

6. Алфёров Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А. Устойчивость горения вакуумной дуги постоянного тока в осесимметричном магнитном поле//Прикладная физика. 2001. № 4. С. 27—34.

7. Прозоров Е. Ф., Ульянов К. Н., Федоров В. А. Экспериментальное изучение влияния неоднородного осесимметричного поля на обрыв тока вакуумного дугового разряда//ТВТ. 2003. Т. 42. № 6. С. 850—855.

8. Алфёров Д. Ф., Гостицев В. Г., Иванов В. П. и др. Вакуумный выключатель тока: Пат. 2230385. РФ; БИ. № 16, 2004.

9. Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A. Characteristics of DC vacuum arc in the transverse axially symmetric magnetic field//IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V. 31. No. 5. P. 918—922.

10. Алфёров Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А. Вакуумная дуга постоянного тока в аксиально-симметричном неоднородном магнитном поле//ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 349—361.

11. Алфёров Д. Ф., Евсин Д. В., Лондер Я. И. Нарушение устойчивости электрической дуги при разведении контактов в вакуумном промежутке с поперечным магнитным полем//Прикладная физика. 2006. № 1. С. 29—36.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2008 г.

Quenching of an electric arc in a vacuum gap with an uniform transverse magnetic field

D. F. Alferov, M. R. Ahmetgareev, D. B. Yevsin, V. P. Ivanov
FGUP VEI, Moscow, Russia
E-mail: alferov@vei.ru

The experimental study of breaking ability of vacuum interrupter (VI) with the uniform transverse magnetic field formed by system of permanent magnets is carried out. The VI switched off DC current up to 150 A in a range of a magnetic field induction 100—180 mT with shunting capacitor 0,5 μ F in parallel with VI. The breaking ability of VI in a range of magnetic field induction 120—160 mT has been increased up to 300 A by introduction of non-uniform magnetic field near contact surface.

PACS: 52.50.-b, 52.80.Vp

УДК 621.793.74

Характеристики плазмы магнетронного разряда на больших расстояниях от катода

В. Н. Пашенцев
Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия
E-mail: pashentsev2001@mail.ru

Измерены параметры плазмы магнетрона на больших расстояниях, в несколько раз превышающих диаметр катода. Зондовым методом измерены температура и плотность плазмы, составляющие 1,4 эВ и $6 \cdot 10^{10}$ см⁻³, соответственно. Получены зависимости плотности и температуры плазмы от потока аргона при нанесении покрытия TiAlN. Получена очистка подложки ионным распылением перед нанесением покрытия при напряжении смещения на подложке более 200 В.

PACS: 52.25.-b, 52.70.Ds, 52.77.Dq, 81.15.Cd

Введение

Широкие возможности для нанесения покрытий имеют вакуумные установки, содержащие дуговые испарители и распылительные магнетронные источники [1]. Плазменные источники используются для нанесения покрытий на поверхности обрабатываемого инструмента и различные

детали для улучшения их характеристик: повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, снижения коэффициента трения [2].

В установках для нанесения покрытий плазменные источники располагают по периметру цилиндрической вакуумной камеры, внутри которой расположен карусельно-планетарный механизм вращения деталей.

Вакуумная камера может оснащаться устройствами предварительной обработки поверхности: нагревателем и ионным источником. Они предназначены для получения покрытий с высокой адгезией. Тепловое излучение нагревателя увеличивает температуру обрабатываемых деталей в целях удаления паров воды и загрязнений. Ионный источник очищает поверхность пучком ионов аргона с энергией частиц в единицы килоэлектронвольт. Поток падающих ионов распыляет поверхностный слой обрабатываемых деталей.

Состав покрытий зависит от функционального назначения обрабатываемых деталей. Для получения наноструктурных покрытий с различными свойствами применяют многокомпонентные (TiAlN, TiCN, TiBN, TiSiN, MoC) [3] и многослойные покрытия (TiN—CrN), у которых слои различного состава чередуются. Катод магнетрона может состоять из чистого металла (Ti, Al, W, Ni) или быть многокомпонентным (TiAl, CuW).

В качестве рабочих газов используют аргон и реакционные газы N_2 , CH_4 , C_2H_2 , служащие для получения пленок нитридов и карбидов металлов.

В магнетронных источниках [4] область разряда находится вблизи катода на расстоянии 4—5 см, поэтому подложка тоже должна находиться около катода, чтобы ионный ток был достаточно большим. Однако на небольших расстояниях от катода обрабатываемая область не превышает размеры катода, и подложка может нагреваться до высокой температуры.

