

DEPENDENCE OF ENERGY FLUX ON THE SUBSTRATE ON THE DURATION OF DISCHARGE CURRENT PULSES AND BIAS POTENTIAL IN THE PROCESS OF HIGH POWER IMPULSE MAGNETRON SPUTTERING OF COPPER

Vladimir Olegovich Oskirko^{1, 2a}, *Alexander Nikolaevich Zakharov*¹,
Alexander Sergeevich Grenadyorov^{1, 2}, *Vyacheslav Arkadievich Semenov*^{1, 2},
*Andrey Aleksandrovich Solovyev*¹

¹ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskii pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² ООО "Applied Electronics", Akademicheskii pr. 15, 634055, Tomsk, Russia

^a oskirkovo@gmail.com

ABSTRACT

This work focuses on the measurement of the energy impact on the substrate during high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) of copper. Reducing the duration of the current pulses from 100 to 8 μ s, with amplitude of 150 A and an average discharge power of 1 kW, results in a 50% increase in the energy flow to the substrate at floating potential. At the same time, the specific energy delivered per unit volume of the deposited coating is 2–3 times higher than in the DC mode. Increasing the substrate bias potential leads to an almost linear increase in the energy flux to the substrate. The paper discusses the reasons for the increase in the energy flow to the substrate and the specific energy delivered to the coating. The possibility of controlling the energy flow to the substrate by adjusting the duration, frequency and amplitude of discharge current pulses in the HiPIMS process is demonstrated.

KEYWORDS

Magnetron sputtering; HiPIMS; energy flow on substrate; specific energy.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НА ПОДЛОЖКУ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ РАЗРЯДНОГО ТОКА И ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МЕДИ ИМПУЛЬСАМИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Владимир Олегович Оскирко^{1, 2a}, *Александр Николаевич Захаров*¹,
Александр Сергеевич Гренадеров^{1, 2}, *Вячеслав Аркадьевич Семенов*^{1, 2},
*Андрей Александрович Соловьев*¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

² ООО «Прикладная Электроника», Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 15

^a oskirkovo@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена измерению энергетического воздействия на подложку в процессе сильноточного импульсного магнетронного распыления (HiPIMS) меди. Уменьшение длительности импульсов тока от 100 до 8 мкс при амплитуде 150 А и средней мощности разряда 1 кВт приводит к увеличению на 50% потока энергии на подложку, находящуюся под плавающим потенциалом. При этом удельная энергия, сообщаемая единице объема осаждаемого покрытия, в 2–3 раза выше, чем в режиме постоянного тока. Увеличение потенциала смещения подложки приводит к практически линейному росту потока энергии на подложку. В работе рассматриваются причины увеличения потока энергии на подложку и удельной энергии, сообщаемой покрытию. Продемонстрирована возможность управления энергией, поступающей на подложку, путем регулирования длительности, частоты и амплитуды импульсов разрядного тока в процессе HiPIMS.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Магнетронное распыление; HiPIMS; поток энергии на подложку; удельная энергия.

Введение

Магнетронное распыление на протяжении многих лет используется для получения тонких пленок. Важной особенностью магнетронного распыления является более высокая, по сравнению с термическим испарением, кинетическая энергия частиц, образующих покрытие [1]. Конденсируемые частицы передают подложке свою энергию, что благоприятно влияет на свойства осаждаемых покрытий [2–4]. Помимо пленкообразующих нейтральных частиц, энергию на подложку приносят ионы, электроны и фотоны из плазмы. Для того чтобы добиться нужных характеристик покрытия, необходимо регулировать и контролировать поток энергии на подложку в процессе магнетронного распыления [5]. Управлять энергией, поступающей на подложку, можно путем изменения давления газа, расстояния от мишени до подложки, напряжения смещения, средней мощности разряда и т.д. В импульсных режимах магнетронного распыления также важную роль играет продолжительность и частота импульсов [6–9]. В среднечастотных (10–350 кГц) импульсных режимах магнетронного распыления (MF), как пра-

вило, обеспечивается более высокий поток энергии на подложку, по сравнению с режимом постоянного тока (DC). Поток энергии на подложку возрастает при увеличении частоты и уменьшении длительности импульсов [6–9].

Сильноточное импульсное магнетронное распыление (high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS) является модификацией импульсного магнетронного распыления, в которой применяются низкочастотные импульсы разрядного тока (10–10000 Гц) с низким коэффициентом заполнения (менее 10%). Низкий коэффициент заполнения в HiPIMS позволяет достичь высокой импульсной мощности разряда, при которой обеспечиваются более высокая степень ионизация распыленного материала и энергия конденсируемых частиц. Из-за эффекта возврата части ионов металла на мишень HiPIMS обладает более низкой скоростью нанесения, по сравнению с MF и DC режимами. Однако уменьшение скорости роста покрытия в совокупности с увеличением энергии осаждаемых частиц приводит к изменению энергетических условий формирования покрытия, что впоследствии сказыва-

ется на его свойствах [10, 11]. Кроме того, HiPIMS обладает широким набором и диапазоном изменения импульсных параметров, что является важным достоинством с точки зрения управления энергетическим воздействием на растущее покрытие.

