

Степень ионизации и энергия распыленных атомов меди в режиме магнетронного распыления короткими импульсами высокой мощности

В.О. Оскирко , А.Н. Захаров, С.В. Работкин, А.С. Гренадеров, А.П. Павлов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**oskirkovo@gmail.com*

Аннотация. В работе представлены результаты измерения степени ионизации распыленного материала мишени и энергии ионов в режиме магнетронного распыления короткими импульсами высокой мощности (short pulse HiPIMS). Распыление медной мишени диаметром 100 мм осуществлялось в диапазоне изменения длительности импульсов от 8 до 50 мкс, при амплитуде 10–200 А и средней мощности разряда 500 Вт. С помощью модифицированного кварцевого измерителя толщины покрытий получены зависимости доли ионов меди в потоке распыленного материала мишени от параметров импульсов. Рассчитаны распределения энергии ионов меди для режимов с разной длительностью импульсов. Установлено, что доля ионов в потоке распыленных атомов меди варьируется от 5 до 50 % в зависимости от параметров импульсов. При амплитуде импульсов разрядного тока выше 50 А (плотность тока на мишени более 0.6 А/см²) сокращение длительности импульсов сопровождается увеличением доли ионов в потоке более чем на 50 %. Уменьшение длительности импульсов разрядного тока с 50 мкс до 12 мкс приводит к увеличению энергии ионов меди. Максимальная энергия ионов возрастает с 22 до 60 эВ, а средняя энергия увеличивается с 6.5 до 13 эВ.

Ключевые слова: короткоимпульсное магнетронное распыление, HiPIMS, длительность импульса, степень ионизации, энергия ионов

1. Введение

Магнетронное распыление, как один из методов физического газофазного осаждения (PVD) играет ключевую роль в производстве интегральных схем для нанесения металлических тонких пленок различного назначения. Метод характеризуется относительной простотой и имеет высокую скорость нанесения покрытий [1, 2]. Для обеспечения равномерного покрытия ступеней или боковых стенок переходных отверстий (via) печатных плат необходима высокая направленность потока распыленного металла. Данная задача может решаться путем ионизации распыленных атомов и ускорения ионов по направлению к подложке с помощью подачи на нее отрицательного напряжения смещения [3]. Если доля ионов в потоке атомов металла мишени, достигающих подложки (степень ионизации), достаточно велика, осаждение будет преимущественно направленным. Однако, степень ионизации распыленного материала мишени при использовании магнетронного распыления на постоянном токе, как правило, не превышает нескольких процентов. Переход к магнетронному распылению импульсами высокой мощности (HiPIMS) позволяет существенно повысить степень ионизации потока распыленных атомов металла благодаря высокой импульсной мощности разряда [4, 5]. Кроме увеличения направленности потока распыленного материала, интенсивная бомбардировка подложки в процессе осаждения позволяет получать пленки с высокой плотностью и хорошей адгезией, контролировать кристаллизацию, фазовый состав и микроструктуру пленок [6, 7]. В то же время, увеличение степени ионизации сопровождается уменьшением скорости осаждения [8]. Для оптимизации процесса осаждения тонких пленок необходимо регулировать такие параметры, как: рабочее давление газа [8], длительность импульса разрядного тока [5] и его форма [9]. При этом, важно знать, как эти параметры влияют на скорость осаждения покрытий и степень ионизации распыленного материала.

В зависимости от длительности импульсов можно выделить несколько разновидностей метода HiPIMS: с большой (от 500 мкс до нескольких десятков мс), средней (50–500 мкс),

короткой (5–50 мкс) и ультракороткой (менее 5 мкс) длительностью импульсов. Наиболее часто используемыми и хорошо изученными являются режимы работы с импульсами средней длительности. Поэтому целью работы являлось измерение степени ионизации потока меди в процессе магнетронного распыления короткими импульсами высокой мощности (short-pulse HiPIMS). Длительность импульсов является одним из важнейших параметров, изменение которой влечет за собой изменение частоты следования импульсов, разрядного напряжения, скорости осаждения и свойств покрытий. Степень ионизации потока меди и энергия ионов меди были измерены при длительности импульсов от 8 до 50 мкс, при амплитуде разрядного тока от 20 до 200 А и фиксированной средней мощности разряда 500 Вт.

2. Экспериментальная часть

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Она включает в свой состав вакуумную камеру объёмом 30 литров, безмасляную систему откачки на основе турбомолекулярного и спирального насосов, датчики и зонды для измерения параметров разряда, систему подачи рабочего газа, а также магнетронную распылительную систему (MPC) с источником питания. Планарная MPC имеет несбалансированную конфигурацию магнитного поля с коэффициентом геометрической несбалансированности $K_g = 1.2$. Максимальное значение индукции магнитного поля на поверхности медной мишени диаметром 100 мм и толщиной 6 мм составляет 730 Гс.