Если обрабатываемые детали выполнены из материалов с низкой температурой плавления (полиэтилен, лавсан) или обрабатывающий инструмент изменяет свои свойства при высокой температуре (снижение твердости сверл и фрез), то их необходимо удалить от магнетрона на большее расстояние. При этом увеличивается площадь ионной обработки. Однако из-за расширения плазмы магнетрона будет снижаться плотность плазмы и усиливаться процесс перезарядки ионов на атомах аргона до того, как они достигнут подложки.

В работе были исследованы параметры плазмы магнетронного источника на больших расстояниях от катода, в несколько раз превышающих диаметр катода, для получения защитных покрытий TiN, TiAlN.

Магнетронный распылительный источник и диагностика плазмы

Магнетронный источник несбалансированного типа (рис. 1) состоит из катода 1 диаметром 10 см, кольцевого 2 и цилиндрического 3 постоянных магнитов NdFeB, магнитной катушки 4 для разба-

ланса магнитного поля. По трубкам 5 циркулирует вода для прямого охлаждения катода. Анодом 6 являются стенки вакуумной камеры. Подвижный экран 7 (шторка) закрывает подложку 8 от магнетрона во время предварительной очистки катода магнетрона от загрязнений и диэлектрических пленок перед нанесением покрытий на подложку. Катод магнетрона был выполнен из Ti или TiAl в соотношении компонентов 1:1. Расстояние от катода магнетрона до подложки изменялось в пределах 12—28 мм. Предельный вакуум составлял $1,2 \cdot 10^{-5}$ Торр.

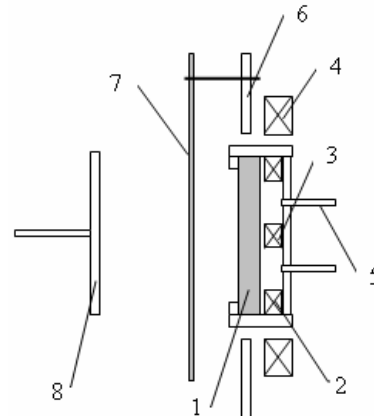


Рис. 1. Схема магнетронного распылительного источника

Постоянные магниты образуют арочное магнитное поле вблизи катода. Плазменные электроны осуществляют азимутальный дрейф в скрещенных электрических и магнитных полях, вызывая ионизацию атомов аргона вблизи катодной поверхности. Диаметр плазменного кольца у катода составлял 50 мм. Ионы, ускоренные электрическим полем, выбивают из катодной поверхности атомы металла, которые ионизируются в плазме и в виде ионов и атомов падают на подложку.

В несбалансированном магнетроне арочное поле, определяющее азимутальный дрейф электронов, создается постоянными магнитами, а аксиальное магнитное поле, силовые линии которого направлены к подложке, создается магнитной катушкой. В результате сложения полей более сильное поле формируется не в центре катода, а на периферии. При этом некоторая часть силовых линий будет направлена в сторону подложки, а не к постоянному магниту в центре катода. Часть электронов, вращающихся вокруг силовых линий магнитного поля, будет дрейфовать в сторону подложки, вызывая дополнительную ионизацию плазмы вблизи подложки. В результате область плазмы расширяется от катода к подложке, вызывая увеличение тока ионов на подложку и, соответственно, скорость осаждения покрытий.

Для измерения температуры и плотности плазмы использовался ленгмюровский зонд. Он состоял из проволоки диаметром 1,2 мм, выступающей

из керамической трубки на расстояние 6,5 мм. Электронная температура T определялась методом вольт-амперных характеристик (ВАХ) зонда (рис. 2, а). Температуру рассчитывали на основе тангенса угла наклона, полученного из зависимости логарифма тока от напряжения на зонде. Для расчета плотности плазмы использовали значение тока насыщения зонда.

