

13. Bay H.L., Winters H.F., Coufal H., Eckstein W. "Energy Transfer to a Copper Surface by Low Energy Noble Gas Ion Bombardment". Applied Physics A, 1992, Vol. 55, No. 3, pp. 274-278.
14. McKeown D., Cabezas A. "Neutral Beam Detection". Review of Scientific Instruments, 1963, Vol. 34, No. 11, p. 1261.

Формирование ультратонких медных пленок с помощью сильноточного импульсного магнетронного распыления

В.О. Оскирко, В.А. Семенов, А.П. Павлов, С.В. Работкин
Томск, ИСЭ СО РАН, пр. Академический 2/3;
ООО «Прикладная Электроника», пр. Академический 15-80
E-mail: oskirkovo@gmail.com

Сильноточное импульсное магнетронное распыление является разновидностью ионизированного физического осаждения покрытий из паровой фазы. В рамках настоящей работы исследовано влияние параметров HIPIMS разряда на структуру, итоговые оптические и электрофизические характеристики ультратонких пленок меди (толщиной до 25 нм). Получены зависимости разрядного тока и ионного тока, протекающего на подложку от частоты следования импульсов высокой мощности. Найдены оптимальные условия формирования ультратонких медных пленок, исходя из их удельной проводимости и коэффициента отражения в ИК диапазоне спектра. Пленки, полученные при частоте следования импульсов 3 кГц, длительности 20 мкс и средней мощности разряда 500 Вт в HIPIMS режиме становятся непрерывными уже при толщине 5-6 нм.

Deposition of ultra-thin copper films by high-current pulsed magnetron sputtering. V.O.Oskirko, V.A. Semenov, A.P. Pavlov, S.V. Rabotkin. High-current magnetron sputtering is a kind of ionized physical vapour deposition (PVD) of coatings. This paper is focused on influence of HIPIMS discharge parameters on structure and final optical and electro-physical characteristics of ultra-thin (< 20 nm) copper films. Dependencies of discharge current and substrate ion current on frequency of high-power pulses are obtained. Optimum conditions of ultra-thin copper films formation are found based on their resistivity and IR reflection. The copper films deposited at average discharge power of 500 W, pulses frequency of 3 kHz and their duration of 20 μ s are continuous at 5-6 nm thickness.

В процессе ионно-плазменного напыления важную роль играет низкоэнергетическая ионная бомбардировка растущей пленки. Ионная бомбардировка является важным физическим инструментом, используемым для получения покрытий с улучшенными характеристиками. Современные методы ионизированного физического осаждения покрытий из паровой фазы (IPVD), способные обеспечивать высокую степень ионизации атомов распыленного вещества и плотность ионно-плазменных потоков, открывают совершенно новые перспективы в проектировании и разработке тонкопленочных материалов. Одним из таких методов является сильноточное импульсное магнетронное распыление (в зарубежной литературе именуемое HIPIMS). HIPIMS характеризуется высокой импульсной мощностью (до несколько десятков кВт/см²), достигаемой за счет высокой скважности импульсов (от 10 и выше).

Высокая импульсная плотность мощности в магнетронном разряде приводит к увеличению концентрации генерируемой плазмы и степени ионизации распыленного вещества. В результате увеличивается плотность потока ионов, бомбардирующих подложку, а также возрастает доля ионов распыленного вещества [1,2]. Изменяя параметры импульсного электропитания HIPIMS (длительность импульса, период, амплитуда), удается контролировать плотность и состав высокоионизированных потоков, воздействующих на подложку, обеспечивая оптимальные условия для роста пленки с нужной структурой и свойствами.

В рамках настоящей работы исследовано влияния параметров НРІMS разряда на структуру и итоговые оптические, электрофизические характеристики ультратонких пленок меди (до 25 нм). Покрытия данного типа представляют фундаментальный научный и практический интерес, поскольку обладают уникальными свойствами и имеют широкий спектр потенциальных применений в электронике, оптике, энергосбережении (низкоэмиссионные покрытия MeOx/Cu/MeOx) и других областях. Кроме того, медь в качестве материала катода позволяет достигать высокой плотности в условиях импульсного магнетронного разряда, что позволяет проводить исследования в широком диапазоне амплитуды выходного тока.