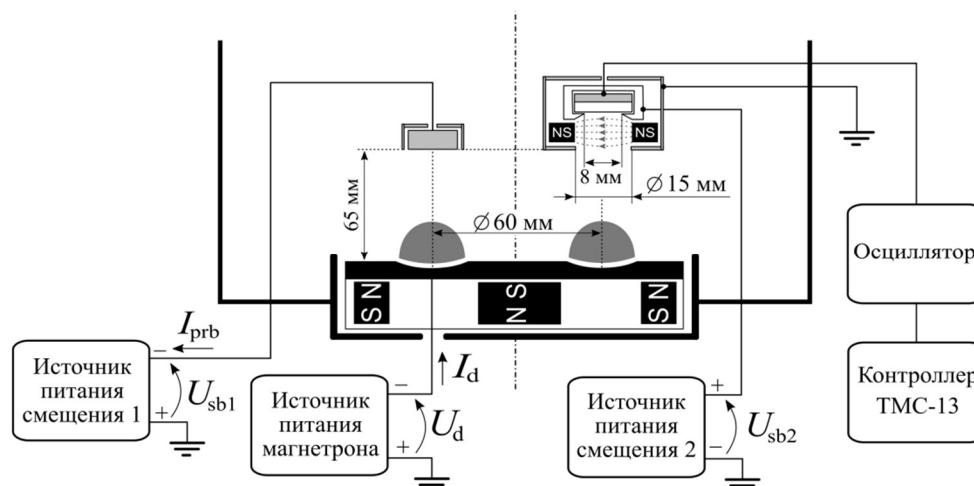


Рис. 1. Схема измерений степени ионизации и плотности ионного тока.

Для магнетронного распыления медной мишени использовался источник питания серии APREL-M-5HPP-1500U («Прикладная электроника» Россия, Томск). Амплитуда импульсов выходного напряжения источника питания может достигать 1600 В, а амплитуда импульсов тока – 500 А. Широкий диапазон регулирования частоты и длительности импульсов обеспечивает работу MPC не только в режиме коротких импульсов высокой мощности, но также в среднечастотных режимах и в режиме распыления на постоянном токе. Распыление медной мишени проводилось при рабочем давлении аргона 0.12 Па.

Степень ионизации потока распыленного материала мишени измерялась с помощью модифицированного кварцевого измерителя толщины ТМ13. Средняя мощность разряда во всех экспериментах составляла 500 Вт. Сравнительно невысокая средняя мощность разряда была выбрана для того, чтобы минимизировать эрозию мишени во время измерений скорости осаждения покрытий, обеспечивая при этом стабильность процесса сильноточного

магнетронного распыления короткими импульсами в случае режимов с низкой частотой повторения импульсов. Для поддержания постоянной средней мощности при изменении длительности импульса, и пикового тока разряда, частота повторения импульсов регулировалась в диапазоне $0.26 \div 12$ кГц.

В экспериментах использовалась модифицированная конфигурация микровесов на кристалле кварца (датчик толщины ТМ13) с подачей положительного смещения на его поверхность. Для защиты кварцевой пластины от высокого электронного тока насыщения в процессе измерений используется сильное магнитное поле, создаваемое двумя постоянными магнитами (см. рис. 1). Магнитное поле ориентировано параллельно поверхности кристалла и локализовано непосредственно над его поверхностью. Разделение заряженных частиц (электронов, ионов) возможно благодаря различию их ларморовских радиусов в магнитном поле. Ионы легко попадают на кварцевую пластину, в то время как электроны захватываются силовыми линиями магнитного поля и движутся с малым ларморовским радиусом. Величина магнитного поля на расстоянии 3 мм от поверхности пластины составляет ~ 1200 Гс. В этих условиях ларморовские радиусы для электрона и иона меди составляют 0.04 мм и 3 см соответственно [10]. Входная апертура датчика толщины располагалась над центром зоны распыления мишени. Это позволило одновременно с измерением скорости осаждения покрытий измерять плотность ионного тока на плоский зонд, также расположенный над центром зоны распыления.

Для измерения скорости осаждения только за счет нейтральных атомов меди, на датчик толщины подавалось положительное напряжение 85 В. Степень ионизации распыленного материала мишени представляет собой отношение потока ионов меди к полному потоку металла, состоящего из нейтральных атомов и ионов меди. Для расчета степени ионизации измерялись скорости роста медных покрытий без подачи на датчик толщины положительного смещения (V_0), а также при подаче положительного напряжения (V_{+85} в). Степень ионизации потока рассчитывалась по формуле:

$$\gamma = \frac{V_0 - V_{+85V}}{V_0}$$

Скорости осаждения покрытий в двух режимах отображались на экране контроллера ТМС-13. Установившиеся значения скоростей записывались примерно через 60 с после включения МРС.

