

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО ТИПА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Введение

Благодаря преимуществам перед другими методами метод магнетронного распыления находит все более широкое применение для получения покрытий с повышенными механическими свойствами. Одним из перспективных направлений развития методов магнетронного распыления является несбалансированное магнетронное распыление [1].

В обычном или сбалансированном магнетроне разряд с высокой концентрацией частиц ограничивается в области мишени. Пленки, нанесенные на подложки расположенные в пределах этой области, подвергаются одновременной ионной бомбардировке, что может сильно влиять на структурно-фазовые свойства растущей пленки. Если подложка установлена за пределами этой области, она подвергается воздействию области низкой плазменной плотности плазмы, а потока ионов, бомбардирующих подложку (обычно $<1 \text{ мА/см}^2$), чаще всего недостаточно для модификации структуры пленки [2].

В несбалансированных магнетронных распылительных системах (НМРС) плазма полностью не ограничена примыкающей областью и может распространяться до подложки. В данном случае из плазмы могут извлекаться ионные токи значительной плотности ($>2 \text{ мА/см}^2$) даже без внешнего смещения подложки [3]. Возможность интенсивной низкоэнергетичной ионной бомбардировки растущей пленки в сочетании с высокими скоростями осаждения предопределяет большую перспективность метода несбалансированного магнетронного распыления для ионно-стимулированного формирования пленок, особенно для слоев с повышенными трибологическими характеристиками.

Целью данной работы являлось проведение сопоставительного анализа характеристик потоков энергетичных частиц различных вариантов магнетронов с целью определения оптимальных конфигураций МРС для требуемых условий осаждения.

Эксперимент

Проведены исследования характеристик четырех конфигураций планарных магнетронных распылительных систем с диаметром мишени 80 мм (рис. 1). Во всех случаях конфигурация магнитного поля на поверхности мишени формировалась магнитной системой на постоянных магнитах. В случае сбалансированной МРС (рис. 1,а) практически все линии магнитной ловушки замкнуты между полюсными наконечниками. В прикатодной области существует широкая область сильного магнитного поля, силовые линии которого почти параллельны распыляемой мишени. Для создания несбалансированной конфигурации магнитного поля на поверхности мишени магнитное поле бокового полюсного наконечника усиливалось относительно центрального полюса путем увеличения объема магнитов (НМРС) (рис. 1,б). В этом случае незамкнутые линии магнитного поля с периферии катода направлены к подложке. В МРС с дополнительным соленоидом основная магнитная система формирует на поверхности мишени поле сбалансированной конфигурации. Дополнительный соленоид используется для изменения распределения магнитного поля в области мишень – подложка. В зависимости от направления магнитного поля дополнительного соленоида МРС с дополнительным соленоидом может работать в двух режимах – первого и второго типа. При работе МРС в режиме первого типа (рис. 1,в) направление магнитного поля дополнительного соленоида B_c совпадает с направлением поля на оси МРС. В данном случае центральный полюс магнитной системы усилен относительно внешнего полюса и незамкнутые линии магнитного поля с центрального полюсного наконечника направлены к стенкам камеры. При этом значительно устраняется вертикальная составляющая магнитного поля, что дает низкую плотность плазмы в области подложки.

