

ГЕНЕРАТОР МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧАЕМЫЙ КАТОДНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Г.В. Потемкин¹⁾, А.Е. Лигачев²⁾

¹⁾ НИИ Высоких напряжений, г. Томск, пр. Ленина 2а, 419158, remnev@hvd.tpu.ru

²⁾ Центр естественно-научных исследований ИОФ им. А.М. Прохорова РАН,
г. Москва, ул. Вавилова 38, к.П2, aeligachev@tochka.ru

Приведены результаты исследований генерации газометаллической плазмы с плотностью $n_e \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$, получаемой с помощью распыления стержневых электродов плазмой разряда низкого давления. Рассмотрены вопросы получения потоков атомов рабочего вещества под действием разряда низкого давления и постиионизации нейтральных частиц. Газометаллическая плазма использовалась для формирования смешанных пучков ионов, применяемых в технологии.

Введение

Для формирования слоевых наноструктур и переходных зон на поверхности твердого тела представляет интерес получение многоэлементных ионных пучков. Одним из подобных примеров является а) подготовка поверхности конструкционных материалов под осаждение защитных покрытий и б) ионно-лучевая обработка деталей машин и приборов с целью изменения их служебных характеристик. Обычно синхронное введение нескольких примесей в исходный материал производится несколькими ионными пучками от разных источников ионов, например, газового источника и источника ионов твердофазного вещества.

Возможен иной путь, когда смешанный ионный пучок с определенным соотношением заряженных компонент, получают в одном источнике. Ионный источник такого типа, как правило, легко переводится из смешанного пучка в газовый простым изменением режима работы. Для получения смешанного пучка определяющее значение имеют два фактора:

1. Пучок однозарядных ионов должен содержать только необходимые ионы с заданной энергией, определенным энергетическим разбросом и расходимостью. В пучке не должны содержаться вредные примеси в виде ионов другой зарядности, чтобы не имело место перекрытие «модифицированных» слоев по их толщине. В пучке не должны содержаться нейтралы, оказывающие деструктивное влияние на формирование зон с заданными свойствами.

2. В экономически эффективном ионном источнике цена иона твердофазного вещества должна быть ниже, чем получаемая от источника со встроенным нагревателем. Температура, плотность и химическая равновесие многокомпонентной плазмы должны обеспечивать устойчивое соотношение компонент в плазме для формирования стабильного пучка ионов.

Основная часть

По совокупности характеристик формируемого пучка, по-видимому, из наиболее приемлемых для использования в промышленности являются ионные источники (ИИ) с катодным распылением. Получаемая в них многокомпонентная плазма способна давать интенсивные смешанные пучки, содержащие газовые G^+ и металлические Me^+ ионы [1,4]. В источниках такого типа отсутствуют капельная фаза и плавающий зарядный состав

ионов. Способ создания многокомпонентной плазмы в этом случае заключается в том, что в газовую плазму разряда низкого давления вводится поток атомов твердофазного вещества. Экономически наиболее целесообразен процесс получения паров рабочего вещества путем введения в плазму с заданной плотностью n_e и температурой $T_e \geq E_i$ распыляемых зондов, где E_i - энергия ионизации атомов распыляемого вещества. Находящийся под определенным потенциалом по отношению к плазме зонд подвергается бомбардировке ионами, прошедшими область катодного падения. Процесс распыления поверхности зонда сопровождается интенсивным нагревом. В тепловыделяющем слое (ТВС) на поверхности зонда толщиной примерно равной R_p (R_p - проективный пробег иона с заданной энергией в веществе зонда) выделяется большая энергия, обусловленная торможением ускоренных ионов. Несколько процентов этой энергии идет на выбивание вторичных электронов и распыленных атомов. Основная часть выделяющейся в ТВС энергии преобразуется в теплоту, и в случае ограничения теплоотвода температура поверхности торца зонда, погруженного в плазму, может достигать $T_s \leq 2000 \text{ К}$. При этом в объем плазмы инжектируется два потока атомов твердофазного вещества, имеющих различную физическую природу: а) распыленные атомы с соответствующим распределением скоростей и максимумом при энергии в несколько эВ; б) сублимированные атомы с тепловыми скоростями.

В ограниченном объеме распылительной камеры и ионного источника при давлении ниже ($10^{-2} - 10^{-4}$) Тор могут быть ионизованы только атомы с тепловыми скоростями, т.е. незначительная часть распыленных атомов (менее 10 %) и основная - сублимированных. Потенциал, подаваемый на распыляемый электрод обычно несколько кВ, а коэффициент распыления используемых материалов составляет от нескольких единиц до нескольких десятков.

