

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ПОДЛОЖКУ ПУТЁМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В.О. Оскирко, А.Н. Захаров, А.П. Павлов, А.А. Соловьев, В.А. Семенов, А.С. Гренадёр

АННОТАЦИЯ

На примере использования трех металлических мишеней (Al, Ti, Cr), продемонстрирована возможность управления удельной энергией, передаваемой покрытию в процессе его роста за счёт изменения длительности и частоты импульсов питания при фиксированной средней мощности разряда, давлении рабочего газа и расстоянии от мишени до подложки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СИЛЬНОТОЧНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ, ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

CONTROLLING THE ENERGY IMPACT ON THE SUBSTRATE BY CHANGING THE PULSES PARAMETERS OF THE MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM POWER SUPPLY

V.O. Oskirko, A.N. Zakharov, A.P. Pavlov, A.A. Solovyev, V.A. Semenov, A.S. Grenadyorov

ABSTRACT

An electrical power supply circuit for a magnetron sputtering system is presented, which makes it possible to implement a pulsed combined mode of graphite sputtering. The formation of high power pulses occurs when the voltage on the discharge capacitor of the power supply reaches 600-700 V. Then a high-current magnetron discharge is formed, which, at a current of ~ 400–500 A transits into an arc stage of discharge with current of up to 3 kA. After that, a pulse of positive polarity is formed, accelerating carbon ions. The electric arc is a source of carbon ions, the energy of which is determined by the amplitude of the positive pulse.

KEYWORDS

HIPIMS, POWER SUPPLY

ВВЕДЕНИЕ

В процессах магнетронного нанесения тонкоплёночных покрытий важную роль играет энергия, поступающая на подложку. Эта энергия должна тщательно контролироваться для минимизации микронапряжений, для получения тонких плёнок высокой плотности с гладкой поверхностью, а также для предотвращения перегрева покрытия при использовании термочувствительных подложек [1].

Энергию на подложку приносят различные частицы: нейтралы, ионы, электроны и фотоны. Эта энергия может быть определена путем измерения каждой отдельной составляющей или непосредственного измерения калориметрическим методом полной энергии, приходящей на единицу площади подложки за определенное время и имеет

размерность $\text{Вт}/\text{см}^2$ [2,3]. Для сравнения условий осаждения и прогнозирования свойств напыляемых покрытий также используется такой параметр, как удельная энергия. Он показывает, какое количество энергии приходится на каждый осажденный атом или объем покрытия и имеет размерность $\text{эВ}/\text{атом}$ или $\text{МДж}/\text{см}^3$ [4].

Энергией, поступающей на подложку можно управлять путём изменения давления газа в вакуумной камере, а также использованием потенциала смещения подложки. При низкой мощности разряда увеличение давления газа приводит к росту удельной энергии [5]. При изменении потенциала смещения подложки изменяется плотность потока и энергия заряженных частиц, бомбардирующих подложку [6,7].

Другой способ регулирования потока энергии на подложку заключается в изменении параметров электропитания магнетронной распылительной системы (МРС). В докладе приведены результаты исследования влияния параметров импульсного электропитания разряда на поток энергии, поступающей на подложку в процессе сильноточного магнетронного распыления металлических мишеней.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1.а). Она включает в себя вакуумную камеру, систему откачки и подачи газа, дуальную МРС, источник питания магнетрона, а также систему измерения ионного тока и потока энергии на подложку. Дуальная МРС серии APEL-MR-75DU (ООО «Прикладная электроника», Россия) состоит из двух магнетронов M1 и M2 с замкнутой несбалансированной конфигурацией магнитного поля. В экспериментах использовались мишени диаметром 75 мм, изготовленные из алюминия, хрома и титана.

Электропитание дуальных магнетронов осуществлялось импульсным источником питания серии APEL-M-10HPP-1500, который подробно описан в [8]. Его особенностью является широкий диапазон регулирования частоты, длительности и амплитуды импульсов разрядного тока и напряжения. В экспериментах источник питания работал в униполярном импульсном режиме. Во время импульса подавалось отрицательное напряжение к мишени M1 относительно мишени M2. В результате распылялась мишень M1, выступающая в роли катода, а мишень M2 служила анодом.

