

10;11;12

ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА МЕТАЛЛЫ

© Г.Е.Ремнев, А.Н.Закутаев, Ю.Ф.Иванов,
М.В.Матвиенко, А.В.Потемкин

Воздействие мощных ионных пучков (МИП) наносекундной длительности на металлы с плотностью мощности $P > 10^7 - 10^8$ Вт/см² сопровождается образованием пароплазменного облака, имеющего температуру ~ 1 эВ, расширяющегося со скоростью $\sim 10^6$ см/с [1-3]. Пороговая плотность мощности $P_{пор}$, при которой происходит взрыв поверхностного слоя, определяется теплофизическими характеристиками мишени, скоростью поглощения энергии. Использование пароплазменного облака для осаждения тонких пленок имеет ряд особенностей: высокая импульсная скорость осаждения пленки $\sim 0.1 - 1$ см/с; узкая угловая направленность движения плазмы, зависящая от параметров пучка, например, для легкоплавких металлов Ti, Zr, Pb она составляет $20 - 30^\circ$ [3]; возможность получения пленок на большой площади $\geq 20 - 100$ см², макрооднородных по толщине. Эти особенности использованы уже при получении высокого качества пленок ZnS [1], композитных из высокотемпературной сверхпроводящей керамики [4,5], алмазоподобных пленок [6].

В данной работе приводятся результаты исследований по получению пленок из тугоплавких металлов Nb, Mo, Ta, W толщиной $\sim 0.02 - 0.5$ мкм. Основное внимание уделено образованию макродефектов пленки. В исследованиях использован ускоритель "Темп-2" с параметрами МИП: энергия ионов < 400 кэВ, длительность импульса 60 нс, плотность тока на мишени выше 200 А/см², частота следования импульсов 10 мин⁻¹. Число импульсов тока на мишени варьировали от 1 до 50. Схема напыления пленок была аналогична используемой для получения пленок из легких металлов [4]. Остаточное давление в камере $> 10^{-5}$ мм рт.ст. В качестве подложек использовалось стекло, монокристаллический кремний и NaCl. Для анализа структуры пленки применялся электронный просвечивающий микроскоп ЭМ-125 К, для измерения толщины — эллипсометр ЛЭФ-3М.

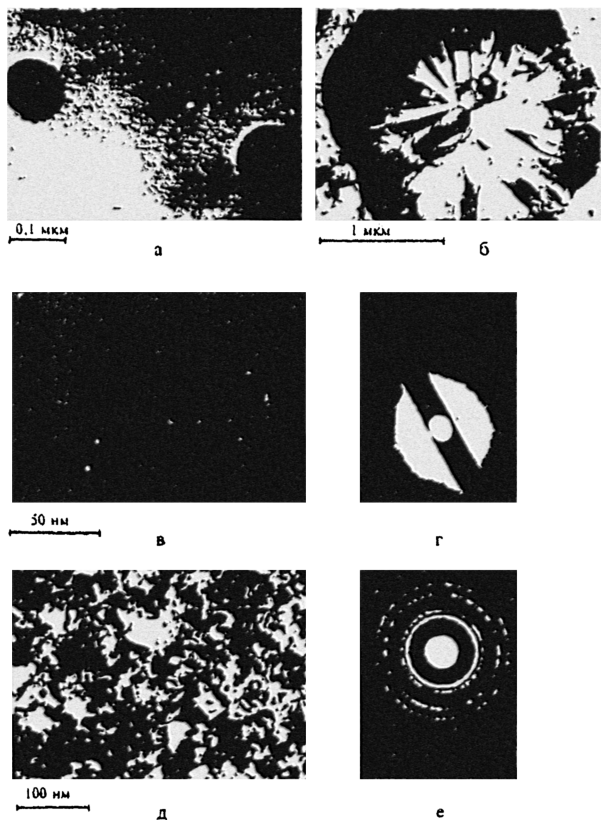


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры пленок Ta (а), Al (б), W (в, г), Cu (д, е). Число импульсов $n = 1$.

Независимо от распыляемого металла осаждаемые пленки являются макросплошными объектами: макроразрывы и макротрещины не обнаружены.

