

## Магнетронное распыление меди короткими импульсами высокой мощности

*В.О. Оскирко<sup>1,2,\*</sup>, А.Н. Захаров<sup>1</sup>, С.В. Работкин<sup>1</sup>, А.П. Павлов<sup>1,2</sup>, В.А. Семенов<sup>1</sup>, А.А. Соловьев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт Сильноточной Электроники СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*ООО «Прикладная Электроника», Томск, Россия*

*\*oskirkovo@gmail.com*

**Аннотация.** Представлены результаты магнетронного распыления меди короткими (до 1–2 мкс) импульсами высокой мощности. Для получения коротких импульсов использовался специальный источник питания, обладающий высоким выходным напряжением (до 1500 В) и низким внутренним сопротивлением. Результаты экспериментов показали, что уменьшение длительности импульсов разрядного тока ведет к увеличению средней плотности ионного тока, протекающего на подложку. Максимальная плотность ионного тока наблюдается при длительности импульсов разрядного тока 2–6 мкс. Показано, что благодаря увеличению плотности ионного тока существенно возрастает отношение количества ионов к количеству атомов в потоке частиц, воздействующих на подложку.

**Keywords:** Сильноточное импульсное магнетронное распыление, HiPIMS, ультракороткие импульсы, ионный ток на подложку

### 1. Введение

Магнетронное распыление импульсами высокой мощности (HiPIMS) представляет собой модификацию импульсного магнетронного распыления, отличительной особенностью которой является применение импульсов разрядного тока с высокой скважностью и высокой мощностью. Благодаря высокой импульсной мощности разряда удается существенно повысить ионизацию распыленного материала и ионное воздействие, оказываемое на растущее покрытие [1–3]. Интенсивная бомбардировка подложки в процессе осаждения позволяет получать пленки с высокой плотностью и хорошей адгезией, контролировать кристаллизацию, фазовый состав и микроструктуру пленок [4, 5]. Технология HiPIMS обеспечивает получение покрытий с характеристиками, недоступными традиционному магнетронному распылению на постоянном токе, и эффективно решать такие задачи, как ионная очистка и нанесение покрытий на подложки сложной формы.

В зависимости от длительности импульсов можно выделить несколько разновидностей HiPIMS: (i) большой (от 500 мкс до нескольких десятков мс); (ii) средней (50–500 мкс), (iii) короткой (5–50 мкс); и (iv) ультракороткой (менее 5 мкс) длительности. Длительность импульсов представляет собой многообещающий параметр, который может быть использован для управления процессом [6]. Изменение длительности импульсов разрядного тока влечет за собой изменение таких параметров, как частота импульсов, величина разрядного напряжения, скорость напыления и т.д. Изменение этих параметров меняет условия формирования покрытия и его свойства.

Модификации HiPIMS с короткими (s-HiPIMS) и ультракороткими (us-HiPIMS) импульсами вызывают интерес, поскольку с их помощью удастся снизить количество дуг и повысить скорость осаждения покрытия при сохранении высокого уровня ионизации распыленного материала [6–9]. В предыдущих работах [10–12] нами было обнаружено двукратное увеличение средней интегральной плотности ионного тока на подложку при фиксированной средней мощности разряда в результате уменьшения длительности импульсов до 6–8 мкс.

В данной работе удалось еще сильнее уменьшить длительность импульсов с целью еще большего увеличения плотности ионного тока на подложку. Для этого был использован специальный источник питания, обеспечивающий высокую скорость роста выходного тока и высокую частоту повторения импульсов. В работе представлены электрические параметры

разряда и результаты измерений скорости осаждения пленок Cu с использованием коротких и ультракоротких импульсов.

## 2. Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки представлена на Рис.1. Установка включает в себя вакуумную камеру с системой откачки и подачи газа. Магнетронная распылительная система (МРС) имеет несбалансированную конфигурацию магнитного поля. Магнитное поле на поверхности катода в области распыления равно 730 Гс. Коэффициент геометрической несбалансированности  $K_G = 1.2$ . На МРС установлена круглая медная мишень диаметром 100 мм. Измерение плотности ионного тока и скорости напыления покрытия производилось на подложке площадью 70 см<sup>2</sup>, расположенной на расстоянии 70 мм от мишени.

