

05

Формирование наночастиц при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности на тонкую металлическую пленку на диэлектрической подложке

© В.С. Ковивчак, Р.Б. Бурлаков, Т.В. Панова, Н.А. Давлеткильдеев

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

E-mail: kvs@univer.omsk.su

Омский филиал ИФП СО РАН

Поступило в Редакцию 7 августа 2007 г.

Исследовано образование наночастиц на поверхности подложки после воздействия мощного протон-углеродного пучка наносекундной длительности на систему „тонкая металлическая пленка—диэлектрическая подложка“. Приведены параметры образующихся частиц для пленок Al и Ni толщиной в диапазоне 5–60 nm, нанесенных на подложки из ситалла СТ-50. Рассмотрены возможные механизмы формирования наночастиц.

PACS: 61.46.Df, 61.80.Jh, 81.16.Rf

Воздействие импульсных лазерного излучения и пучков заряженных частиц на твердое тело может приводить к быстрому введению значительного количества тепла в поверхностный слой. Происходящий при этом нагрев в течение короткого промежутка времени и последующие фазовые переходы в большей степени изучены для объемных материалов. До недавнего времени большинство работ по исследованию воздействия импульсного лазерного излучения было посвящено главным образом плавлению поверхности и абляции толстых пленок различных металлов. При таком способе плавления может возникать неустойчивость в пленке, приводящая к ее разрыву и образованию капель, если расплав плохо смачивает подложку. Использование в качестве подложки химически инертной SiO_2 (или SiO_2/Si) позволяет получить на ее поверхности капли многих металлов. Природа межграничного взаимодействия в системе „металл—подложка“, тепло-

проводность подложки и начальная толщина металлической пленки, коэффициент поверхностного натяжения и вязкость расплава являются параметрами, в значительной степени определяющими формирование массива капель наноразмерного диапазона [1,2]. Системы подобных наночастиц в настоящее время привлекают значительное внимание как фундаментальной, так и прикладной науки из-за их интересных и разнообразных свойств, которые отличаются от свойств объемного материала. Металлические наночастицы могут обеспечить как высокую плотность магнитной записи (Co), так и различные оптические применения на основе поверхностного плазменного резонанса (Au, Ag, Cu), а наночастицы переходных металлов (Ni, Fe) используются для обеспечения каталитического роста наноструктур, включая углеродные нанотрубки.

Однако малая глубина проникновения оптического излучения в металлическую пленку, изменение коэффициента отражения излучения при плавлении пленки, небольшая площадь сечения пучка и ряд других факторов ограничивают диапазон толщин металлических пленок, которые могут использоваться для получения на подложке металлических капель регулируемых размеров при лазерном воздействии. Поэтому представляется важным исследование процессов, протекающих в тонкопленочных металлических покрытиях на диэлектрических подложках при воздействии на них мощных ионных пучков (МИП). По сравнению с импульсным лазерным излучением МИП имеет ряд существенных преимуществ: более высокая проникающая способность, что обеспечивает нагрев не только пленки, но и приповерхностного слоя подложки, независимость пробега ионов от состояния поверхности, высокая степень поглощения в любых металлах, большие площади воздействия.

При воздействии МИП на металлическую пленку, толщина которой сравнима с проективным пробегом ионов углерода пучка, значительная часть энергии пучка поглощается непосредственно в пленке и может вызывать ее плавление. Ранее было показано, что имеющие до облучения зеркальную поверхность металлические пленки на диэлектрической подложке при однократном воздействии мощного протон-углеродного пучка наносекундной длительности с нарастающей плотностью тока последовательно испытывают существенные морфологические изменения: растрескивание пленки, появление оголенных участков подложки при плавлении пленки, образование сетчатоподобной структуры и в конечном итоге формирование на поверхности подложки капель

различной формы и размеров [3]. При воздействии МИП с плотностью ионного тока, превышающей 30 A/cm^2 , наряду с образованием капель различных размеров может наблюдаться образование волнообразной структуры на поверхности подложки [4].

В настоящей работе исследуется формирование металлических наночастиц при воздействии МИП наносекундной длительности на тонкие металлические пленки (толщиной не более 60 nm) на диэлектрической подложке. В качестве исследуемых металлов были выбраны Al и Ni, которые имеют как сильно различающиеся температуры плавления, так и различную способность к формированию оксида и адгезию к подложке. Тонкопленочные покрытия наносились методом термовакuumного испарения на подложки из ситалла СТ-50. Толщина пленок варьировалась в диапазоне $5\text{--}60 \text{ nm}$. Перед нанесением покрытий подложки подвергались стандартной химической очистке. Нанесение покрытий проводилось при температуре подложки не выше 150°C . Облучение тонкопленочных покрытий выполнялось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком (30% H^+ и 70% C^+) со следующими параметрами: средняя энергия ионов $E = 300 \text{ keV}$, плотность тока пучка $j \leq 150 \text{ A/cm}^2$, длительность импульса $\tau = 60 \text{ ns}$. В экспериментах варьировалась толщина покрытия, число импульсов облучения и средняя плотность тока пучка, которая не превышала 20 A/cm^2 , чтобы свести к минимуму деформацию поверхностного слоя диэлектрической подложки. Толщина используемых покрытий была значительно меньше пробега ионов углерода и протонов пучка в материале пленки. В то же время толщина используемых подложек была значительно больше пробега ионов пучка. Морфологию поверхности облученных материалов исследовали методами оптической микроскопии на микроскопах „Neophot-2“, „Биолам“, а также на атомно-силовом микроскопе „Solver Pro“.