Эксперименты проводились на установке для магнетронного осаждения покрытий, реализованной на основе вакуумного оборудования ННВ-6 «Булат». В состав экспериментальной установки вошла магнетронная распылительная система (MPC) APEL-MRE-100 с круглым плоским медным катодом диаметром 100 мм. Для возбуждения сильноточного импульсного магнетронного разряда использовался источник электропитания APEL-M-5НРІMS (производства ООО «Прикладная электроника», г. Томск), обеспечивающий среднюю выходную мощность до 5 кВт, напряжение в диапазоне от 300 до 1000 В, и выходной ток до 1 кА. В качестве рабочего газа использовался аргон. Рабочее давление в камере во время эксперимента поддерживалось на уровне 0,2 Па.

Для определения плотности ионного тока, протекающего на подложку, использовался плоский зонд с охранным кольцом. Площадь центрального электрода составляла 5.5 см². Зонд располагался на расстоянии 80 мм от поверхности мишени магнетрона.

Для определения скорости осаждения пленок меди и расчета потока атомов на подложку, было произведено напыление покрытий в режимах с разной частотой следования импульсов. В качестве подложек использовались образцы из архитектурного стекла размером 20×20×4 мм.

Поскольку покрытия имели толщину всего в несколько нм, измерение проводилось с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47. Для этого удаляли часть покрытия и снимали картину рельефа поверхности, из которой вычислялась высота ступеньки пленка-подложка.

Интегральный коэффициент отражения покрытия в диапазоне длин волн от 2,5 мкм до 20 мкм определялся инфракрасным Фурье-спектрометром ФСМ 2201. Измерение удельного сопротивления покрытий проводились четырехзондовым методом при комнатной температуре.

Как уже было отмечено ранее, увеличение разрядного тока и плотности мощности на катоде магнетрона приводит к увеличению концентрации плазмы в разрядном промежутке и повышению плотности ионного тока, протекающего на подложку. Осциллограмма на рис. 1. демонстрирует форму импульса тока магнетронного разряда и импульса ионного тока, протекающего на зонд.

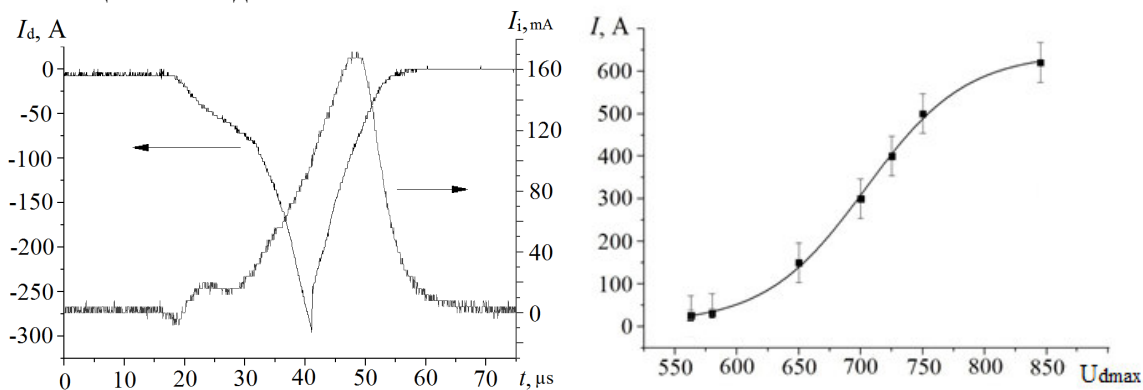


Рис. 1. а - Типичная форма разрядного тока и ионного тока, протекающего на зонд, в НРІMS режиме; б - амплитудная вольтамперная характеристика НРІMS разряда, при длительности импульса 20 мкс и рабочем давлении 0.2 Па.