В Таблице 1 представлены параметры импульсных источников питания (ИП) МРС. ИП МРС серии APHEL-M-5HPP-1k (далее ИПМ1) использовался для работы в диапазоне коротких импульсов (s-HiPIMS), а также в режиме постоянного тока (DCMS). ИП МРС серии APHEL-M-5HPPus (далее ИПМ2) использовался для работы в режиме ультракоротких импульсов (us-HiPIMS). Источники ИПМ1 и ИПМ2 подключались к катоду МРС поочередно с помощью специальных ключей  $S_1$  и  $S_2$ . В состав установки также вошли ионный источник с замкнутым дрейфом электронов (ИИ) с источником питания (ИПИИ), которые использовались для ионной очистки подложек перед нанесением покрытий.

При измерении ионного тока к подложке прикладывался отрицательный потенциал – 50 В с помощью источника питания смещения подложки (ИПСП). Измерение ионного тока на подложку, разрядного тока и напряжения производилось с помощью датчиков (Рис.1) и цифрового осциллографа.

Распыление мишени проводилось при давлении Ar в камере 0.1 Па. В процессе эксперимента источники питания работали в режиме стабилизации мощности 1 кВт. При изменении длительности импульсов их частота подбиралась такой, чтобы амплитуда импульсов тока составляла 200 А.

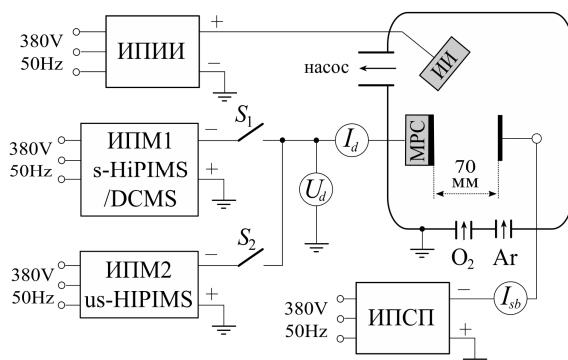


Рис.1. Экспериментальная установка для исследования коротко импульсного HiPIMS.

Таблица 1. Параметры ИП МРС

Параметр	ИПМ1	ИПМ2
Напряжение разряда	0.1–1 кВт	0.1–1.5 кВт
Средний выходной ток	0–5 А	
Средняя мощность	0–5 кВт	
Частота импульсов	0.1–5 кГц	0.1–30 кГц
Длительность	5–250 мкс	1–20 мкс
Импульсный ток	1000 А	500 А
Импульсная мощность	1000 кВт	750 кВт

Скорость нанесения покрытия и плотность потока нейтральных атомов меди, образующих покрытие, рассчитывались исходя из толщины покрытий, осаждаемых в течение 5 мин. Толщина пленок измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 (ЛОМО, Россия). Плотность потока ионов всех типов на подложку рассчитывалась исходя из плотности ионного тока, протекающего на подложку.

### 3. Результаты и обсуждение

На Рис.2 приведены осциллограммы импульсов разрядного тока и напряжения в режимах s-HiPIMS и us-HiPIMS. В обоих случаях длительность импульса напряжения  $t_u$  не совпадает с длительностью импульса разрядного тока  $t_i$ . Импульс тока сдвинут относительно импульса напряжения. Задержка формирования импульса тока определяется временем, необходимым для развития сильноточного импульсного разряда. В режиме s-HiPIMS максимальная скорость роста тока составляет 20–30 А/мкс, тогда как в us-HiPIMS она превышает 100 А/мкс. Более высокая скорость роста разрядного тока в us-HiPIMS достигается благодаря низкой выходной индуктивности и высокому выходному напряжению ИПМ2. После завершения импульса напряжения разрядный ток продолжает протекать за счет индуктивной энергии, накопленной в выходной цепи. В s-HiPIMS длительность спада тока примерно 20 мкс, тогда как в us-HiPIMS она составляет всего 0.5 мкс. Быстрый спад разрядного тока ИПМ2 обеспечивается благодаря рекуперации индуктивной энергии, накапливаемой в выходной цепи.