Целью данной работы было установление зависимостей между параметрами импульсного электропитания и параметрами энергетического воздействия на подложку в процессе сильноточного импульсного магнетронного распыления. В частности, исследовано влияние длительности импульсов разрядного тока и потенциала смещения подложки на энергию, поступающую на подложку в процессе нанесения медных покрытий.

1. Методика и техника эксперимента

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Она включает в себя вакуумную камеру, системы вакуумной откачки и подачи газа, магнетрон, импульсный источник питания магнетрона (далее PPS) и зондовую систему измерения.

Магнетрон с медной мишенью диаметром 100 мм и площадью поверхности $S_i = 78,5 \text{ см}^2$ расположен на боковой стенке вакуумной камеры и имеет несбалансированную конфигурацию магнитного поля. Магнитное поле на поверхности мишени составляет 730 Гс, а коэффициент геометрической несбалансированности $K_G = 1,2$. В качестве анода использовались корпус магнетрона и стенки вакуумной камеры. Для электропитания магнетрона применялся PPS серии APEL-M-5HPP-1500 (ООО «Прикладная электроника», Россия) со средней выходной мощностью до 5 кВт. Источник питания обеспечивает широкий диапазон регулирования частоты F_p (0,1–15,0 кГц) и длительности t_p (5–250 мкс) импульсов. Максимальная амплитуда импульсов разрядного тока $I_{d,max}$ может достигать 200 А, максимальная ам-

плитуда импульсов разрядного напряжения $U_{d,max} = 1500 \text{ В}$.

С помощью датчиков тока и напряжения измерялся разрядный ток I_d , разрядное напряжение U_d , ток на зонд I_p и напряжение зонда U_p . Сигналы с датчиков записывались с помощью цифрового осциллографа и обрабатывались на компьютере. С помощью полученных осциллограмм производился расчет средней величины разрядного тока $I_{d,avg}$, мгновенной P_d и средней $P_{d,avg}$ мощности разряда по формулам (1–3):

$$I_{d,avg} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I_d(t) dt, \quad (1)$$

$$P_d(t) = I_d(t)U_d(t), \quad (2)$$

$$P_{d,avg} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} P_d(t) dt, \quad (3)$$

где $T_p = \frac{1}{F_p}$ – период повторения импульсов разрядного тока.

Зонд, конструкция которого изображена на рис. 1, б, использовался для измерения плотности ионного тока, скорости нанесения и потока энергии на подложку. Зонд изготовлен на основе резистора серии АН-25 (22 Ом). В корпус резистора встроена термопара К-типа с изолированным рабочим спаем. Термопара с помощью провода подключается к контроллеру температуры (temperature controller). Резистор подключается к источнику питания нагревателя (heater power supply). Рабочая поверхность зонда, контактирующая с плазмой, имеет площадь $S_p = 3,64 \text{ см}^2$. С других сторон резистор окружен двойным экраном из титановой фольги. Экраны крепятся к корпусу резистора с помощью керамических изоляторов. В процессе измерений рабочая поверхность зонда располагалась параллельно поверхности мишени на расстоянии 80 мм.