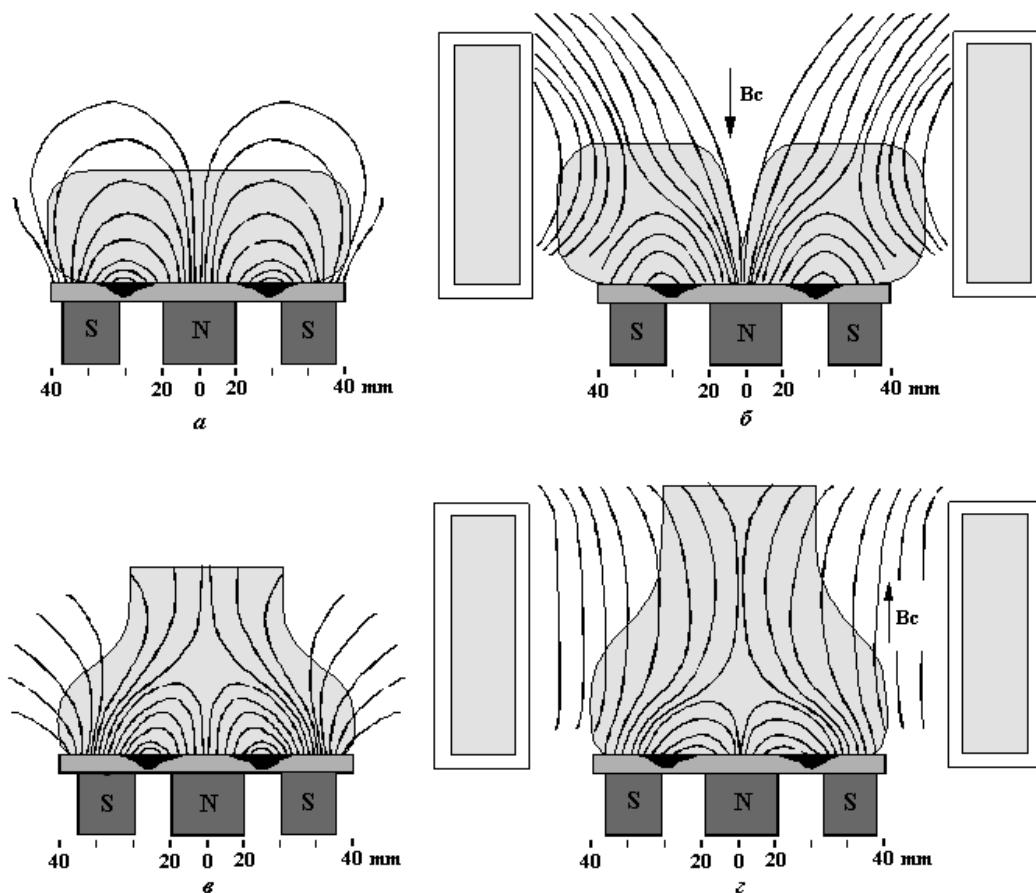


Рис. 1. Типы конфигураций МРС: а – сбалансированный магнетрон (МРС); б – несбалансированный магнетрон (НМРС); в, г – магнетрон с дополнительным соленоидом при прямом и обратном включении соленоида.

В режиме второго типа (рис.1, г) направление B_c совпадает с направлением поля внешнего магнитопровода магнетрона. Увеличение индукции магнитного поля внешних магнитов приводит к формированию несбалансированной конфигурации магнитного поля с протяженной зоной в области мишень – подложка, где силовые линии перпендикулярны поверхности мишени МРС. В данном случае из плазмы могут извлекаться ионные токи значительной плотности даже без внешнего смещения подложки.

Схема экспериментальной установки для исследования характеристик МРС приведена на рис. 2. В качестве мишеней магнетронов использовались диски из Ti и графита. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па, и в камеру подавался аргон до рабочего давления 0,08 – 1,0 Па. Расход рабочего газа, подаваемого в камеру, контролировался с помощью автоматического регулятора расхода газа РРГ-1. Для питания МРС использовался источник мощностью 3,0 кВт с возможностью работы в режимах стабилизации тока или мощности. Подложка площадью 30 см² устанавливалась на расстоянии 5,0 – 15,0 см от поверхности мишени и изолировалась от остальных деталей конструкции.

Ионный и электронный ток подложки определялся путем снятия вольт-амперной характеристики подложки. Для этого миллиамперметр включался последовательно с блоком питания смещения подложки. На подложку подавалось как положительное, так и отрицательное смещение путем изменения полярности подключения. Типичная вольт-амперная характеристика подложки представлена на рис. 3. Как видно, ВАХ подложки имеет области насыщения тока как в положительной, так и в отрицательной области напряжений смещения. При отсутствии тока (подложка электрически изолирована от других деталей конструкции) на подложке возникает небольшой отрицательный плавающий потенциал порядка 15–30 В (напряжение самосмещения). Подача на подложку положительного напряжения приводит к резкому увеличению отрицательного тока за счет вытягивания электронов из разряда. Для измерения суммарного ионного тока подложки создавалось смещение U_s , достаточное для отсекания потока электронов на подложку. Как видно из рис. 3, при его снижении отрицательный ток уменьшается и меняет полярность. При увеличении U_s в разных случаях до $-40 \div -90$ В наступает

насыщение положительного тока подложки, то есть дальнейшее увеличение отрицательного напряжения смещения не приводит к значительному изменению тока. Ток, измеренный в режиме насыщения, согласно [4] и является суммарным током ионного пучка. Распределение плотности ионного тока пучка НМРС измерялось с помощью точечного зонда. Для отсекаания потока электронов на зонд подавалось отрицательное смещение. Потенциал плазмы измерялся ленгмюровским зондом.

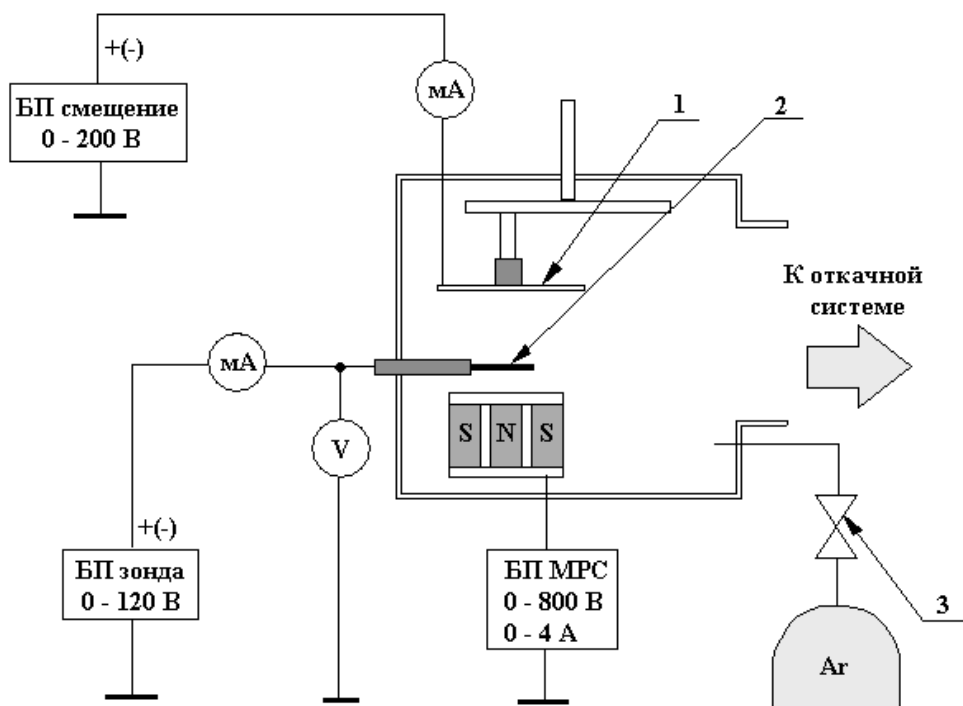


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик МРС: 1 – подложка; 2 – зонд; 3 – регулятор расхода газа.