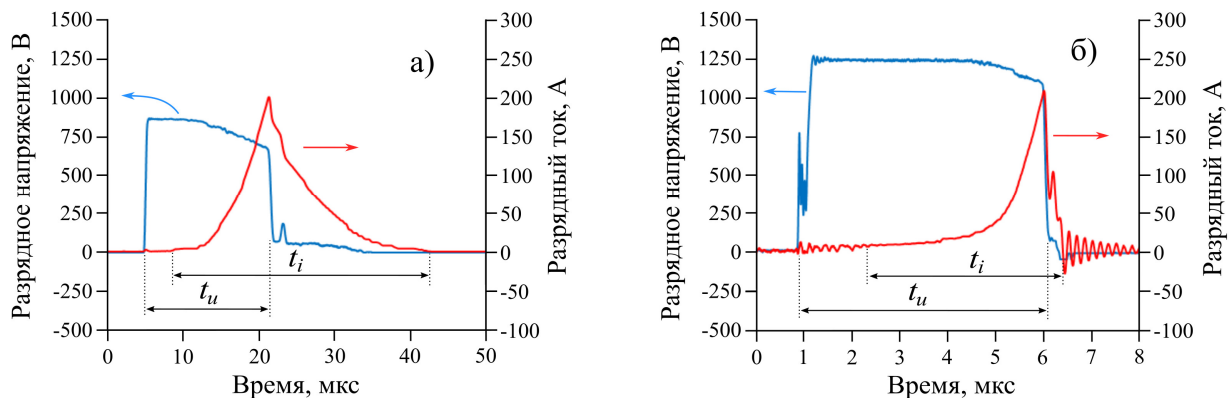


Рис.2. Осциллограммы импульсов разрядного тока и напряжения в режиме (а) s-HiPIMS и (б) us-HiPIMS.

На Рис.3 представлены зависимости параметров разряда от длительности импульсов разрядного тока  $t_i$  в режимах s-HiPIMS и us-HiPIMS. Для сравнения пунктирными линиями показаны параметры для режима DCMS. Для того, чтобы амплитуда импульсов разрядного тока при регулировке длительности импульсов оставалась на уровне 200 А, приходилось изменять амплитуду импульсов напряжения  $U_d$ , в результате чего изменялась скорость роста разрядного тока. Как видно из Рис.3а, при уменьшении  $t_i$  с 60 до 11 мкс, в s-HiPIMS напряжение  $U_d$  выросло с 550 до 900 В. В режиме us-HiPIMS оно увеличилось с 600 до 1600 В в результате сокращения длительности с 12 до 1 мкс. Разрядное напряжение при минимальной длительности импульсов тока 1 мкс оказалось в 4 раза выше, чем в режиме DCMS. Поскольку средняя мощность разряда во время эксперимента остается неизменной (1 кВт), увеличение амплитуды импульсов напряжения сопровождалось уменьшением среднего разрядного тока, что показывает зависимость на Рис.3б.

На Рис.3в видно, как меняется частота импульсов при изменении их длительности. Уменьшение длительности импульсов приводит к уменьшению их энергии. Для сохранения мощности разряда, уменьшение энергии импульса приходилось компенсировать увеличением частоты. Частота импульсов возросла с 600 Гц до 14.3 кГц при уменьшении  $t_i$  с 60 до 1 мкс.

На Рис.3г показано, как изменяется средняя плотность ионного тока на подложку при изменении длительности импульсов. При уменьшении  $t_i$  с 70 до 3 мкс плотность ионного тока выросла почти в 6 раз и достигла максимального значения 6 мА/см<sup>2</sup>. При дальнейшем

уменьшении  $t_i$  ионный ток начинает снижаться и при  $t_i = 1$  мкс составляет примерно  $4 \text{ мА/см}^2$ . Видно, что плотность ионного тока  $J_{sb,avg}$  в s-HiPIMS не сильно отличается от DCMS. Мы предполагаем, что основной причиной роста плотности ионного тока на подложку является увеличение температуры электронов. Температура электронов растет из-за роста доли высокоэнергетической компоненты, которая наблюдается во время переходного процесса в начале импульса HiPIMS. Также к росту энергии электронов приводит увеличение разрядного напряжения.