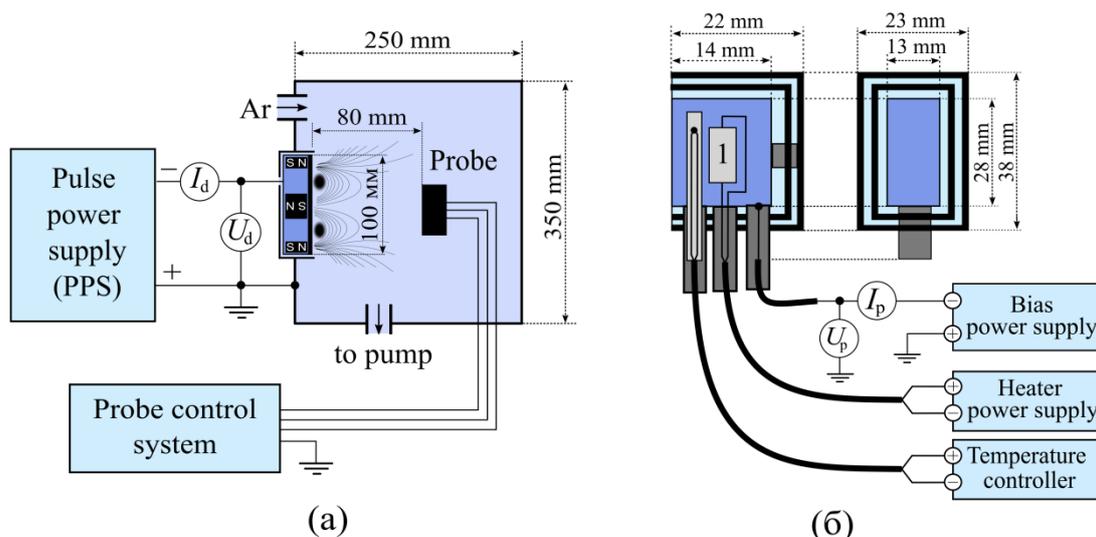


Рис. 1. Схема (а) экспериментальной установки и (б) зонда для измерения плотности ионного тока и потока энергии на подложку

Fig. 1. Schematic of (a) the experimental setup and (б) the probe for the measurement of ion current density and energy flux to the substrate

Для измерения ионного тока, протекающего на подложку, с помощью источника питания смещения (bias power supply) на корпус резистора относительно земли подавалось напряжение смещения U_p . Используя измеренное значение тока I_p на зонд, по формулам (4) и (5) рассчитывалась средняя плотность ионного тока $J_{i.avg}$ и поток положительных ионов Φ_{Me+Ar} на зонд:

$$J_{i.avg} = \frac{1}{T_p S} \int_0^{T_p} I_p dt, \quad (4)$$

$$\Phi_{Me+Ar} = J_{i.avg} e^{-1}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Скорость нанесения рассчитывалась исходя из толщины покрытий, осаждаемых в течение 10 мин. Стекланные образцы размером $10 \times 20 \times 2$ мм закреплялись на рабочей поверхности зонда, находящегося под плавающим потенциалом. Толщина пленок h измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 (ЛОМО, Россия). Исходя из толщины пленки и длительности процесса τ , рассчитывались скорость роста покрытия a_d

и поток металлических частиц на подложку по формулам (6) и (7):

$$a_d = \frac{h}{\tau}, \quad (6)$$

$$\Phi_{Me} = \frac{a_d}{M_a} \rho, \quad (7)$$

где ρ – плотность меди ($2,7$ г/см³), M_a – атомная масса меди ($4,48 \cdot 10^{-26}$ кг).

Для оценки энергетического воздействия, оказываемого на подложку в процессе нанесения покрытия, использовались два параметра. Первым является общий поток энергии на подложку (Total Energy Flux, E_{total}). Он показывает, какое количество энергии поступает на единицу площади поверхности подложки за определенное время и имеет размерность Вт/см² [1, 12–14]. Вторым параметром является удельная энергия, сообщаемая покрытию в процессе его роста (Normalized Energy Flux, E_{norm}). Он показывает, какое количество энергии приходится на каждый осажденный атом или объем покрытия, и имеет размерность эВ/атом или МДж/см³ [15, 16].

Определение E_{total} и E_{norm} производилось путем измерения температуры и теплоемкости зонда [1, 17–20]. Для определения теплоемкости через резистор в зонде пропускался стабилизированный ток $I_R = 0,1–0,4$ А. При этом фиксировалась скорость роста температуры $\Delta T/t$. Теплоемкость зонда C_p рассчитывалась по формуле (8):

$$C_p = \frac{I_R^2 R t}{\Delta T}. \quad (8)$$

Экспериментально измеренная величина C_p составила $15,5 \pm 0,5$ Дж/К. Общий поток энергии на подложку рассчитывался по формуле (9):

$$E_{total} = \frac{C_p dt}{S_p dt}. \quad (9)$$

Удельная энергия, сообщаемая покрытию, вычислялась по формуле (10):

$$E_{norm} = E_{total} / a_d [J/cm^3] = \frac{E_{total}}{e r a_d} M_a [eV] \quad (10)$$

Перед началом экспериментов вакуумная камера откачивалась до остаточного давления 0,001 Па. После этого в камеру напускался аргон, давление которого поддерживалось на уровне 0,15 Па.

В ходе первого эксперимента производилось изменение длительности импульсов разрядного тока t_p в диапазоне от 8 до 100 мкс при фиксированной средней мощности разряда $P_{d,avg} = 1$ кВт. Частота импульсов F_p настраивалась таким образом, чтобы амплитуда импульсов разрядного тока $I_{d,max}$ составляла 150 А. Среднюю мощность разряда автоматически стабилизировал PPS путем изменения амплитуды импульсов напряжения $U_{d,max}$. В ходе второго эксперимента изменялся потенциал смещения подложки от плавающего до -100 В при фиксированной длительности импульсов 15 и 100 мкс.

Для сравнения в процессе экспериментов проводились измерения в DC режиме, также при средней мощности разряда 1 кВт.

2. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов разрядного напряжения, тока и мощности в режимах НРР1–НРР5. Длительность импульсов тока изменялась от 8 до 100 мкс при постоянной амплитуде 150 А и средней мощности разряда 1 кВт. Импульсы напряжения рис. 2, а имеют прямоугольную форму. В самом начале импульса напряжение достигает максимального значения $U_{d,max}$, после чего наблюдается спад. Спад напряжения в течение импульса обусловлен наличием паразитной индуктивности в цепи питания разряда, которая выступает в роли реактивного сопротивления, ограничивающего скорость роста тока. Сокращение длительности импульсов сопровождается увеличением $U_{d,max}$. Помимо этого, увеличивается спад напряжения в течение импульса. Благодаря увеличению разрядного напряжения удается увеличить скорость роста разрядного тока и обеспечить заданную амплитуду тока – 150 А. Поскольку за время импульса разряд не успевает выйти в установившейся режим, импульсы разрядного тока и мощности имеют треугольную форму.

В табл. 1 приведены основные параметры импульсных режимов НРР1–НРР5 и DC режима. Уменьшение длительности импульсов от 100 до 8 мкс приводит к увеличению частоты импульсов F_p в 7 раз. При этом амплитуда импульсов напряжения $U_{d,max}$ растет приблизительно в 2,5 раза и становится в четыре раза выше, чем в DC режиме. Рост разрядного напряжения приводит к увеличению максимальной импульсной мощности $P_{d,max}$ примерно на 50%. При средней мощности разряда 1 кВт, импульсная мощность достигает 110 кВт. Плотность мощности на поверхности мишени магнетрона достигает $\approx 1,4$ кВт/см², при среднем значении ≈ 13 Вт/см².

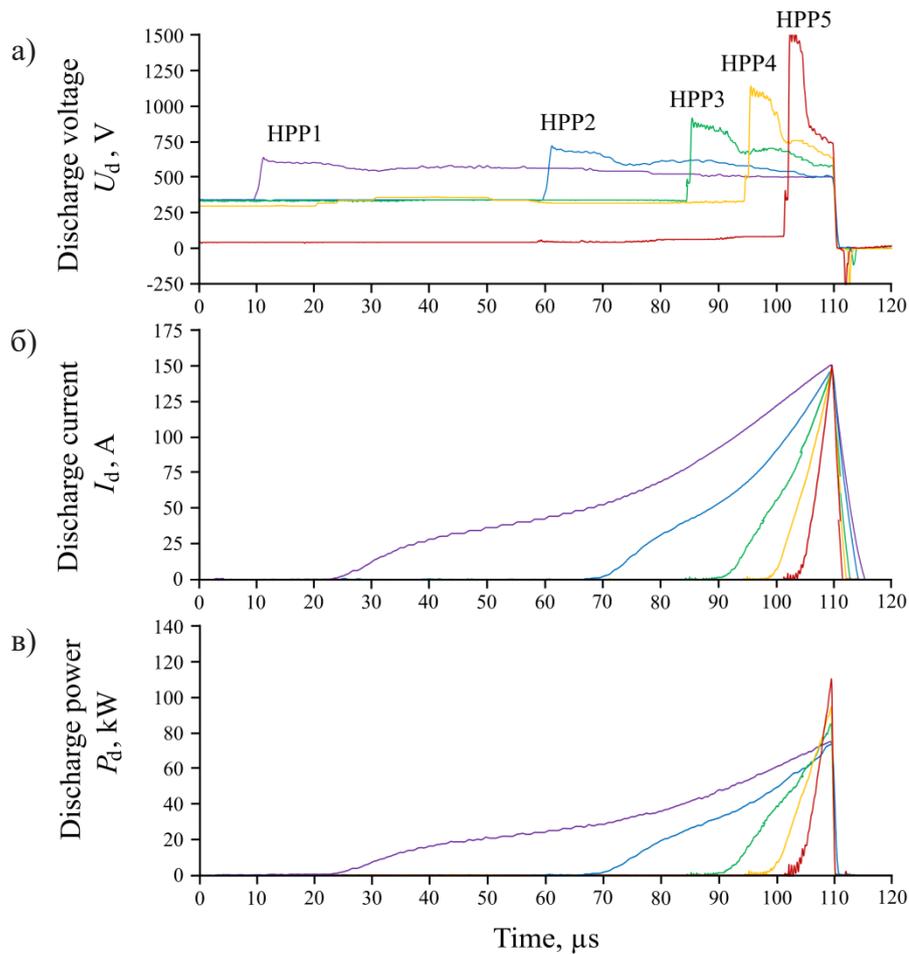


Рис. 2. Осциллограммы импульсов разрядного (а) напряжения U_d , (б) тока I_d и (в) мощности P_d