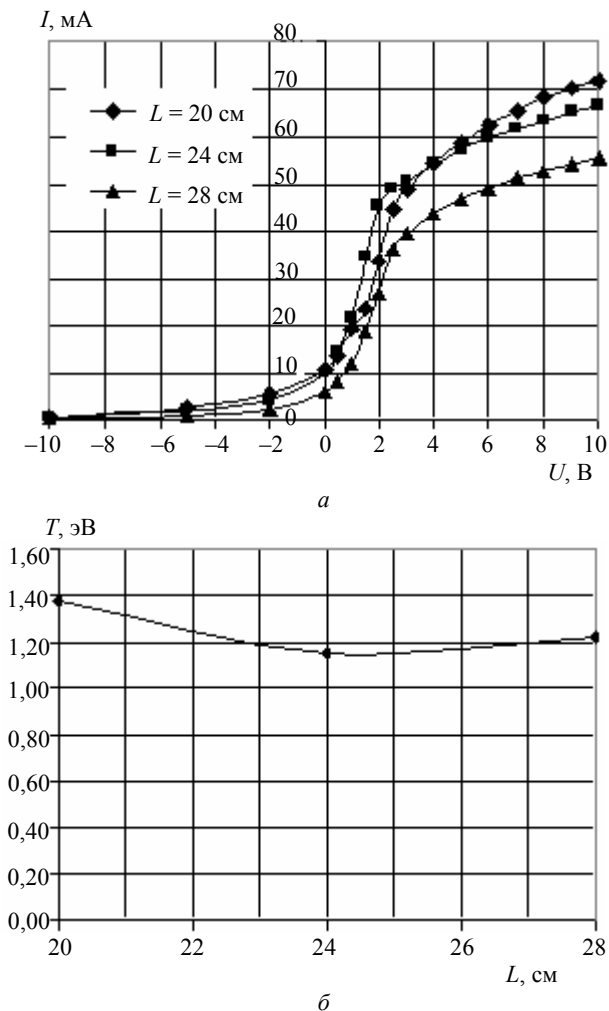


Рис. 2. ВАХ (а) и температура плазмы (б), измеренные лэнгмюровским зондом на различных расстояниях от катода

Поперечные сечения плазменного потока на различных расстояниях от катода измеряли по отпечаткам на пластинах из нержавеющей стали. Измерялся диаметр покрытия TiN золотистого цвета. Этот метод измерения диаметра отпечатка дублировался методом ионной очистки той же самой металлической пластины до появления на поверхности яркого металлического цвета. Поверхность очищали путем ионной бомбардировки поверхности ионами аргона и титана при напряжении смещения на подложке в сотни вольт. Радиус круглого поперечного сечения плазмы в зависимости от расстояния до катода показан на рис. 3. Размер отпечатка значительно увеличивается на расстоянии 20 см от катода.

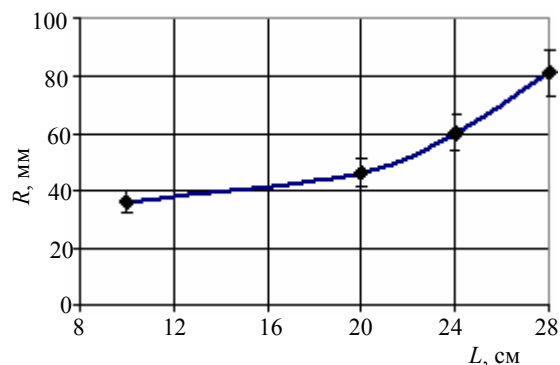


Рис. 3. Радиус поперечного сечения отпечатка на подложке

Толщину покрытия измеряли методом взвешивания тонкой стальной пластины до и после нанесения покрытия. Погрешность измерения веса составила $\pm 0,2$ мг. Разность весов с учетом распыленного слоя металла подложки в процессе предварительной ионной очистки использовалась для расчета толщины TiAlN покрытия. Площадь покрытия измеряли по размеру отпечатка на подложке. Плотность покрытия TiAlN составила $7,5$ г/см³. Толщина покрытия на расстоянии 20 мм от катода в течение 2 ч равнялась $1,7$ мкм при соответствующей скорости осаждения $0,23$ нм/с.

Результаты экспериментов

Покрyтия TiN или TiAlN наносили на пластины из нержавеющей стали. Процесс предварительной ионной очистки выполняли в два этапа: очистка катода магнетрона при закрытой шторке и очистка подложки при подаче на нее напряжения смещения.

