}^+} = 8 \cdot 10^{15}$ см⁻² с. В исследуемом разряде как Γ_i , так и E_i могут независимо друг от друга варьироваться в широком диапазоне параметров при изменении мощности и давления разряда, тока электромагнита и расстояния до подложки. На расстоянии 20 см от среза магнетрона поток нейтральных атомов

меди $\Gamma_{Cu} = 0,25 (n_{Cu})v_{Cu} = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}$, т.е. степень ионизации потока металла $\beta = \Gamma_{Cu+} / (\Gamma_{Cu+} + \Gamma_{Cu}) = 0,65$. Данным потокам соответствует скорость осаждения 110 нм/мин. В разряде аргона при давлении 5 мТор и мощности магнетрона 3 кВт (средняя плотность мощности 24 Вт/см²) скорость осаждения меди на подложку, расположенную на расстоянии 20 см от мишени, составила 120 нм/мин, что хорошо согласуется с расчетным значением.

Проведенные эксперименты показали, что магнетронный разряд с полым катодом позволяет получать при давлениях в несколько миллиторр концентрацию плазмы более 10^{11} см^{-3} на расстоянии в десятки сантиметров от магнетрона. Высокая концентрация плазмы, создаваемая в большом объеме, увеличивает вероятность ионизации распыленных атомов мишени. Поток ионов мишени, управляемый электрическим полем слоя перед подложкой, дает возможность осаждать пленки на структурах сложной формы с хорошей конформностью. Величина, однородность, степень ионизации потока плазмы могут контролироваться соответствующим выбором мощности, давления, величины и конфигурации магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 08-08-00455).

Литература

1. Ionized physical-vapor deposition using a hollow-cathode magnetron source for advanced metallization // *E.Klawuhn, G.C.D' Couto, K.A.Ashtiani et al.* // *J.Vac.Sci.Technol.* – 2000. – A18(4). – P. 1546–1549.
2. *Vyas V., Kushner M.J.* Scaling of hollow cathode magnetrons for ionized metal physical vapor deposition // *J. Vac.Sci.Technol.* – 2006. – A24. – P. 1955–1969.
3. *Anders A.* Metal plasmas for the fabrication of nanostructures // *J.Phys.D:Appl.Phys.* – 2007. – Vol.40. – P. 2272–2284.
4. *Mausbach M.* Parametrization of the Laframboise theory of cylindrical Langmuir probe analysis // *J.Vac.Sci.Technol.* – 1997. – A15(6). – P. 2923–2929.
5. *Thornton J.A.* The microstructure of sputter-deposited coatings // *J.Vac.Sci.Technol.* – 1986. – Vol. 4A, 16. – P. 3059–3065.

Статья поступила
2 марта 2009 г.

Царьгородцев Юрий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики МГУЛ. *Область научных интересов:* физика плазмы, автоматизация сбора и обработки информации.

Полуэктов Николай Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры физики МГУЛ. *Область научных интересов:* физика плазмы и ее применение в технологии микроэлектроники. **E-mail:** poluekt@mgul.ac.ru

Харченко Виктор Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой физики МГУЛ. *Область научных интересов:* физика плазмы, теплофизика.

Камышов Игорь Алексеевич – инженер кафедры физики МГУЛ. *Область научных интересов:* физика плазмы, конструирование электронной аппаратуры.

Усатов Игорь Игоревич – студент-дипломник МИЭМ. *Область научных интересов:* физика плазмы, автоматизация сбора и обработки информации.