Fig. 2. Oscillograms of discharge pulses of (a) voltage U_d , (б) current I_d , and (в) power P_d

Таблица 1. Параметры электропитания разряда

Table 1. Discharge power supply parameters

Режим / Mode	Длительность импульсов t_p , мкс / Pulse duration, μs	Частота F_p , Гц / Frequency, Hz	Средний ток, $I_{d.avg}$, А / Average current, A	Средняя мощность $P_{d.avg}$, Вт / Average power, W	Максимальное напряжение, $U_{d.max}$, В / Maximum voltage, V	Максимальный импульсный ток $I_{d.max}$, А / Maximum pulsed current, A	Максимальная импульсная мощность, $P_{d.max}$, кВт / Maximum pulsed power, kW
HPP1	100	350	1,75	1000	568	150	74
HPP2	50	690	1,49		666		75
HPP3	25	1170	1,20		828		85
HPP4	15	1750	0,96		1064		95
HPP5	8	2390	0,73		1370		110
DC	–	–	2,42		413		–

Зависимости на рис. 3 показывают, как изменяются параметры процесса распыления при регулировании длительности импульсов разрядного тока.

Уменьшение длительности импульсов приводит к увеличению средней плотности ионного тока $J_{i,avg}$, протекающего на подложку приблизительно в 2,5 раза. Причины увеличения ионного тока на подложку при сокращении длительности импульсов рассматриваются в работе [21]. Во время сильноточных импульсов разрядного тока в области ионизации вблизи мишени накапливается большое количество ионов, которые удерживаются в «циркуляционной ловушке» до завершения импульса под действием магнитного и электрического полей. После за-

вершения импульса ионы освобождаются и транспортируются к подложке, обеспечивая повышенную интегральную плотность потока. Описываемый эффект позволяет добиться увеличения средней плотности ионного тока на подложку в несколько раз при постоянной средней мощности разряда.

Уменьшение длительности импульсов приводит к небольшому (5–10%) снижению скорости напыления a_d , как показывает зависимость на рис. 3, б. При этом скорость нанесения в режимах HPP1–HPP5 примерно в три раза ниже, чем в DC режиме. Уменьшение скорости роста покрытия обусловлено ионизацией и возвратом на мишень части распыленных атомов меди.