При амплитуде разрядного тока 300 А максимальное значение ионного тока на зонд достигает 170 мА, тогда как величина ионного тока на подложке в режиме постоянного тока при аналогичных условиях составляла всего несколько мА. Запаздывание пика ионного тока,

относительно пика разрядного тока, обуславливается конечной скоростью разлета плазмы, генерируемой вблизи катода.

На рис. 1.6 представлена амплитудная вольтамперная характеристика сильноточного импульсного магнетронного разряда, отражающая зависимость максимального тока от напряжения при фиксированной длительности импульса 20 мкс. Видно, что увеличение амплитуды импульса напряжения от 550 до 850 В вызывает рост разрядного тока от 20 до 700 А. При этом плотность мощности на поверхности мишени возрастает от 180 до 5400 Вт/см².

Поскольку длительность импульса и средняя мощность разряда (500 Вт) во время экспериментов оставались неизменными, увеличение частоты следования импульсов приводило к снижению амплитуды импульсов разрядного тока и ионного тока, протекающего на зонд. График на рис. 2 отражает зависимость амплитуды импульсов тока и плотности ионного тока, протекающего на зонд, от частоты формирования импульсов.

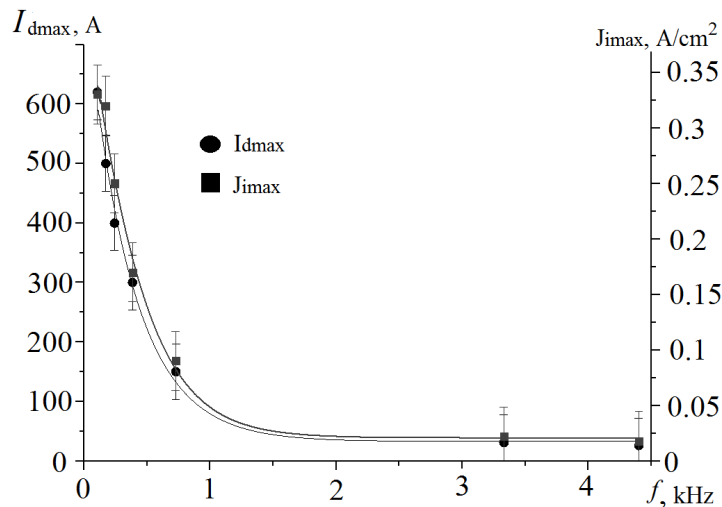


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульсов разрядного тока и импульсов тока, протекающего на зонд, от частоты следования импульсов.

Далее было исследовано влияние частоты формирования импульсов на свойства покрытий. Для этого была получена серия образцов в режимах с частотой 0.5, 3, 5 кГц и в DC режиме. На рис. 3 приведены зависимости удельного сопротивления и отражения R в ИК диапазоне длин волн медных покрытий от их толщины.

Известно, что пленки меди, как и большинство металлических покрытий, начинают свой рост с изолированных островков, которые по мере роста соединяются в замкнутые цепочки, сеточную структуру, после чего образуется сплошная пленка [3]. Когда пленка состоит из изолированных островков она обладает большим удельным сопротивлением и низким значением коэффициента отражения R в ИК диапазоне длин волн. По мере того как площадь, занимаемая островками растущей пленки, увеличивается, прозрачность металлической пленки в видимом диапазоне длин волн и ее сопротивление уменьшаются, а отражение в инфракрасном диапазоне увеличивается. Слияние островков и формирование сплошной пленки сопровождается резким снижением удельного сопротивления и ростом R . Поэтому из кривых зависимости ρ и R от толщины пленки можно определить толщину пленки, при которой образуется сплошное покрытие. Эта толщина, исходя из представленных на рис. 3 графиков, зависит от режима распыления и находится в диапазоне от 5 до 20 нм.