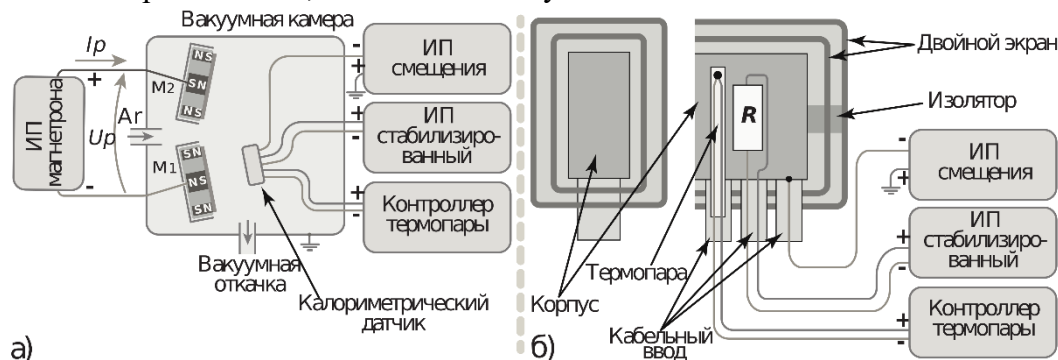


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), конструкция зонда (б)

Для измерения плотности ионного тока, скорости напыления и потока энергии на подложку использовался калориметрический датчик, конструкция которого приведена на рис. 1.б) Резистор 1 размещен в корпусе 2, в котором установлена термопара 3 к-типа с изолированным рабочим спаем. Резистор использовался для калибровки датчика.

Термопара с помощью кабеля 6 подключена к измерителю температуры. Корпус датчика окружен двойным экраном 5 из титановой фольги. Датчик устанавливался параллельно поверхности мишени на расстоянии 70 мм. Полный поток энергии на подложку рассчитывался по формуле:

$$E = \frac{C_p dT}{S_p dt},$$

где C_p - теплоёмкость датчика, S_p – рабочая поверхность датчика, dT – изменение температуры датчика за время dt . Значение C_p определялось калибровкой и составило значение $15,5 \pm 0,5$ Дж/°С.

Удельная энергия рассчитывалась по формуле:

$$E_y = \frac{E}{a},$$

где a – скорость роста покрытия

Для измерения ионного тока на подложку на датчик подавалось напряжение смещения -100 В.

Вакуумная камера откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па. После напуска аргона поддерживалось давление 0,15 Па. Источник питания МРС стабилизировал среднюю мощность разряда 1 кВт. Амплитуда импульсов разрядного тока во всех экспериментах составляла 50 А.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распыление металлических мишеней производилось в режиме постоянного тока (DC), а также в двух режимах HiPIMS с длительностью импульсов 50 и 5 мкс. Помимо длительности импульсов также менялась частота их повторения для поддержания средней мощности. В таблице приведены основные параметры рабочих режимов.

Таблица – Параметры режимов распыления мишеней из Al, Cr и Ti.

Параметр	Al			Cr			Ti		
	DC	HiPIMS		DC	HiPIMS		DC	HiPIMS	
Длительность импульса, мкс	-	50	5	-	50	5	-	50	5
Средний разрядный ток, А	2.0	1.4	0.6	2.3	1.7	0.7	2.2	1.6	0.7
Разрядное напряжение, В	487	705	1560	435	820	1520	460	615	1560
Частота импульсов, кГц	-	1.1	10.0	-	0.8	9.0	-	1.3	10.5
Коэффициент заполнения импульсов, %	100	4	4.5	100	4	4.5	100	4	4.5

Для всех мишеней средняя плотность ионного тока на подложку в HiPIMS режимах при длительности импульсов разрядного тока 50 мкс была примерно такой же, как в DC режиме - $1.25 \div 1.75$ mA/cm². При длительности 5 мкс её значения существенно выше и для алюминия средняя плотность ионного тока на подложку составляет 2.5 mA/cm², а для титана и хрома достигает 2.75 mA/cm².

На рис.2 приведены результаты измерений средней плотности ионного тока на подложку, скорости роста покрытия, а также значения полной и удельной энергии для трёх режимов магнетронного распыления.

В HiPIMS режимах скорость нанесения покрытия для всех рассматриваемых материалов примерно в 3 раза ниже, чем в DC.