3. Результаты

На рис. 2 приведены графики зависимости степени ионизации потока от длительности и амплитуды разрядного тока. Можно видеть, что при разрядном токе выше 50 А наблюдается заметное увеличение степени ионизации потока с уменьшением длительности импульсов тока. Этот эффект наиболее выражен при амплитуде разрядного тока 150 А (плотность тока на мишень 1.9 А/см²). Значения степени ионизации при длительности импульсов тока 8 и 50 мкс отличаются более чем в два раза и составляют 41.5 и 18.8% соответственно. Максимальная степень ионизации достигала 50% при амплитуде разрядного тока 200 А и длительности импульсов 12 мкс. В режиме распыления на постоянном токе степень ионизации потока составляла 0.7%. Увеличение степени ионизации потока распыленных атомов меди происходит как за счёт увеличения числа ионов, так и вследствие уменьшения скорости распыления (уменьшения количества распыленных нейтральных атомов) при сокращении длительности импульсов разрядного напряжения (см. рис. 3).

Средние значения плотности ионного тока на зонд растут с уменьшением длительности импульсов, однако, в отличие от степени ионизации, слабо зависят от амплитуды разрядного тока при одинаковой средней мощности разряда (см. таблицу 1).

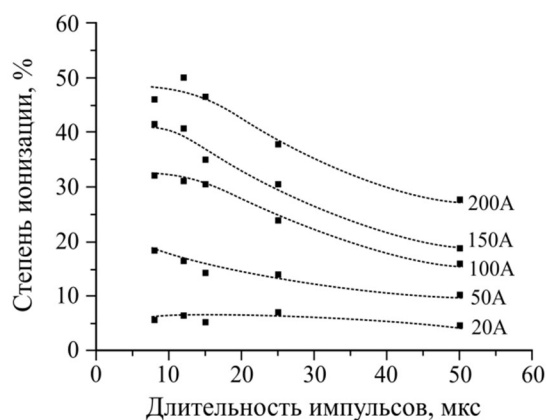


Рис. 2. Зависимость степени ионизации меди от длительности и амплитуды импульсов разрядного тока.

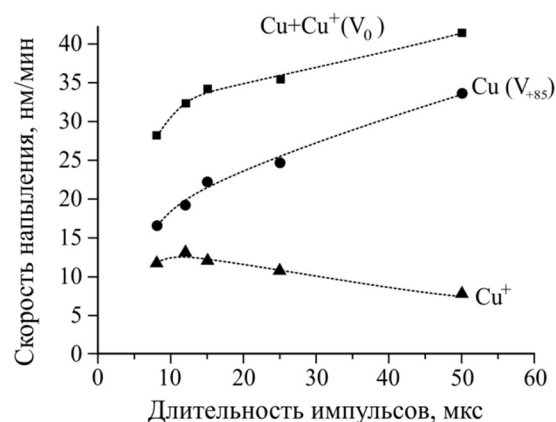


Рис. 3. Зависимость скоростей осаждения атомами и ионами Cu от длительности импульсов. Разрядный ток 150 А, средняя мощность разряда 500 Вт.

Таблица 1. Плотность ионного тока, мА/см²

Длительность импульса, мкс	Разрядный ток, А				
	20	50	100	150	200
8	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6
12	1.2	1.4	1.5	1.5	1.5
15	1.1	1.3	1.4	1.4	1.4
25	0.9	1.1	1.2	1.2	1.2
50	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0

Также с помощью модифицированного кварцевого измерителя толщины для двух режимов с амплитудой разрядного тока 150 А и длительностями импульсов 12 и 50 мкс были получены функции распределения ионов по энергиям (IEDF). Для этого были построены графики скоростей осаждения медных покрытий от величины, приложенного к кварцевой пластине, положительного потенциала. Когда этот потенциал ниже потенциала плазмы (в нашем случае он составляет ~2 В), ионы и атомы меди попадают на кварцевую пластину. Повышение потенциала пластины приводит к тому, что часть ионов отражается, и скорость осаждения падает. При определенном значении положительного потенциала осаждение покрытия происходит только за счет атомов меди. Зависимости скорости осаждения от потенциала кварцевой пластины аналогично зависимостям тока на коллектор от потенциала анализирующей сетки электростатического анализатора с задерживающим потенциалом могут быть использованы для построения IEDF. Отрицательная производная зависимости тока на коллектор (скорости осаждения) от задерживающего потенциала будет соответствовать IEDF для однозарядных ионов [11, 12]. На рис.4 приведено распределение энергии ионов меди, поступающих на пластину датчика толщины при длительностях разрядного тока 12 и 50 мкс. Сокращение длительности импульсов приводит к возрастанию средней энергии ионов меди с 6.5 до 13 эВ и более чем в два раза возрастает максимальная энергия ионов (с 23 до ~60 эВ). Увеличению энергии ионов способствует более высокое напряжение разряда в случае коротких импульсов. Разрядное напряжение составляло 1150 В при длительности импульсов 12 мкс и 640 В для длительности 50 мкс.