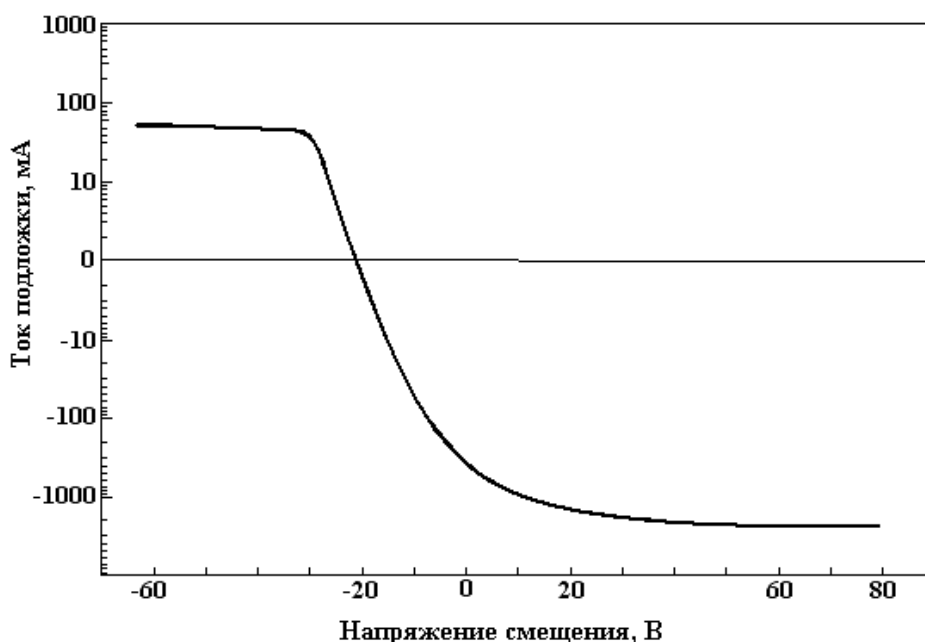


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика подложки.

Результаты и обсуждение

Проведены исследования особенностей построения магнитных систем НМРС. На рис. 4,а представлено распределение вертикальной составляющей магнитного поля B_{\perp} над поверхностью мишени при индукции магнитного поля центрального полюсного наконечника 0,13 Тл, бокового 0,027 Тл. При этом напряженность горизонтальной составляющей магнитного поля B_{\parallel} в разрядной

области достигала 0,065 Тл. В данной конфигурации практически все линии магнитного поля над поверхностью мишени замкнуты между полюсными наконечниками магнитной системы. В прикаточной области существует широкая область сильного магнитного поля, силовые линии которого почти параллельны распыляемой мишени, что позволяет добиться высокой эффективности ловушки.

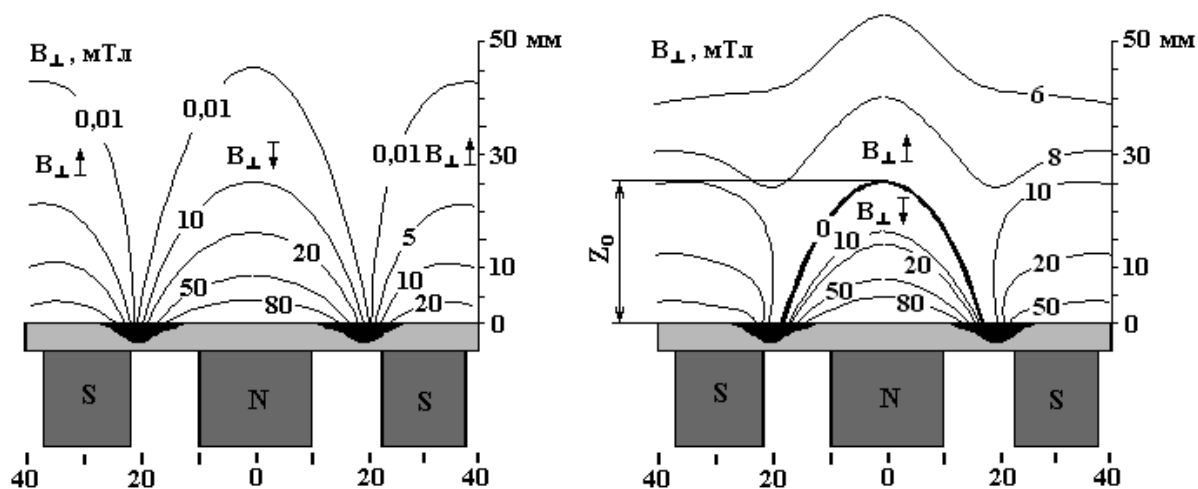


Рис. 4. Распределение вертикальной составляющей индукции магнитного поля B_{\perp} над поверхностью мишени при сбалансированной (а), несбалансированной (б) конфигурации магнитного поля МРС.