Эффективным способом увеличения концентрации атомов в плазме является установление температуры поверхности зонда близкой к температуре плавления, но не превосходящей ее. В этом случае многие представляющие интерес вещества можно получать сначала в виде потока сублимированных атомов, в свою очередь достаточных для получения концентрации атомов твердофазного вещества в плазме от 10^9 до 10^{12} атомов/см³. Кроме удержания параметров плаз-

мы определяющим фактором для получения стабильного соотношения заряженных компонент в ионном пучке является контролирование введения паров твердофазного вещества. Контроль и стабилизация температуры поверхности распыляемого электрода позволяет решить эту проблему путем регулирования теплоотода с поверхности зонда. В простейшем варианте такая система ввода паров рабочего вещества в плазму представляет собой вакуумно-плотный изолированный круглый стержень с регулируемым охлаждением дисциллятом и механически подвижной мишенью на торце стержня (рис.1).

Таким образом, достигается ступенчатое регулирование температуры. В качестве первого приближения положим, что поток сублимированных с поверхности нагретого зонда мишени для неравновесного процесса распыления, когда в слой толщиной несколько нанометров вкачивается энергия с объемной плотностью $p = \frac{jU}{R_p}$ (где j

– плотность бомбардирующей поверхность зонда ионов, U – разность потенциалов между плазмой и зондом) описывается уравнением Герца–

Кнудсена $j_N = \frac{\alpha P^*}{\sqrt{2\pi mRT_S}}$ (где m – масса

атома, P^* – давление насыщенного пара, α – коэффициент испарения, $R = \frac{R_0}{M}$, R_0 – универсальная газовая постоянная, M – молекулярный вес паров).

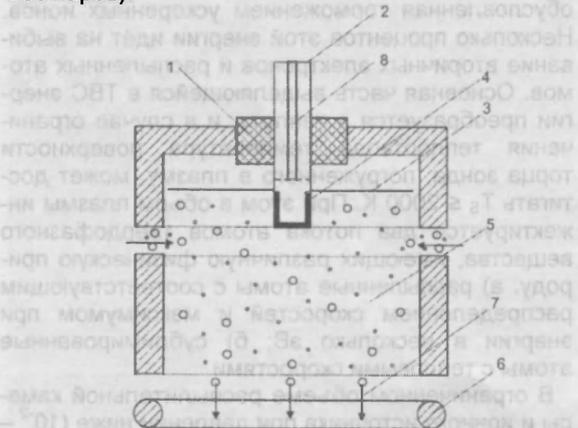


Рис. 1. Устройство распылительной камеры: 1 – изолятор; 2 – стержень; 3 – экран; 4 – ТВС; 5 – плазма; 6 – вытягивающий электрод; 7 – смешанный ионный пучок; 8 – канал охлаждения.

При $T_S \sim 1000^\circ\text{C}$ распыляемой поверхности зонда в условиях описанной геометрии легко достижимы давления паров многих представляющих интерес материалов (Ti, Cu, Co, Fe, Zr и т.д.) которые имеют величины более, чем 10^{-4} Тор. Поэтому реализуется вариант, когда в объеме камеры концентрация сублимированных атомов будет существенно выше распыленных, а соотношение компонент Me^+ и G^+ будет зависеть от эффективности ионизации атомов металла. Вклад в ионизированную часть потока распыленных атомов может дать лишь компонента с про-

долным импульсом $P_{a\parallel} \gg P_{a\perp}$, поскольку последние оседают на стенках камеры, здесь $P_{a\parallel}$ – импульс атома параллельный оси цилиндрической камеры, и, соответственно, $P_{a\perp}$ – перпендикулярный.

Величина потерь атомов твердофазного вещества, влияющая на конечную концентрацию атомов в объеме камеры, зависит от эффективности конструктивных решений и, в принципе, позволяет достичь концентрации до 10^{13} ат/см³.

Поскольку потенциал ионизации многих металлов не превышает 8 эВ, то плазма с температурой электронов ~ 8 эВ вполне способна ионизовать значительное число атомов. При этом время ионизации τ_{ii} должно быть меньше времени пролета атомов через камеру, т.е.

$$\tau_{ii} = \frac{l}{n_e \cdot \langle \sigma_{ge} \rangle} < \frac{a}{v_a}, \text{ где } a - \text{характерный}$$

размер цилиндрической камеры, v_a – скорость атома, $\langle \sigma_{ge} \rangle$ – среднее значение произведения сечения ионизации на скорость электронов.