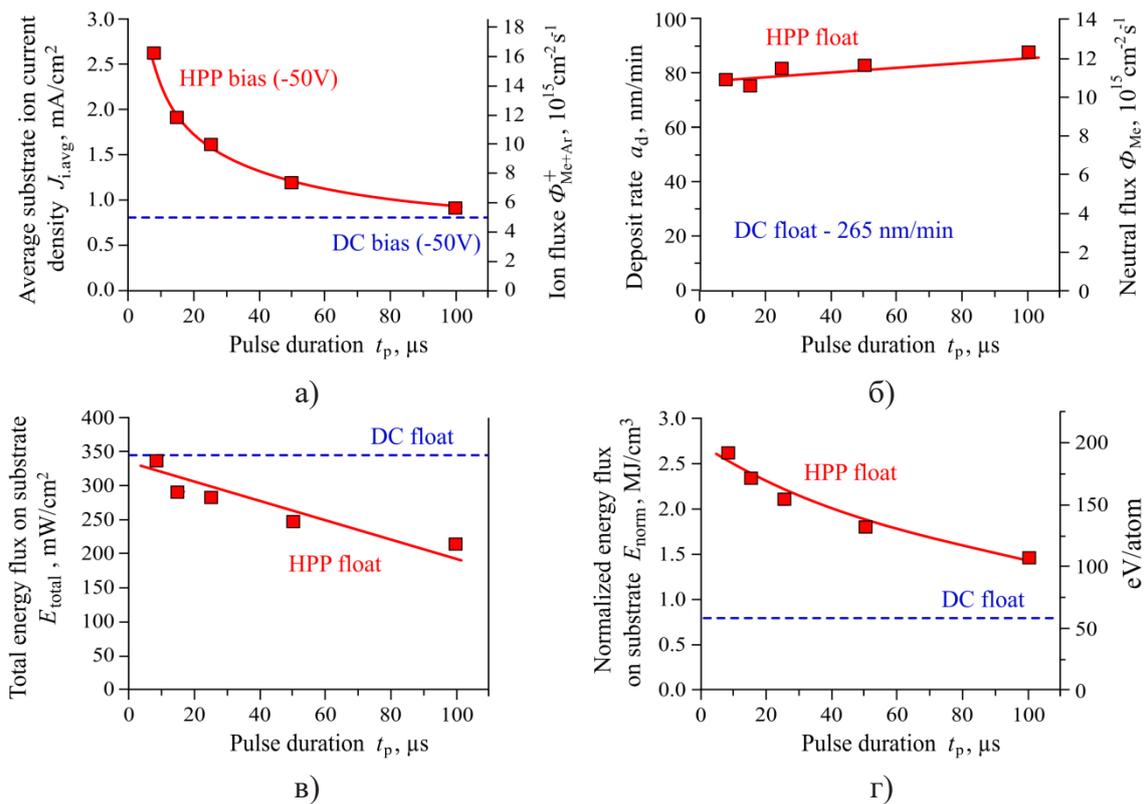


Рис. 3. Зависимости (а) средней плотности ионного тока и потока ионов на подложку (при смещении –50В), (б) скорости нанесения покрытия и потока металлических частиц на плавающую подложку, (в) общего потока энергии и (г) удельной энергии, сообщаемой покрытию, при плавающей подложке от длительности импульсов разрядного тока, при фиксированной средней мощности разряда 1 кВт и амплитуде тока 150 А

Fig. 3. Dependences of (а) average ion current density and ion flux on the substrate (at –50 V bias), (б) coating deposition rate and metal particle flux on the floating substrate, (в) total energy flux, and (г) normalized energy flux with floating substrate on the duration of discharge current pulses, at a fixed average discharge power of 1 kW and current amplitude of 150 A

Как показывает зависимость на рис. 3, в, уменьшение длительности импульсов разрядного тока приводит к увеличению общего потока энергии на плавающую подложку E_{total} в 1,5 раза. Основной причиной увеличения E_{total} является рост средней плотности ионного тока на подложку $J_{i,avg}$. В импульсных режимах E_{total} на плавающую подложку меньше, чем в DC режиме. Дело в том, что распыленные частицы, образующие покрытие, являются одним из основных источников энергии, поступающей на подложку под плавающим потенциалом. Поскольку в импульсных режимах снижается скорость нанесения, в общем потоке энергии на подложку снижается компонента, которую приносят пленкообразующие частицы. Из-за увеличения средней плотности ионного тока в режимах коротких импульсов E_{total} возрастает и при длительности 8 мкс становится

таким же, как в DC режиме, несмотря на существенно более низкую скорость нанесения покрытия.

Зависимости на рис. 3, з показывают, что удельная энергия E_{norm} , сообщаемая покрытию, возрастает при сокращении длительности импульсов. Скорость нанесения изменяется слабо, поэтому основной причиной роста E_{norm} можно считать увеличение общего потока энергии на подложку E_{total} . За счет более низкой скорости нанесения единица объема покрытия во всех импульсных режимах HPP1–HPP5 получает в 2 и более раз больше энергии, чем в DC режиме.

На рис. 4 представлены зависимости параметров процесса нанесения покрытий от потенциала смещения подложки при длительности импульсов 15 и 50 мкс, а также в DC режиме.