Увеличение объема боковых магнитов приводило к искривлению формы магнитной ловушки и возникновению “незамкнутых” силовых линий магнитного поля. Кроме того, в данном случае отмечено значительное изменение распределения вертикальной составляющей магнитного поля B_{\perp} над поверхностью мишени. На рис. 4, б показано распределение вертикальной составляющей магнитного поля B_{\perp} над поверхностью мишени при увеличении индукции магнитного поля бокового полюсного наконечника до 0,07 Тл ($B_{\pm} = 0,091$ Тл). Увеличение магнитного поля боковых магнитов приводило к увеличению B_{\perp} в области бокового полюсного наконечника и возникновению на оси МРС области с противоположным направлением магнитного поля. Магнетроны, имеющие подобное распределение магнитного поля, относятся к НМРС второго типа. Распределение B_{\perp} на оси магнетронов имело непосредственную связь со степенью несбалансированности устройства и, как следствие, во многом определяло характеристики несбалансированных магнетронов.

В случае МРС с дополнительным соленоидом управление распределением B_{\perp} на оси устройства достигается изменением тока соленоида (рис. 5). Как видно, при отсутствии I_c (сбалансированная МРС) B_{\perp} на оси магнетрона экспоненциально уменьшается практически до нуля с увеличением расстояния от мишени. Дополнительное поле соленоида приводит к возникновению на оси МРС зоны с противоположным направлением B_{\perp} . Причем за счет изменения тока соленоида периферийное магнитное поле обеспечивает изменяемую интенсивность B_{\perp} на оси МРС. Следует отметить, что поле дополнительного соленоида практически не влияло на форму магнитной ловушки МРС.

Проведены исследования по влиянию параметров разряда различных конфигураций МРС на ток подложки. Установлено, что для всех конфигураций ионный ток подложки I_s был прямо пропорционален току разряда I_r и пропорционально уменьшается с увеличением давления и расстояния мишень – подложка, то есть

$$I_s = m I_r, \quad (1)$$

где m – коэффициент, зависящий от давления, расстояния мишень – подложка и материала мишени. На рис. 6 представлена зависимость суммарного ионного тока подложки I_s от тока разряда несбалансированной МРС при различном расстоянии мишень – подложка. Суммарный ток подложки НМРС достигал 160 мА при токе разряда МРС 3,0 А и расстоянии мишень – подложка 7,0 см, тогда как при работе МРС со сбалансированной конфигурацией магнитного поля не превышал 35 мА при тех же условиях.

В случае МРС с дополнительным соленоидом суммарный ионный ток подложки также зависел от тока соленоида и направления магнитного поля, создаваемого дополнительным соленоидом. При работе МРС в режиме первого типа даже незначительное увеличение тока соленоида приводило к уменьшению ионного тока подложки в 2–2,5 раза (рис. 7).

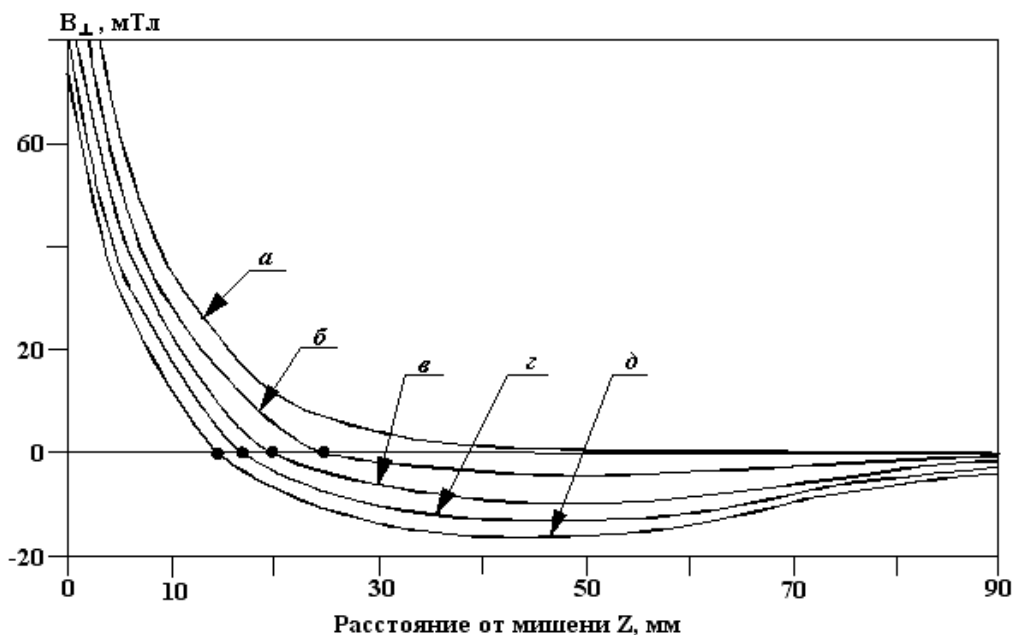


Рис. 5. Распределение B_{\perp} на оси МРС с дополнительным соленоидом при различном токе соленоида: $I_c = 0,0$ А (а); $I_c = 0,3$ А (б); $I_c = 0,6$ А (в); $I_c = 0,9$ А (г); $I_c = 1,2$ А (д).