Эффективная ионизация атомов вещества мишени может быть обеспечена либо выбором соответствующей конфигурации магнитного поля, задающей спиральные траектории плазменных электронов [3], либо инжекцией пучка высокоэнергетичных электронов в объем плазмы [5]. В биполярном режиме работы источника ускоряющий электрод одновременно является коллектором ионов, и поэтому в плазму открытого разряда цилиндрической распылительной камеры инжектируются выбитые из ускоряющего электрода вторичные электроны с энергией, определяемой приложенным к нему потенциалом. В этом случае ионизация атомов металла ведется двумя группами электронов: максвелловскими электронами плазмы и высокоэнергетичными электронами, обусловленными инжекцией ускоренных электронов.

Заключение

Многокомпонентная плазма, получаемая с помощью распыления мишеней с контролируемой температурой, позволили получить смешанные пучки ионов типа $\text{T}_1^+ / \text{N}^+ + \text{N}_2^+$ в соотношении 1:1 при энергии заряженных частиц (30 – 40) кэВ на установке типа биполярного диода с плазменным анодом [5].

Цилиндрическая камера с внешним магнитным полем, с соответствующей конфигурацией позволяла получать смешанные ионные пучки типа $\text{Fe}^+ / \text{N}^+ + \text{N}_2^+$ в соотношении 1:3 на установке и униполярным пучком [3] при энергии частиц 30 кэВ и полном токе ~ 5 мА.

Список литературы

1. Жаринов А.В., Саночкин О.В. Физика плазмы. – 1983. – том 9. – № 2. – 397 с.
2. Владимиров В.В., Габович М.Д., Проценко И.М., Порицкий В.Я., Ткаченко Л.Н. Физика плазмы. – 1981.-том 7. – № 1. – 205 с.
3. Потемкин Г.В., Калмыков В.Ф. // ПТЭ. – 2001. –№ 4. – 150 с.

4. Потемкин Г.В., Лигачев А.Е. // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия», сб. докладов, МАТИ РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М., 2004, 264 с.
5. Лигачев А.Е., Потемкин Г.В. Известия вузов: Физика. – 2006. - том 8. - 72 с.

6. Бакшт Ф.Г., Юрьев В.Г. // ЖТФ. – 1978. - том 49. - №5. - 905 с.
7. Жаглинский А.Г., Кучинский В.В. Массоперенос при воздействии плазмы с поверхностью. – Энергоатомиздат. - М., 1991. - 201 с.

GENERATOR OF MULTI-COMPONENT PLASMA WITH CATHODE SPUTTERING

G. V. Potemkin, A. E. Ligachev

In order to generate multi-element ion beams applied at the creation of complicated nanostructures the multi-component plasma is required. Such plasma consisted of singly ions of gas and metal can be obtained by the sputtering of rod-probe surface in the low-pressure discharge. The flux of the rod working substance vapor at the temperatures lower than melting temperature consists of sputtered atoms with the corresponding speed distribution and sublimated with Maxwell distribution. The particles possessing thermal velocities give the main input into the ionized part of substance atoms in the plasma. The input of the sputtered atoms to the total concentration of the metal atoms in the plasma volume at such temperatures is not high. The rod temperature and its stability play the determining role in the considered version of the vapor introduction of the solid-phase substance into the gas plasma. The step control of the rod temperature allows monitoring the metal atom flux value and changing the metal ion content in plasma. Such a method of metal vapor introduction is remarkable by its high efficiency, i.e. by a significantly lower energy-cost of metal ions in comparison with the ion sources with the furnace.

The energy spectrum of electron and their losses at the chamber walls play a significant role at the generation of plasma with the high content of metal ions. In the diode with plasma anode operating in the bipolar mode the electrons knocked out by the accelerated ions and obtaining high-energy in the accelerating gap are injected into the open discharge. In this case the energy spectrum in the plasma volume of the chamber without magnetic field does not have significant differences from the discharge one what leads to the increase of metal ion part. In the homo-polar operation mode of the setup containing the ion source with magnetic field of a complicated configuration in the plasma volume of the chamber the electron losses at its walls are reduced due to the creation of spiral propagation paths of the plasma electrons.

For the diode with the plasma anode and bipolar operation mode the stationary beam with 5-mA current at 30-keV energy and the correlation of titanium/nitrogen charged components as 1:1 was obtained. At the setup with the homo-polar beam for 3 mA current and 30 keV energy the correlation of iron/nitrogen ions was 1:3.