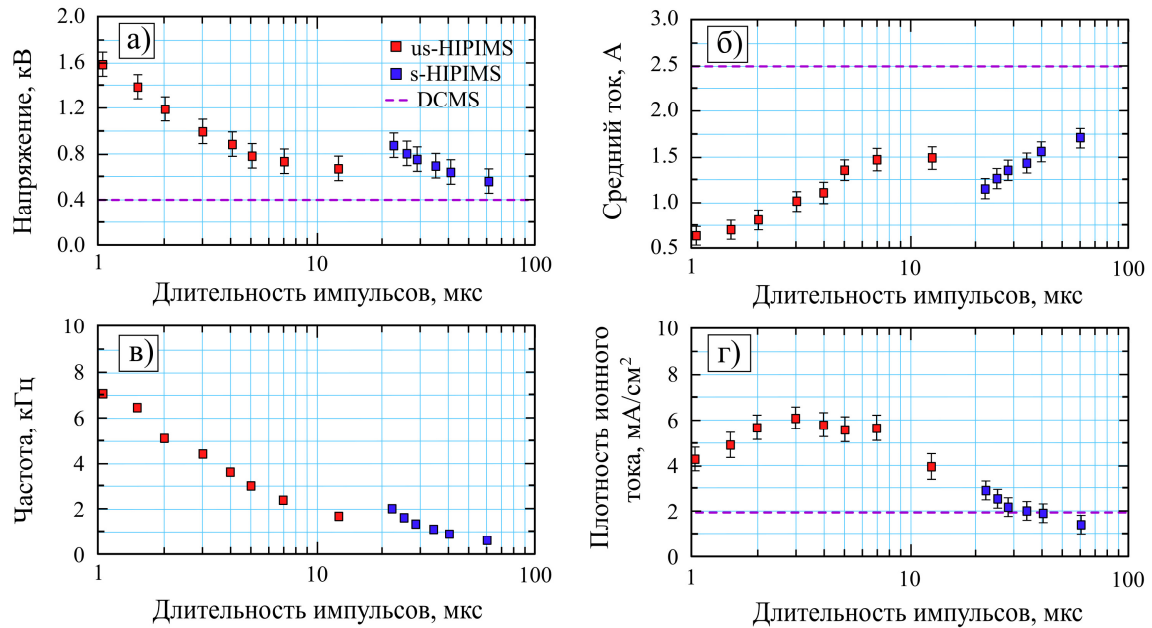


Рис.3. Зависимости (а) максимального импульсного напряжения, (б) среднего разрядного тока, (в) частоты повторения импульсов и (г) среднего ионного тока на подложку от длительности импульсов разрядного тока при фиксированной амплитуде импульсов разрядного тока 200 А и средней мощности разряда 1 кВт. Пунктирными линиями показаны параметры разряда в режиме постоянного тока.

Тонкие пленки меди были получены в трех режимах распыления, параметры которых представлены в Таблице 2. Самая высокая скорость осаждения  $a_d$  была получена в режиме DCMS. В импульсных режимах она оказалась значительно ниже.

Таблица 2. Параметры режимов осаждения пленок Cu

Режим	$I_{pulse}$ , А	$I_{d,avg}$ , А	$U_d$ , В	$t_u$ , мкс	$F$ , кГц	$P_{d,avg}$ , кВт	$a_d$ , нм/с	$J_{sb,avg}$ , мА/см²
DCMS	200	2.54	390	-	-	1.0	8.1	1.9
s-HiPIMS	200	1.57	650	40	0.8	1.0	1.3	2.1
us-HiPIMS	200	0.83	1200	5	5.0	1.0	1.2	5.7

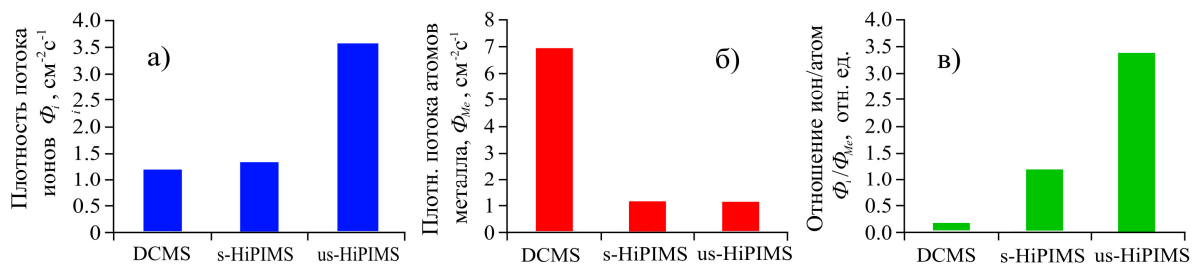


Рис.4. а) Плотность потока ионов на подложку  $\Phi_i$ , б) плотность потока атомов металла на подложку  $\Phi_{Me}$  и в) отношение ион-атом  $\Phi_i/\Phi_{Me}$  в режимах DCMS, s-HiPIMS и us-HiPIMS.

Уменьшение скорости осаждения связано, прежде всего, с процессами ионизации и возвратом на мишень части расплывшихся атомов. В us-HiPIMS режиме скорость осаждения оказалась практически такой же, как и в s-HiPIMS.