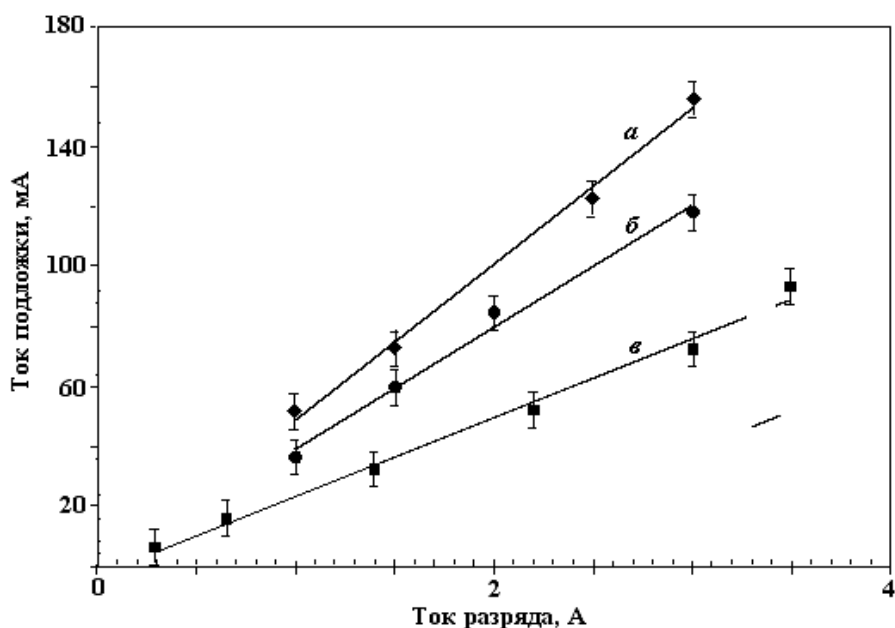


Рис. 6. Зависимость суммарного ионного тока подложки от тока разряда НМРС при различном расстоянии мишень – подложка: а – 7,0 см; б – 9,0 см; в – 12,0 см.

Зависимость суммарного ионного тока подложки от тока соленоида для конфигурации второго типа представлена на рис. 8. Суммарный ионный ток МРС с дополнительным соленоидом был прямо пропорционален I_c . Максимальная плотность ионного тока достигала $25,0 \text{ мА/см}^2$ на оси магнетрона при токе разряда МРС $I_t = 2,0$ А и расстоянии мишень – подложка 7,5 см.

Эффективность различных конфигураций МРС хорошо иллюстрирует рис.9, на котором представлены зависимости плотности ионного тока на подложку от напряжения смещения при работе сбалансированной МРС, НМРС с усиленным боковым магнитным полем и МРС с дополнительным соленоидом в режимах первого и второго типа. Характеристики были получены при одинаковых условиях ($P = 0,1$ Па, $I_t = 0,8$ А, расстояние мишень – подложка $h = 8,0$ см). Как видно, плотность тока МРС с дополнительным соленоидом в режиме второго типа примерно на порядок величины превышает плотность тока обычной МРС и в три–четыре раза – несбалансированной МРС с усиленным боковым магнитным полем. Включение соленоида МРС в режиме первого типа позволило снизить плотность ионного тока подложки примерно в два раза.

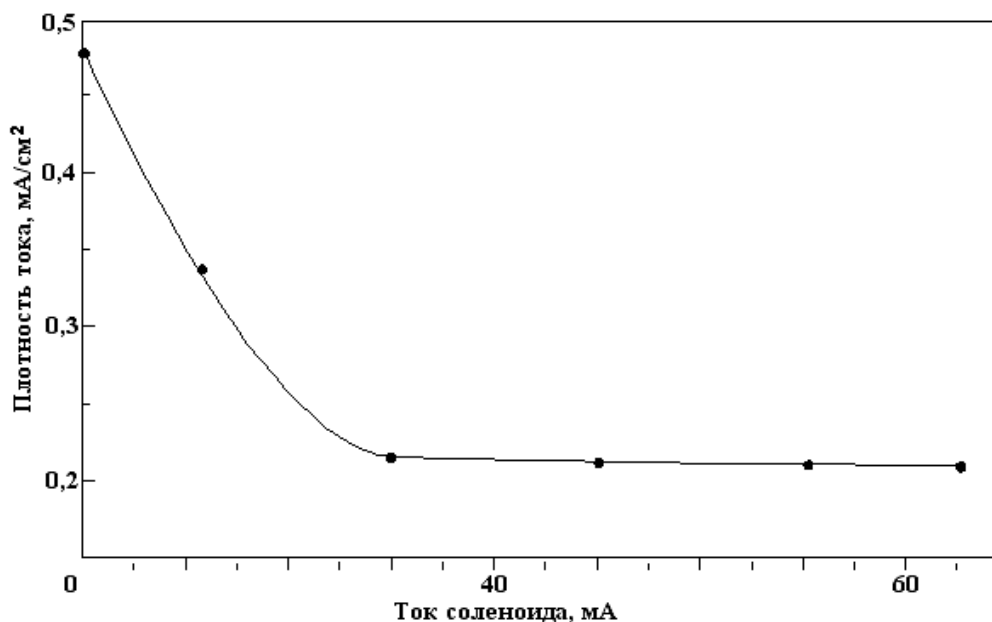


Рис. 7. Зависимость плотности ионного тока на оси МРС с дополнительным соленоидом в режиме первого типа от тока соленоида.