Длительность импульсов практически не оказывает влияние на скорость нанесения Al. Для Ti скорость нанесения при использовании длинных импульсов 50 мкс примерно на 30% ниже, чем при использовании импульсов 5 мкс. Для мишени из Cr обратная тенденция и при использовании длинных импульсов скорость нанесения покрытия примерно на 25% выше, чем при использовании коротких импульсов. Скорости нанесения Cr и Al сопоставимы, как в DC, так и в HiPIMS режимах. Скорость напыления Ti примерно вдвое ниже при использовании импульсов длительностью 50 мкс.

Полный поток энергии на подложку имеет примерно одинаковую величину во всех случаях.

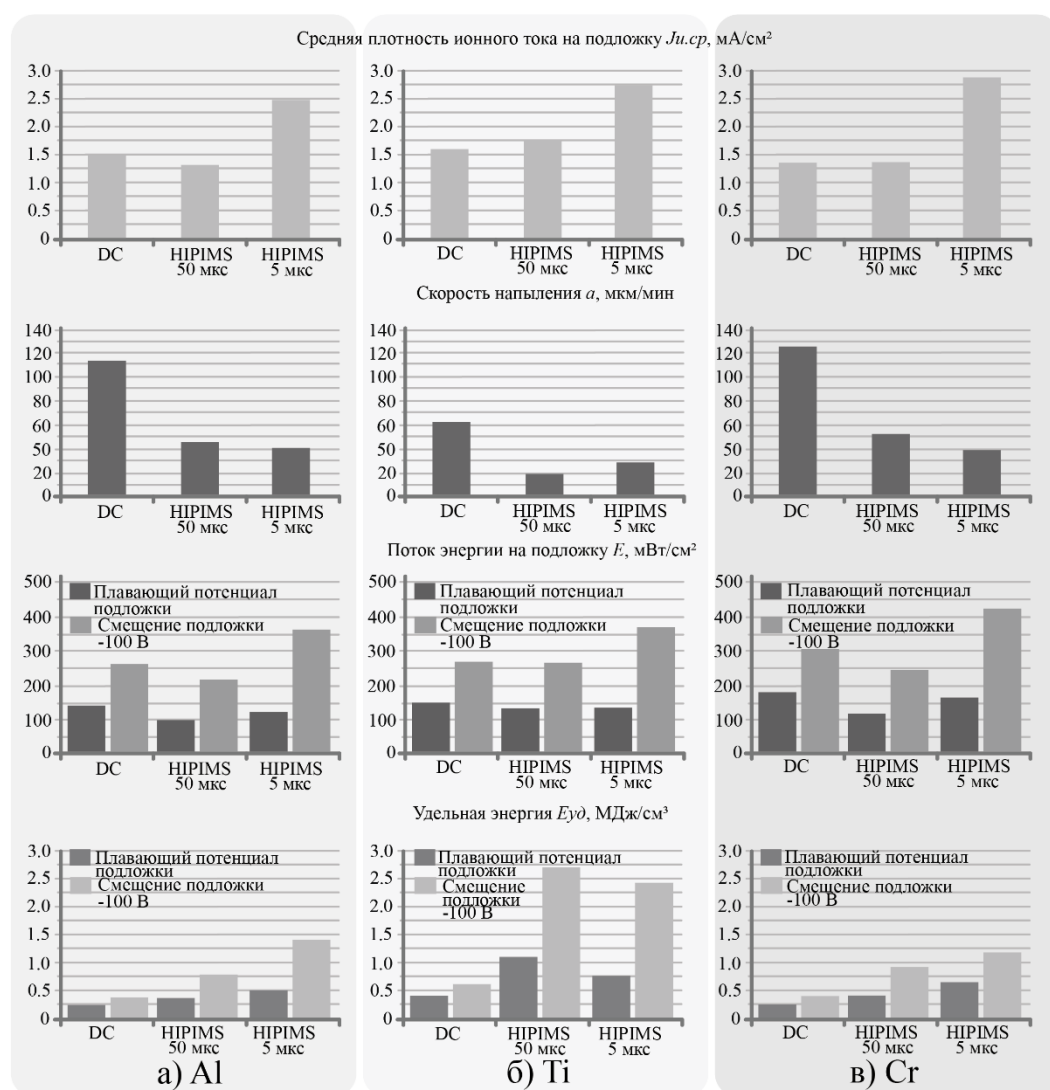


Рис.2. Сравнение режимов распыления металлических мишеней

В режиме DC обеспечивается более высокий поток энергии на плавающую подложку по сравнению с HiPIMS режимами. Поток энергии на смещённую (-100 В) подложку при длительности импульсов 50 мкс остается ниже, чем в DC режиме. При

короткой длительности 5 мкс полный поток энергии на подложку под смещением выше для всех мишеней, чем в DC режиме.