Результаты измерения скорости напыления и плотности ионного тока на подложку были использованы для расчета плотности потоков ионов  $\Phi_i$ , бомбардирующих подложку, и плотности потока атомов металла  $\Phi_{Me}$ , образующих покрытие (Рис.4).

Отношение  $\Phi_i/\Phi_{Me}$  показывает, какое количество бомбардирующих ионов приходится на каждый осажденный атом металла. В режиме s-HiPIMS отношение  $\Phi_i/\Phi_{Me}$  примерно в 6 раз выше, по сравнению с DCMS. В us-HiPIMS обеспечивается наиболее высокое значение  $\Phi_i/\Phi_{Me}$ , которое примерно в 20 раз выше, чем в DCMS. Такое сильно увеличение параметра  $\Phi_i/\Phi_{Me}$  достигается благодаря двум эффектам. Это снижение скорости осаждения покрытия и существенное увеличение плотности ионного тока на подложку. Широкий диапазон изменения параметра  $\Phi_i/\Phi_{Me}$  благодаря применению ультракоротких импульсов в HiPIMS, расширяет диапазон регулирования удельной энергии, которая сообщается покрытию за счет ионной бомбардировки. Изменение  $\Phi_i/\Phi_{Me}$ , путем изменения длительности и частоты импульсов, позволяет регулировать удельную энергию, не прибегая к изменению потенциала смещения подложки, определяющего энергию бомбардирующих ионов. Это может быть полезно в случаях, когда чрезмерная бомбардировка подложки нежелательна или отсутствует возможность подачи потенциала смещения. Например, в случае непроводящей подложки.

#### 4. Заключение

В работе продемонстрирована возможность сокращения длительности импульсов разрядного тока до 1–2 мкс при магнетронном распылении импульсами высокой мощности с амплитудой 200 А. Для получения ультракоротких импульсов использовался специально разработанный источник питания, обладающий высоким выходным напряжением до 1500 В и низким внутренним реактивным сопротивлением. Результаты экспериментов показали, что уменьшение длительности импульсов разрядного тока ведет к увеличению средней плотности ионного тока, протекающего на подложку. Средняя плотность тока в режиме ультракоротких импульсов более чем в 3.5 раз выше, чем в режиме постоянного тока, и выше более чем в 2 раза по сравнению с режимом HiPIMS с короткими импульсами.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН (проект FWRM-2021-0006).

#### 5. Список литературы

- [1] Anders A., *J. Surf. Coat. Technol.*, **205**, S1–S9, 2011; doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.081
- [2] Gudmundsson J.T., Brenning N., Lundin D., Helmersson U., *J. Vac. Sci. Technol.* **A30**, 030801, 2012; doi: 10.1116/1.3691832
- [3] Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U., *J. Plasma Sources Sci. Technol.*, **14**, 525, 2005; doi:10.1088/0963-0252/14/3/015
- [4] Sarakinos K., Alami J., Konstantinidis S., *J. Surf. Coat. Technol.*, **204**, 1661, 2010; doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.11.013
- [5] Samuelsson M., Lundin D., Jensen J., Raadu M.A., Gudmundsson J.T., Helmersson U., *J. Surf. Coat. Technol.*, **202**, 591, 2010; doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.041
- [6] Konstantinidis S., Dauchot J.P., Ganciu M., Ricard A., Hecq M., *J. Appl. Phys.*, **99**, 013307, 2006; doi: 10.1063/1.2159555

- [7] Tiron V., Velicu I., Matei T., Cristea D., Cunha L., Stoian G., *J. Coatings*, **10**, 633, 2020; doi:10.3390/coatings10070633
- [8] Tiron V., Velicu I., Cristea D., Lupu N., Stoian G., Munteanu D., *J. Surf. Coat. Technol.*, **352**, 690, 2018; doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.048
- [9] Tiron V., Velicu I., Mihaila I., Popa G., *J. Surf. Coat. Technol.*, **337**, 484, 2018; doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.065
- [10] Oskirko V.O., Zakharov A.Z., Solovyev A.A., Pavlov A .P., Rabotkin S.V., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1488**, 012003, 2020; doi: 10.1088/1742-6596/1488/1/012003
- [11] Oskirko V., Solovyev A., Zakharov A., Semenov V., Pavlov A., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242064
- [12] Oskirko V.O., Zakharov A.N., Semenov V.A., Pavlov A.P., Grenadyorov A.S., Rabotkin S.V., Solovyev A.A., *Vacuum*, **200**, 111026, 2022; doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111026