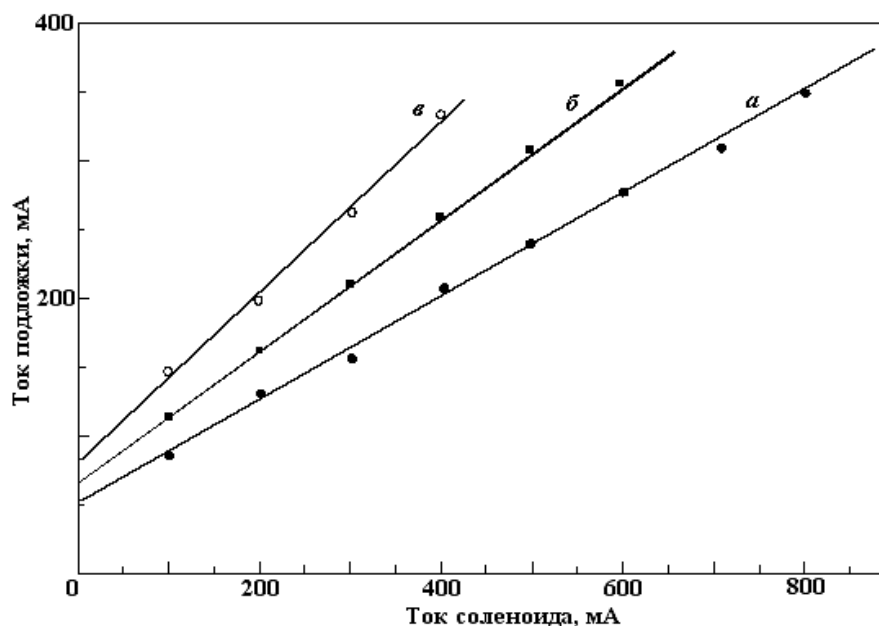


Рис. 8. Зависимость суммарного ионного тока подложки от тока соленоида при различном рабочем давлении, Па: а – 0,2; б – 0,08; в – 0,05.

Важной характеристикой ионного потока является энергия бомбардирующих подложку ионов. При магнетронном разряде средняя энергия ионов может быть оценена следующим выражением:

$$eU_i = e(U_b - V_{pl}), \quad (2)$$

где U_b – напряжение смещения подложки, V_{pl} – потенциал плазмы. Метод несбалансированного магнетронного распыления позволяет создавать значительные напряжения смещения подложки, однако при отсутствии тока (подложка электрически изолирована от других деталей конструкции) на подложке возникает небольшой отрицательный плавающий потенциал порядка 15–30 В, который позволяет осуществлять ионное стимулирование даже без внешнего смещения. Установлено, что для всех конфигураций МРС напряжение самосмещения практически не зависит от материала мишени, тока разряда и расстояния мишень – подложка. Зависимость напряжения самосмещения от рабочего давления представлена на рис. 10.

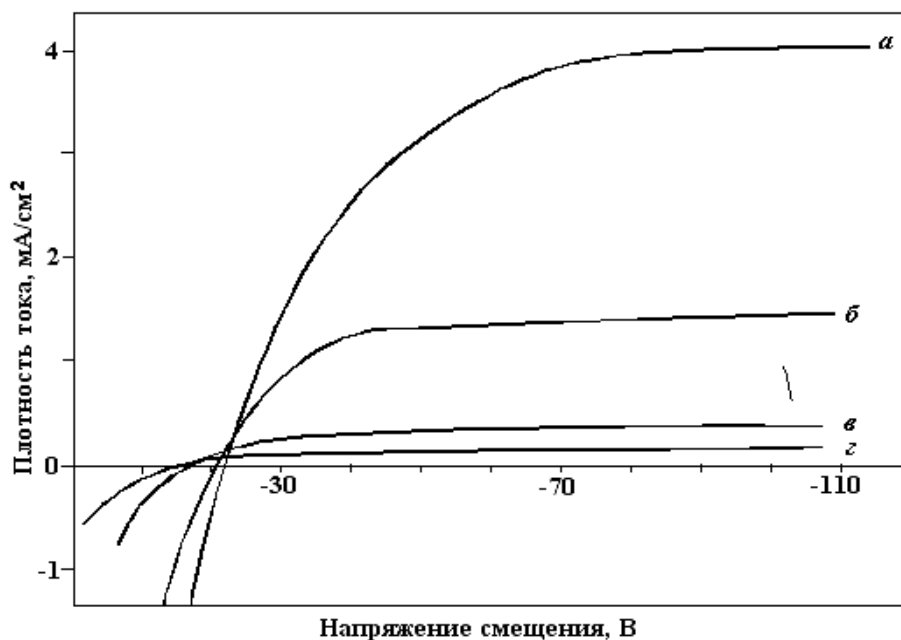


Рис. 9. Зависимость плотности ионного тока от напряжения смещения подложки: а – МРС с дополнительным соленоидом в режиме второго типа при $I_c = 600$ мА; б – несбалансированной МРС; в – сбалансированной МРС; г – МРС с дополнительным соленоидом в режиме первого типа.