Для всех материалов удельная энергия в HiPIMS режимах оказывается выше, чем в DC режиме, как в случае с плавающей подложкой, так и при подаче на неё смещения -100 В. Удельная энергия увеличивается при сокращении длительности импульсов в случае Al и Cr мишеней. При распылении Ti мишени импульсами длительностью 50 мкс эта энергия выше, чем при распылении импульсами длительностью 5 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение параметров импульсов разрядного тока приводит к существенному изменению количества энергии, сообщаемой покрытию в процессе магнетронного распыления мишеней из Al, Ti и Cr.

Средняя плотность ионного тока на подложку слабо изменяется при изменении типа распыляемого материала и увеличивается при уменьшении длительности импульсов.

Также от материала мишени слабо зависит полный поток энергии на плавающую подложку. Для всех металлов наибольшее его значение наблюдается в DC режиме. В HiPIMS режиме при длительности импульсов 5 мкс полный поток энергии на смещённую (-100 В) подложку становится выше, чем в DC за счёт роста средней плотности ионного тока.

В сильноточных режимах все виды покрытий (Al, Ti, Cr) получают гораздо больше удельной энергии, чем в режиме распыления на постоянном токе. Основной причиной этого является пониженная скорость напыления в режимах HiPIMS. Удельная энергия, получаемая покрытием в случае Ti мишени выше, чем при распылении Al и Cr мишеней. Это объясняется меньшей скоростью распыления Ti.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН (№. FWRM-2021-0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. R.Wendt, K. Ellmer, and K. Wiesemann, Thermal power at a substrate during ZnO:Al thin film deposition in a planar magnetron sputtering system, *Journal of Applied Physics*, 82 (1997) 2115-2122
2. H. Kersten, D. Rohdes, J. Berndt, H. Deutsch, R. Hippler, Investigations on the energy influx at plasma processes by means of a simple thermal probe, *Thin Solid Films*, 585 (2000) 377–378
3. D.J. Ball, Plasma diagnostics and energy transport of a dc discharge used for sputtering, *Journal of Applied Physics*, 43, (7) (1972) 3047-3057
4. Petrov, F. Adibi, J. Greene, L. Hultman and J. Sundgren, Average energy deposited per atom: A universal parameter for describing ion-assisted film growth, *J. Appl. Phys. Lett.* 63, (36) (1993), 36-38
5. S. Ekpe, S. Dew, Investigation of thermal flux to the substrate during sputter deposition of aluminum, *Journal of Vacuum Science & Technology*, A20, (6) (2002) 1877-1885
6. H. Kersten, H. Deutsch, H. Steffen, G. Kroesen, R. Hippler, The energy balance at substrate surfaces during plasma processing, *Vacuum*, 63, (3) (2001) 385-431

7. H. Kersten, H. Steffen, D. Vender, H. Wagner, On the ion energy transfer to the substrate during titanium deposition in a hollow cathode arc discharge, *Vacuum* 46, (3) (1995) 305-308
8. V. Oskirko, A. Zakharov, V. Semenov, P. Pavlov, A. Grenadyorov, S. Rabotkin, A. Solovyev, (2022), Short-pulse high-power dual magnetron sputtering, *Vacuum*, 200, (2) (2022) 111026

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оскирко Владимир Олегович – кандидат технических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-5167-0133). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: oskirko@gmail.com, технический директор ООО «Прикладная электроника».

Захаров Александр Николаевич – кандидат технических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0002-1068-6160). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: zare17@yandex.ru.

Павлов Артем Павлович – инженер (ORCID: 0000-0002-4018-7098). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: APELTom@yandex.ru, директор ООО «Прикладная электроника».

Соловьев Андрей Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-7775-9769). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: andrewsol@mail.ru.

Семенов Вячеслав Аркадьевич – инженер (ORCID: 0000-0001-5089-7096). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: semenofvjacheslav@gmail.com.

Гренадёрв Александр Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-6013-0200). Институт сильноточной электроники, г. Томск Томской обл. e-mail: 1711saaha@mail.ru.