Типичное АСМ изображение поверхности системы „Al пленка–ситалл“ после воздействия МИП с плотностью тока 20 A/cm^2 на пленку толщиной 60 nm показано на рис. 1. Воздействие МИП приводит к образованию на поверхности подложки дискообразных частиц алюминия. Характерные параметры образующихся частиц (наиболее вероятные диаметр d , высота h и средняя поверхностная плотность частиц n) после воздействия МИП с различными плотностями тока на пленки Al разной толщины представлены в таблице. Образование этих частиц происходит за счет сбора металла с прилегающих областей подложки. Экспериментально измеренные размеры частиц находятся в

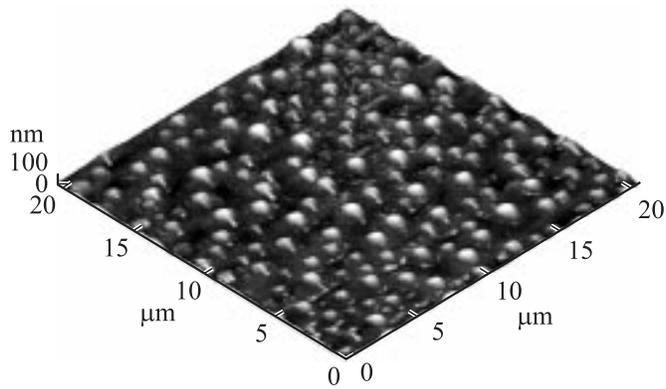


Рис. 1. АСМ изображение поверхности системы „Al пленка–ситалл“ после однократного воздействия МИП с плотностью тока 20 A/cm^2 .

удовлетворительном согласии с оценками, полученными из заданной толщины Al пленки и поверхностной плотности образующихся частиц. Облучение пленки Al толщиной 60 nm МИП с более низкой величиной плотности тока (10 A/cm^2) приводит к появлению на поверхности подложки наряду с отдельными частицами участков сплошной пленки с сильно деформированной поверхностью. Размер этих участков составляет $1\text{--}1.5 \mu\text{m}$. Их появление, вероятно, связано с недостаточным нагревом пленки такой толщины МИП данной плотности и соответственно малым временем нахождения Al в жидком состоянии. При плотности тока 10 A/cm^2 уменьшение толщины Al пленки приводит к существенному снижению размеров образующихся частиц, однако при

Режимы облучения и параметры образующихся частиц

Материал пленки (толщина, nm)	Плотность тока пучка, A/cm^2	d , nm	h , nm	n , cm^{-2}
Al (60)	20	810	100	$4.2 \cdot 10^7$
Al (60)	10	250	52	$8.5 \cdot 10^7$
Al (20)	10	190	25	$5 \cdot 10^8$
Ni (15)	10	475	85	$1.2 \cdot 10^8$
Ni (5)	10	84	48	$3.5 \cdot 10^9$

этом появляется значительное количество конгломератов, состоящих из нескольких частиц. Это, возможно, связано с тем, что при малых толщинах Al пленки усиливается влияние на подвижность расплава имеющегося на алюминии естественного оксида Al_2O_3 . Увеличение числа импульсов облучения МИП приводит к уменьшению размеров образующихся частиц из-за испарения алюминия (если при этом достигается температура интенсивного испарения Al), но при этом уменьшается поверхностная плотность частиц, главным образом за счет уменьшения числа частиц, имеющих наименьший диаметр.

Использование в качестве материала пленки — никеля, имеющего более высокую температуру плавления (1726 К), позволяет при воздействии МИП реализовать условия, при которых возможно более сильное взаимодействие расплава с поверхностью подложки. АСМ изображения поверхности системы „Ni пленка–ситалл“ после воздействия МИП с плотностью тока 10 A/cm^2 на Ni пленки различной толщины показаны на рис. 2. Характерные параметры образующихся частиц также представлены в таблице. Видно, что в обоих случаях наиболее вероятная высота образующихся частиц существенно превышает толщину исходной Ni пленки. Формирование столь высоких (по отношению к толщине пленки) частиц может быть связано с взаимодействием расплава никеля с размягченным под действием МИП поверхностным слоем подложки. При затвердевании никеля возникают механические напряжения, которые вызывают деформацию размягченного поверхностного слоя подложки и приводят к образованию частиц из материала подложки, покрытых слоем никеля.