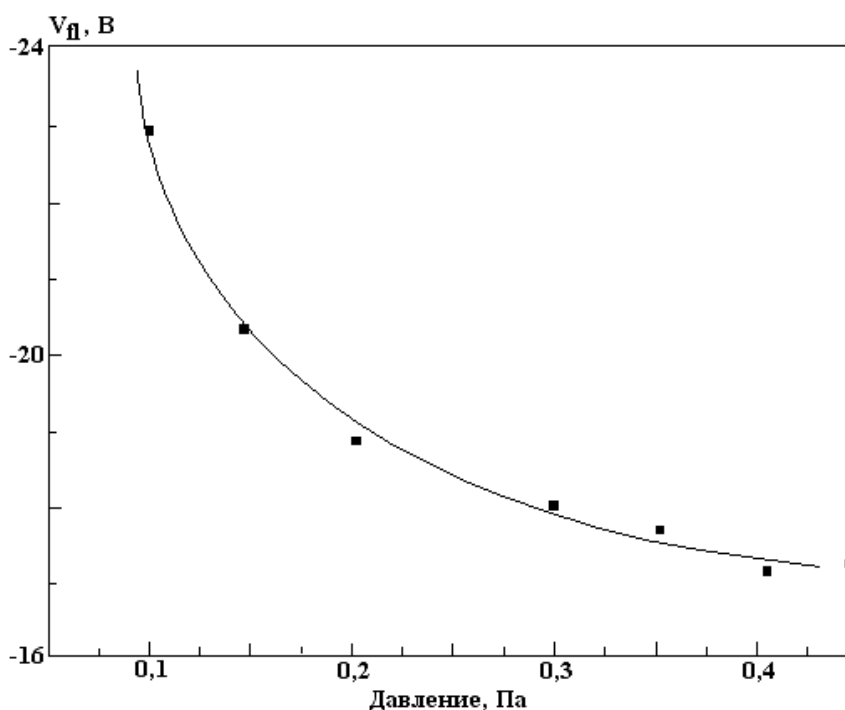


Рис. 10. Зависимость напряжения самосмещения от рабочего давления.

В случае МРС с дополнительным соленоидом напряжения смещения подложки зависело от тока соленоида и направления создаваемого им магнитного поля. При работе в режиме первого типа даже незначительное увеличение тока соленоида приводило к резкому уменьшению отрицательного потенциала самосмещения подложки и электронного тока (рис. 11). Данное поведение можно объяснить отклонением потока электронов от области подложки расходящимся к стенкам камеры магнитным полем, что дает низкую плотность плазмы в области подложки. Установлено, что размещение подложки за зоной расходящегося электронного потока позволяет снизить в несколько раз уровень ионной и электронной бомбардировки поверхности растущей пленки даже по сравнению со сбалансированной конфигурацией МРС, то есть в данном случае происходит минимизация энергетического воздействия в процессе роста пленки. Данный режим работы МРС может найти широкое применение

в микроэлектронике для осаждения свободных от дефектов пленок и покрытий с управляемой и воспроизводимой пористостью.

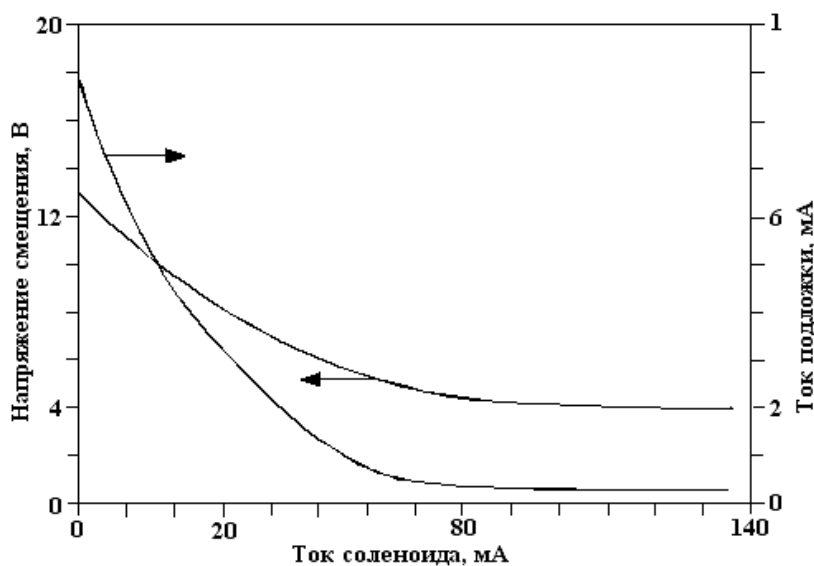


Рис. 11. Зависимость напряжения самосмещения и отрицательного тока подложки от тока соленоида при работе несбалансированной МРС в конфигурации первого типа.

В режиме второго типа напряжение самосмещения подложки практически линейно увеличилось при увеличении тока дополнительного соленоида до некоторого максимума. Дальнейшее увеличение тока соленоида приводило к снижению V_{pl} . В общем случае напряжение самосмещения подложки изменялось от -13 до -32 В. На рис. 12 представлена зависимость напряжения смещения подложки от тока соленоида при различном давлении и токе разряда МРС $I_t = 2,5$ А. Следует отметить, что при уменьшении давления разряд существовал в более узкой области значений тока соленоида.

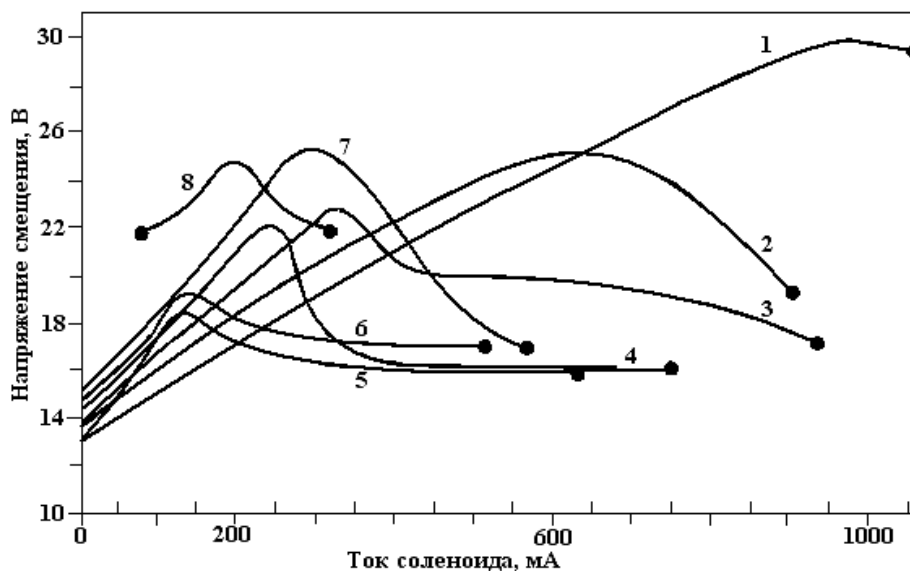


Рис. 12. Зависимость напряжения самосмещения подложки от тока соленоида при различном рабочем давлении, Па:
 1 – 0,15; 2 – 0,13; 3 – 0,12; 4 – 0,11; 5 – 0,1; 6 – 0,08; 7 – 0,06; 8 – 0,04.