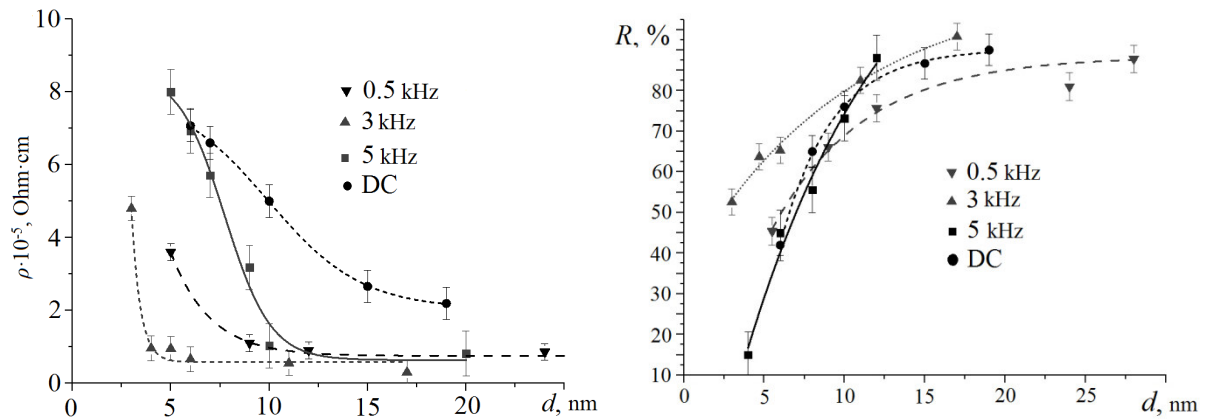


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления медных пленок (а) и коэффициента отражения в ИК диапазоне (б) от толщины покрытий, полученных в различных режимах.

При частоте 3 кГц, сплошная пленка образуется уже при толщине 5 нм (рис. 3.а). При этом во всем диапазоне толщин пленки, полученные при заданной частоте, обладают наиболее высоким коэффициентом отражения в ИК диапазоне (рис. 3.б). Удельное сопротивление пленки толщиной 6 нм, полученной в HIPIMS режиме при частоте 3 кГц составляет приблизительно 6 мкОм·см, что в 8 раз ниже удельного сопротивления пленки той же толщины, полученной в режиме постоянного тока.

Однако дальнейшее снижение частоты формирования импульсов (ниже 3 кГц), несмотря на увеличение ионного тока на подложке, приводит к увеличению удельного сопротивления покрытия. По нашему мнению это связано с процессами, протекающими на подложке в течение продолжительных пауз между импульсами разрядного тока.

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние частоты следования импульсов в HIPIMS разряде на уровень тока, протекающего на подложку, и свойства ультратонких медных пленок при постоянной мощности разряда. В используемой системе осаждения, оптимальные условия формирования ультратонких медных пленок обеспечиваются при частоте следования импульсов 3 кГц. Пленки, полученные в данном режиме, становятся сплошными уже при толщине 5-6 нм и обладают значительно более низким удельным сопротивлением, относительно других исследуемых режимов. Снижение удельной проводимости и увеличение коэффициента отражения в ИК диапазоне обуславливается повышением степени ионного воздействия на подложку.

Литература

1. Kouznetsov V., Macak K., Scheider J.M., Helmersson U., Petrov I. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities // Surface and Coatings Technology. – 1999. – V.122. – p. 290 – 293.
2. Alami J. Persson P. Music et al. Ion-assisted physical vapor deposition for enhanced film properties on nonflat surfaces // Journal of Vacuum Science & Technology. – 2005. – v. 23 – 278.
3. Le M.T., Sohn Y.U., Lim J.W., Choi G.S. Effect of sputtering power on the nucleation and growth of Cu films deposited by magnetron sputtering // Materials Transactions – 2010. – 51(1). –p. 116–120.