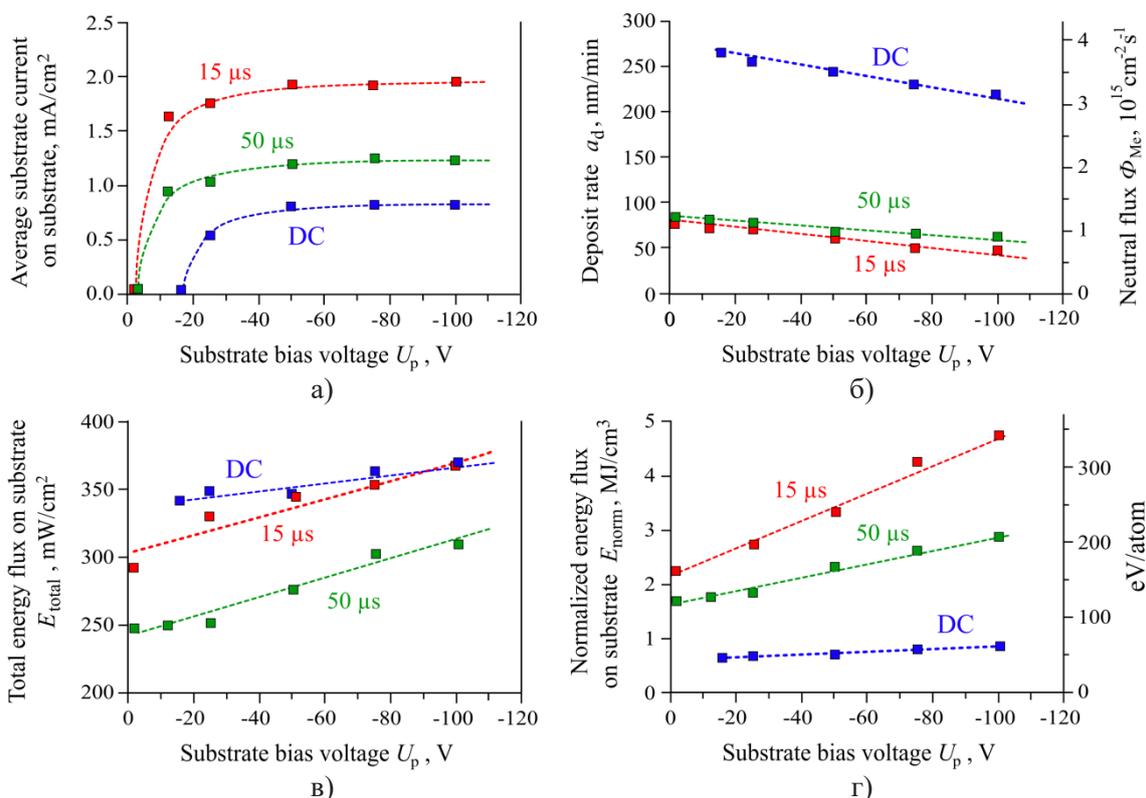


Рис. 4. Зависимости (а) средней плотности тока, протекающего на подложку, (б) скорости нанесения покрытия и потока атомов металла на подложку, (в) общего потока энергии и (г) удельной энергии, сообщаемой покрытию, от напряжения смещения подложки

Fig. 4. Dependences of (а) the average current density on substrate, (б) the deposition rate of the coating and the flux of metal atoms onto the substrate, (в) the total energy flux, and (г) the normalized energy flux on the substrate on the substrate bias voltage

Средняя плотность тока на подложку возрастает при увеличении напряжения смещения U_p и достигает насыщения при ≈ -50 В. В импульсных режимах плавающий потенциал, при котором ток на подложку становится равен нулю, составляет несколько вольт. Тогда как, в DC режиме плавающий потенциал составляет ~ -17 В. Более высокая величина плавающего потенциала косвенно указывает на более высокую среднюю электронную температуру в DC режиме, по сравнению с импульсными режимами. Скорость нанесения снижается при увеличении U_p , как в импульсных режимах, так и в DC режиме, что показывают зависимости на рис. 4, б. При увеличении U_p возрастает энергия ионов, бомбардирующих подложку, что приводит к перераспылению части осажденных атомов. Из-за более высокой плотности ионного тока на подложку скорость роста покрытия в режиме коротких импульсов (15 мкс) снижается сильнее, по сравнению с режимом относительно длинных импульсов (50 мкс).

Общий поток энергии на подложку E_{total} растет при увеличении напряжения смещения U_p . Это объясняется увеличением энергии бомбардирующих ионов. Параметр E_{total} увеличивается практически линейно во всех трех режимах. При этом зависимости $E_{total}(U_p)$ в импульсных режимах имеют больший угол наклона, чем в DC режиме. Т.е. при увеличении U_p общий поток энергии E_{total} в импульсных режимах возрастает сильнее, чем в DC режиме.

Удельная энергия E_{norm} , сообщаемая покрытию при увеличении U_p , тоже увеличивается практически линейно. В режиме коротких импульсов (15 мкс) удельная энергия увеличивается в два раза при увеличении потенциала смещения. Наибольшее количество энергии единица объема напыляемого покрытия получает в режиме коротких импульсов (15 мкс). В режиме DC она получает наименьшее количество энергии во всем диапазоне регулирования U_p .

Выводы

Результаты проведенных экспериментов показывают, что изменение параметров импульсов разрядного тока в процессе магнетронного распыления приводит к изменению общего потока энергии на подложку и удельной энергии, сообщаемой осаждаемому покрытию, при постоянных средней мощности разряда и давлении рабочего газа. Уменьшение длительности импульсов разрядного тока приводит к увеличению общего потока энергии на подложку прежде всего за счет увеличения плотности ионного тока. Снижение скорости роста покрытия при увеличении амплитуды импульсов разрядного тока приводит к увеличению удельной энергии, сообщаемой покрытию. При увеличении потенциала смещения подложки наблюдается практически линейное увеличение общего потока энергии на подложку и удельной энергии, сообщаемой покрытию.

Таким образом, на примере процесса магнетронного распыления медной мишени показано, что HiPIMS может использоваться как инструмент для управления энергетическим воздействием на подложку. Помимо потенциала смещения подложки, управлять энергией, сообщаемой покрытию, возможно путем изменения длительности, частоты и амплитуды импульсов разрядного тока.

Благодарности / Acknowledgments

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

This work was supported by the Government Contract of the Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences under Grant FWRM-2021-0006:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wendt R., Ellmer K., Wiesemann K. Thermal power at a substrate during ZnO:Al thin film deposition in a planar magnetron sputtering system // J. Appl. Phys.