Катодную поверхность очищали в течение 10 мин в результате распыления металлического катода ионами аргона. Поток аргона Q составлял 200 сссм, напряжение разряда 370 В, ток 4,3 А. Очистка катода необходима для исключения "отравления" его поверхности пленкой нитрида титана, которая снижает коэффициент распыления катода и, соответственно, скорость нанесения покрытий. Твердые пленки TiN или TiAlN на катодной поверхности удалялись в результате ионной бомбардировки. После ионной очистки катода шторка открывалась, и происходила очистка подложки в плазме магнетрона в течение 5 мин. Для этого на подложку подавали напряжение смещения 200 В. При энергии ионов в сотни электронвольт процесс распыления преобладает над процессом осаждения покрытия. Мощность магнетронного источника питания постоянного тока составляла 1,8 кВт. Подложку с образцами располагали на расстоянии 18—28 см от катода, напряжение смещения на подложке составляло 70 В. Нанесение нитридов металлов происходило в течение 2 ч при постоянном потоке Ar 200 сссм и

переменном потоке N_2 от 10 до 25 сссм. Давление в вакуумной камере составляло $1,4 \cdot 10^{-3}$ Торр. Цвет покрытия изменялся от темно-фиолетового до светло-серого при уменьшении потока азота от 20 до 5 сссм и неизменном потоке аргона 200 сссм. С помощью зондовых измерений были получены параметры плазмы на расстоянии 20 см от катода при нанесении покрытия TiAlN. Электронная температура составляла 1,4 эВ, плотность плазмы — $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

На больших расстояниях от магнетрона (20—28 см) температура плазменных электронов изменялась незначительно (см. рис. 2, б), средняя температура составляла 1,2 эВ. При такой относительно низкой электронной температуре плазма является слабоионизованной с большим содержанием атомов.

Зависимость плотности плазмы и температуры от потока аргона при постоянном потоке азота 20 сссм показана на рис. 4. Плотность плазмы увеличивается в два раза (см. рис. 4, а) при изменении температуры в диапазоне 1,5—1,7 эВ (см. рис. 4, б). Несмотря на то, что концентрация ионов возрастает, однако при большом потоке Ar усиливается процесс перезарядки и рассеяния ионов азота на атомах аргона до того, как они достигнут подложки.

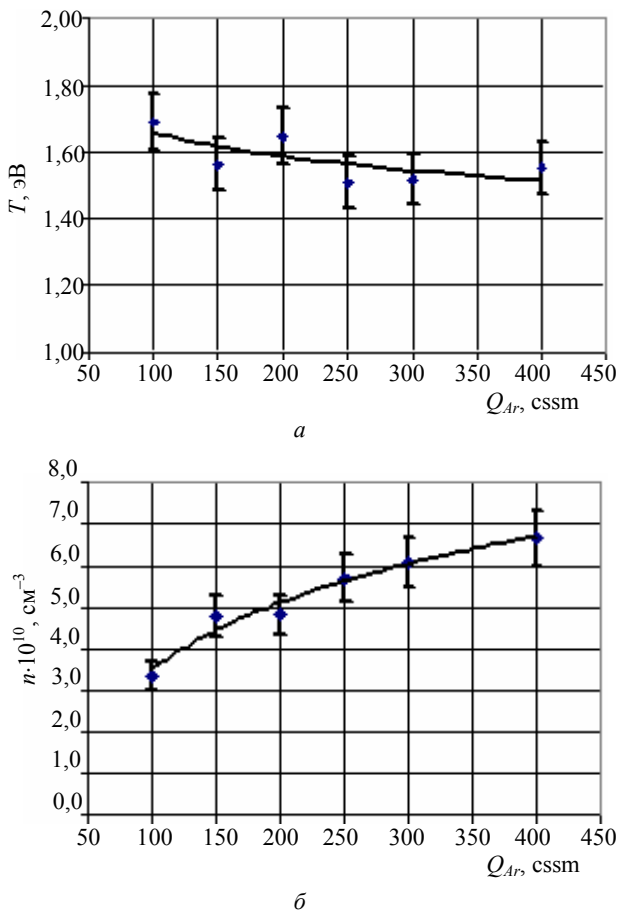


Рис. 4. Зависимость температуры (а) и плотности плазмы (б) от потока аргона

Для увеличения энергии ионов, падающих на подложку, к ней прикладывается отрицательное напряжение смещения. Это дает возможность получать пленки с большей плотностью и с высокой адгезией. Зависимость ионного тока от напряжения на подложке показана на рис. 5. Ионный ток увеличивается до тока насыщения 0,7 А при напряжении смещения 150 В.