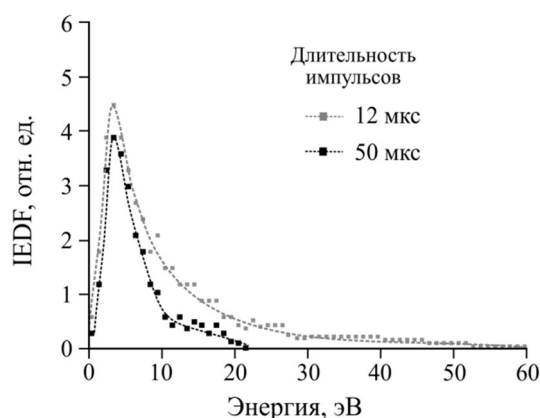


Рис. 4. Распределение энергии ионов Cu при длительности импульсов 12 и 50 мкс.

4. Заключение

В работе впервые исследовано влияние длительности и амплитуды импульсов разрядного тока на степень ионизации распыленных атомов меди и энергию ионов в процессе магнетронного распыления короткими импульсами высокой мощности. Степень ионизации растёт с увеличением разрядного тока и уменьшением длительности импульсов. При разрядном токе 200 А и длительности импульсов 12 мкс степень ионизации потока меди достигает 50%. Показано, что уменьшение длительности импульсов приводит к росту средней и максимальной энергии ионов меди, бомбардирующих подложку. Максимальная энергия ионов возрастает с 22 до 60 эВ, а средняя энергия увеличивается с 6.5 до 13 эВ.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения качества (адгезии, плотности и других физико-механических свойств) металлических покрытий, формируемых методом магнетронного распыления.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0006).

5. Литература

- [1] A. Simon, O. van der Straten, N.A. Lanzillo, C.C. Yang, T. Nogami and D.C. Edelstein, Role of high aspect-ratio thin-film metal deposition in Cu back-end-of-line technology, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, vol. **38**, 053402, 2020, doi: 10.1116/6.0000170
- [2] S.M. Rossnagel, Sputter deposition for semiconductor manufacturing, *IBM J. Res. Dev.*, vol. **43**, 163, 1999, doi: 10.1147/rd.431.0163
- [3] J.A. Hopwood, The role of ionized physical vapor deposition in integrated circuit fabrication Ionized Physical Vapor Deposition Physical Vapor Deposition, *Thin Films*, vol. **27**, 1, 2000, doi: 10.1016/S1079-4050(00)80003-4
- [4] T. Minea, T. Kozák, C. Costin, J.T. Gudmundsson, D. Lundin, *High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Amsterdam: Elsevier, 2020
- [5] M. Rudolph, N. Brenning, M.A. Raadu, H. Hajihoseini, J.T. Gudmundsson, A. Anders, and D. Lundin, Optimizing the deposition rate and ionized flux fraction by tuning the pulse length in high power impulse magnetron sputtering, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **29**(5), 05LT01, 2020, doi: 10.1088/1361-6595/ab8175
- [6] K. Sarakinos, J. Alami, S. Konstantinidis, *Surf. Coat. Technol.*, vol. **204**, 1661, 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.11.013

- [7] M. Samuelsson, D. Lundin, J. Jensen, M.A. Raadu, J.T. Gudmundsson, U. Helmersson, *Surf. Coat. Technol.*, vol. **202**, 591, 2010, doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.041
- [8] N. Brenning, A. Butler, H. Hajihoseini, M. Rudolph, M. Raadu, J. Gudmundsson, T. Minea and D. Lundin, Optimization of HiPIMS discharges: the selection of pulse power, pulse length, gas pressure and magnetic field strength, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. **38**, 033008, 2020, doi: 10.1116/6.0000079
- [9] N. Brenning, H. Hajihoseini, M. Rudolph, M. Raadu, J. Gudmundsson , T. Minea and D. Lundin, HiPIMS optimization by using mixed high-power and low-power pulsing, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **30**, 015015, 2021, doi: 10.1088/1361-6595/abd79a
- [10] T.G. Snodgrass, J.H. Booske, W. Wang, A.E. Wendt, and J.L. Shoheta, Gridless ionized metal flux fraction measurement tool for use in ionized physical vapor deposition studies, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **70**(2), 1525, 1999, doi: 10.1063/1.1149618
- [11] R. Jones, Optimization and performance of electrostatic particle analyzers, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **49**, 21, 1978, doi: 10.1063/1.1135245
- [12] H.D. Kudryan, Interpretation of electrostatic energy analyzer data of a flowing plasma, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **49**, 8, 1978, doi: 10.1063/1.1135262