Выделение энергии МИП непосредственно в пленках Al и Ni используемых в работе толщин является очень малым (особенно для Ni) и не достаточным для плавления из-за незначительных потерь энергии пучка в пленке. Это связано с тем, что толщина пленок значительно меньше величины проективных пробегов ионов углерода и протонов с энергией 300 keV, которые составляют в алюминии 573 и 2763 nm, а в никеле 270.6 и 1329.9 nm соответственно [5]. Поэтому подавляющая доля энергии МИП выделяется в приповерхностном слое подложки. В случае Al, имеющего достаточно низкую температуру плавления 933 К (меньшую, чем температура плавления подложки), возможно плавление пленки из-за подвода тепла из более нагретой подложки. Однако подобный механизм плавления пленки без значительной деформации поверхностного слоя подложки маловероятен в случае Ni,

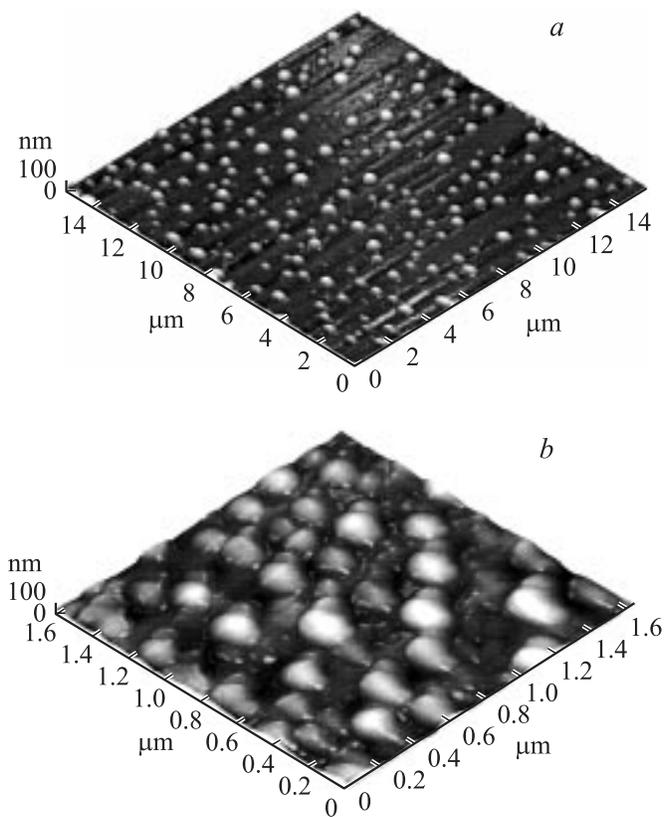


Рис. 2. АСМ изображение поверхности системы „пленка–ситалл“ после однократного воздействия МИП с плотностью тока 10 A/cm^2 на пленку Ni толщиной 15 nm (a) и 5 nm (b).

имеющего более высокую температуру плавления, чем подложка. Наиболее вероятным механизмом плавления ультратонких пленок Ni на ситалле под действием МИП и инициирования процесса несмачивания расплавом подложки является механизм, предложенный в [6] для объяснения процесса плавления и несмачивания 3–10 nm пленок Pt на SiO_2/Si при облучении непрерывным пучком ионов Kr^+ с энергией 800 keV.

Согласно этому механизму, потери энергии высокоэнергетичного иона за счет взаимодействия как с электронной системой, так и с ядрами решетки приводят к местному нагреву и к локальному плавлению вдоль трека иона. Локальное плавление на поверхности может привести к существенным изменениям в морфологии пленки, поскольку большие температурные градиенты приводят к градиентам в поверхностном натяжении и локальному давлению, вызывая этим поток массы.

Таким образом, выбором толщины металлической пленки, плотности ионного тока МИП и числа импульсов облучения можно сформировать на поверхности диэлектрической подложки металлические частицы, имеющие нанометровый размер. При использовании в качестве покрытия металла, имеющего более высокую температуру плавления, чем подложка, происходит образование частиц, включающих в себя и металл, и материал подложки.

Список литературы

- [1] *Henley S.J., Carey J.D., Silva S.R.* // *Phys. Rev.* 2005. V. B72. P. 195408.
- [2] *Favazza C., Kalyanaraman R., Sureshkumar R.* // *Nanotechnology.* 2006. V. 17. P. 4229–4234.
- [3] *Ковивчак В.С., Попов Е.В., Панова Т.К., Бурлаков Р.Б.* // *ФХОМ.* 2002. № 2. С. 31–33.
- [4] *Ковивчак В.С., Панова Т.К., Бурлаков Р.Б., Геринг Г.И.* // *Поверхность.* 2007. № 7. С. 95–97.
- [5] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А.* и др. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск, 1980. 352 с.
- [6] *Hu X., Cahill D.G., Averback R.S.* // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. N 12. P. 7777–7783.