Потенциал плазмы был определен путем дифференцирования ВАХ ленгмюровского зонда. На рис. 13 показана зависимость потенциала плазмы V_{pl} и потенциала самосмещения V_{pl} от тока дополнительного соленоида при следующих режимах работы МРС: $I_t = 1,5$ А, $U_t = 550$ В, $P = 0,15$ Па. Установлено, что с увеличением тока соленоида происходит не только увеличение отрицательного самосмещения подложки, но и увеличение отрицательного потенциала плазмы. Потенциал плазмы практически не зависел от тока разряда и рабочего давления.

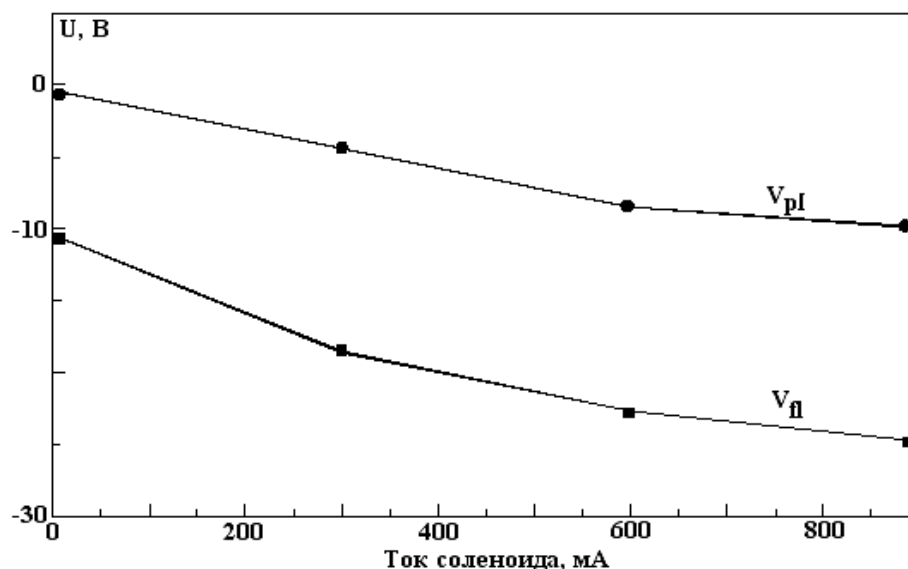


Рис. 13. Зависимость потенциала плазмы V_{pl} и потенциала самосмещения V_{fl} от тока дополнительного соленоида.

Заключение

Проведенные исследования особенностей построения магнитных систем МРС позволили установить, что несбалансированный режим работы может быть получен путем оптимизации конфигурации магнитного поля над поверхностью мишени магнетрона. Применение несбалансированной конфигурации магнитного поля МРС позволяет в несколько раз увеличить плотность ионного тока. Применение дополнительного соленоида позволяет достигать изменения конфигурации магнитных полей в области мишень–подложка практически без искажения основной магнитной ловушки, что в свою очередь позволяет независимо регулировать поток осаждаемого материала, плотность тока и энергию бомбардирующих ионов. Плотность ионного тока МРС с дополнительным соленоидом в режиме второго типа примерно на порядок величины превышает плотность тока сбалансированной МРС и в три–четыре раза – несбалансированной МРС с усиленным боковым магнитным полем. Максимальная плотность ионного тока МРС с дополнительным соленоидом в режиме второго типа достигала $25,0 \text{ mA/cm}^2$ на оси магнетрона при токе разряда МРС $I_t = 2,0 \text{ A}$ и расстоянии мишень – подложка $7,0 \text{ cm}$. Применение режима первого типа работы МРС с дополнительным соленоидом позволило значительно снизить уровень ионной и электронной бомбардировки подложки даже по сравнению со сбалансированной МРС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Достанко А.П., Бордусов С.В., Свадковский И.В. и др. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т. 2 / Под общ. ред. А.П. Достанко. Минск, 2001.
2. Kelly P.J., Arnell R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
3. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. Developing and investigation of unbalanced magnetron sputtering system // III International Conference Plasma physics and plasma technology: Contributed papers, Minsk, Belarus, September 18–22, 2000. Vol. 2. P. 716–719.
4. Lipschultz B., Hutchinson I., LaBombard B., Wan A. Electric probe in plasmas // J. Vac. Sci. Technol. 1986. Vol. 4. № 3. P. 1810–1816.

Поступила 27.05.2002

Summary

The results of comparative analysis of four configurations of planar magnetron sputtering systems characteristics are introduced. The studies of features of constructing of magnet systems of a magnetrons unbalanced type are carried out. The regularities of influencing of discharge characteristics on parameters of energetic particles fluxes on a substrate are established.