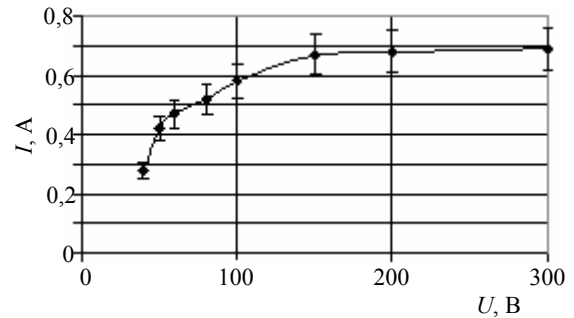


Рис. 5. Зависимость ионного тока на подложке от напряжения смещения

Область ВАХ делится на две части. При напряжении от 0 до 100 В преобладает процесс нанесения покрытия на подложку. Если энергия ионов превышает 200 эВ, то преобладает процесс распыления подложки, так как возрастает значение коэффициента распыления поверхности ионами аргона. Одновременно с ионной очисткой происходит нагрев подложки ионным током, мощность которого составляет ~150 Вт. В промежуточном диапазоне энергий ионов 100—200 эВ скорость напыления пленки низкая. Изменением напряжения смещения на подложке можно объединить два процесса: предварительную очистку подложки и нанесение покрытия. В этом случае перед магнетронным напылением не требуется использования специального ионного источника для очистки поверхности.

Заключение

Исследование характеристик разряда и параметров плазмы на расстояниях, в 2—3 раза превышающих диаметр катода, показали, что температура и концентрация плазмы составляют 1,2—1,6 эВ и $(3—7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Низкая электронная температура на больших расстояниях от магнетрона дает слабоионизованную плазму с низкой плотностью Ti^+ , N^+ ионов и большое содержание атомов и молекул. Сечение плазменного потока значительно увеличивается на расстоянии 20 см от катода. Цвет покрытия TiAlN зависит от потока азота. При увеличении потока реакционного газа цвет становится более насыщенным. При напряжении смещения на подложке до 100 В про-

исходит процесс напыления покрытия, при напряжении больше 200 В — очистка подложки от покрытий в результате ионного распыления поверхности. Регулированием напряжения смещения можно перед нанесением покрытия выполнить ионную очистку и нагрев подложки без использования в вакуумной камере дополнительного ионного источника и нагревателя.

Л и т е р а т у р а

1. Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. — М.: Высш. шк., 1988.
2. Mahan J. E. Physical vapor deposition of thin films. John Wiley & Sons, 2000.
3. Штанский Д. В., Кулинич С. А. и др. // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. Вып. 6. С. 1122.
4. Mitin V. S., Sharipov E. I., Mitin A. V. // Surface Engineering. 2006. V. 22. No. 1. P. 5.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2008 г.

Plasma characteristics of magnetron on long distance from cathode

V. N. Pashentsev

Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow, Russia

E-mail: pashentsev2001@mail.ru

Plasma characteristics of magnetron on long distance from cathode which a few times more than cathode diameter are measured. Plasma temperature and density are 1.4 eV and $6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ measured by plasma probe. Dependences of plasma temperature and density from argon flow in vacuum chamber in process of TiAlN coating are obtained. Substrate cleaning by ion sputtering before coating is obtained with substrate bias voltage more than 200 V.

PACS: 52.25.-b, 52.70.Ds, 52.77.Dq, 81.15.Cd

УДК 537.533.9: 661.681

Получение поликристаллического кремния из моносилана в электронно-пучковой плазме

В. О. Константинов, В. Г. Щукин, Р. Г. Шарафутдинов, В. М. Карстен

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

E-mail: molkin@itp.nsc.ru

Г. Г. Гартвич

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

О. И. Семенова

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований по осаждению кремния солнечного качества из моносилана с использованием электронно-пучковой плазмы. На лабораторном оборудовании достигнуты скорости осаждения кремния на уровне 40 г/ч при энергозатратах на процесс 78 (кВт·ч)/кг со степенью превращения моносилана около 50 %. Анализ химического состава показал, что полученный материал по уровню концентраций примесей соответствует кремнию солнечного качества. Предложенный метод является перспективным для промышленной реализации.

PACS: 41.75.-i, 52.50.Dg, 81.15.Jj

Введение

В 2007 г. произведено солнечных модулей с установленной мощностью 2826 МВт, что на 62 %

превышает уровень 2006 г., при этом 80 % таких модулей выпущено на пластинах из моно- и мультикристаллического кремния [1]. Такой бурный рост производства солнечных модулей привел к дефи-