1997. V. 82, Iss. 5. P. 2115–2122. DOI: 10.1063/1.366092.

2. Urbassek H., Sibold D. Sputtered atom transport in high-current gas discharges: A self-consistent computer simulation study // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1993. V. 11, Iss. 3. P. 676–681. DOI: 10.1116/1.578790.

3. Thornton J. A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings // *J. Vac. Sci. Technol.* 1974. V. 11, Iss. 4. P. 666–670. DOI: 10.1116/1.1312732.

4. Muller K. H. Model for ion-assisted thin-film densification // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59, Iss. 8. P. 2803–2807. DOI: 10.1063/1.336960.

5. Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness // *Surf. Coat. Technol.* 2012. V. 207. P. 50–65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.

6. Bradley J. W., Backer H., Aranda-Gonzalvo Y., Kelly P. J., Arnell R. D. The distribution of ion energies at the substrate in an asymmetric bi-polar pulsed DC magnetron discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2002. V. 11. P. 165–174. DOI: 10.1088/0963-0252/11/2/307.

7. Cada M., Bradley J. W., Clarke G. C. B., Kelly P. J. Measurement of energy transfer at an isolated substrate in a pulsed dc magnetron discharge // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102, Iss. 6. Article number 063301. DOI: 10.1063/1.2779287.

8. Swindells I., Kelly P. J., Bradley J. W. Influence of substrate conditions on the temporal behaviour of plasma parameters in a pulsed dc magnetron discharge // *New J. Phys.* 2006. V. 8. Article number 47. DOI: 10.1088/1367-2630/8/4/047.

9. Cada M., Virostko P., Kment S., Hubicka Z. Comparative study of total power density at a substrate in pulsed DC magnetron and hollow cathode plasma jet sputtering systems // *Plasma Process. Polym.* 2009. V. 6, Iss. S1. P. 247–252. DOI: 10.1002/ppap.200930611.

10. Гренадѐров А. С., Захаров А. Н., Оскирко В. О., Сиделев Д. В., Соловьев А. А. Поток энергии на подложку в процессе дуального магнетронного осаждения покрытий TiAlN // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022)*, (Tomsk, Russia), 2022. P. 1047–1052. DOI: 10.56761/EFRE2022.C4-P-015702.

11. Grenadyorov A., Oskirko V., Zakharov A., Oskomov K., Rabotkin S., Semenov V., Solovyev A.,

Shmakov A. Properties of TiAlN Coatings Obtained by Dual-HiPIMS with Short Pulses // *Materials*. 2023. V. 16, Iss. 4. Article number 1348. DOI: 10.3390/ma16041348.

12. Kersten H., Rohdes D., Berndt J., Deutsch H., Hippler R. Investigations on the energy influx at plasma processes by means of a simple thermal probe // *Thin Solid Films*. 2000. V. 377–378. P. 585–591. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01442-5.

13. Ball D. J. Plasma diagnostics and energy transport of a dc discharge used for sputtering // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43, Iss. 7. P. 3047–3057. DOI: 10.1063/1.1661657.

14. Gardon R. An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation // *Rev. Sci. Instrum.* 1953. V. 24, Iss. 5. P. 366–370. DOI: 10.1063/1.1770712.

15. Petrov I., Adibi F., Greene J. E., Hultman L., Sundgren J.-E. Average energy deposited per atom: A universal parameter for describing ion-assisted film growth? // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63, Iss. 1. P. 36–38. DOI: 10.1063/1.109742.

16. Han J. G. Recent progress in thin film processing by magnetron sputtering with plasma diagnostics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. V. 42, No. 4. Article number 043001. DOI: 10.1088/0022-3727/42/4/043001.

17. Thornton J. A. Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources // *Thin Solid Films*. 1978. V. 54, Iss. 1. P. 23–31. DOI: 10.1016/0040-6090(78)90273-0.

18. Howson R. P., Jafer H. A., Spencer A. G. Substrate effects from an unbalanced magnetron // *Thin Solid Films*. 1990. V. 193–194, Part 1. P. 127–137. DOI: 10.1016/S0040-6090(05)80020-3.

19. Pargellis A. N. Evaporating and sputtering: Substrate heating dependence on deposition rate // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1989. V. 7, Iss. 1. P. 27–30. DOI: 10.1116/1.575762.

20. Kersten H., Steffen H., Vender D., Wagner H. E. On the ion energy transfer to the substrate during titanium deposition in a hollow cathode arc discharge // *Vacuum*. 1995. V. 46, Iss. 3. P. 305–308. DOI: 10.1016/0042-207X(94)00068-9.

21. Oskirko V. O., Kozhevnikov V. Y., Rabotkin S. V., Pavlov A. P., Semenov V. A., Solovyev A. A. Ion current density on the substrate during short-pulse HiPIMS // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2023. V. 32, No. 7. Article number 075007. DOI: 10.1088/1361-6595/acdd95.