Макромасштабный уровень структуры пленок при указанных выше параметрах пучка характеризуется наличием плотных монокристаллических образований квазисферической формы — дефекты I рода (рис. 1, а), поликристаллических образований, имеющих форму усеченной сферы, вздутия пленки, пузыри — дефекты II рода (рис. 1, б) и отверстий округлой формы (рис. 1, в), образовавшихся в результате разрушения дефектов II рода. Размеры перечисленных выше дефектов пленки изменяются в пределах от 0.02 до 0.5 мкм.

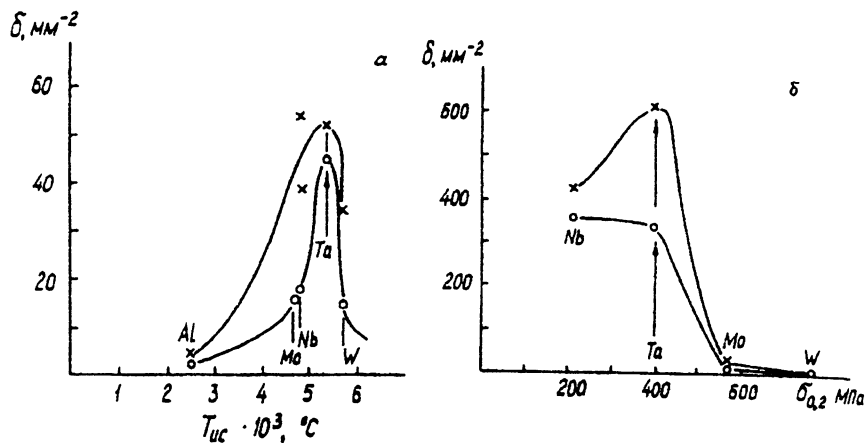


Рис. 2. Зависимость плотности дефектов I рода (а) и II рода (б) от температуры испарения $T_{ис}$ и величины предела текучести $\sigma_{0.2}$ элемента. Число импульсов $n = 1$.

Можно предположить, что дефекты I рода являются продуктами распыления мишени. Плотность на единице поверхности пленки (δ), оцененная по соотношению

$$\delta = \frac{N}{S} M,$$

где N — число дефектов на площади S пленки, M — увеличение микрофотографии, зависит от распыляемого элемента. Из представленного на рис. 2, а графика следует, что с ростом температуры испарения металла плотность дефектов I рода нарастает, достигая максимума для Ta, и далее убывает.

Природа образования дефектов II рода, на наш взгляд, связана с разогревом локальных микрообластей на подложке, например диэлектрических и легкоплавких включений, налетающей плазмой, температура которой может достигать ~ 1 эВ для наших экспериментов. Образующаяся газовая фаза отрывает осажденную пленку от подложки, формируя полусферу — “пузырь”. Плотность дефектов II рода и их размеры определяются распыляемым элементом. Так, на пленках алюминия размеры данных образования могут достигать $\sim 1-2$ мкм; в случае пленок вольфрама полусферы вырождаются в отверстия. Данные наблюдения дают основание считать, что размеры полусфер и их плотность могут характеризовать механическое состояние напыляемой пленки. На рис. 2, б представлены результаты, демонстрирующие зависимость плотности дефектов II рода от предела

текучести материала. Отчетливо видно, что с ростом величины $\sigma_{0,2}$ плотность полусфер резко снижается, исчезая для пленок вольфрама.

Предположив образование дефектов II рода путем вздувания осажденной пленки газовой фазой подложки, следует ожидать появление эффектов деформирования данных участков материала. На рис. 1, б представлена микрофотография пленки Al, демонстрирующая структуру дефекта. Отчетливо видны столбчатые кристаллы-зерна, образовавшиеся, очевидно, в результате процесса динамической рекристаллизации сильно деформированного газовой фазой подложки участка пленки (полусферы). Прилегающая к полусфере пленка (рис. 1, б) также обладает зеренной структурой, но размеры зерен здесь в несколько десятков раз меньше размеров зерен полусферы.

Необходимо отметить, что вопрос о природе образования дефектов I и II рода требует дополнительных исследований. С нашей точки зрения, на их формирование существенное влияние могут оказывать параметры плазмы, образующейся на поверхности распыляемой мишени, а именно: плотность, температура и скорость потока плазмы, которые, в свою очередь, зависят от плотности мощности в пучке и теплофизических характеристик мишени. Структура непосредственно самой пленки как таковой характеризуется наноразмерным масштабным уровнем.

Проведенные исследования показали, что пленка вольфрама представляет собой квазиаморфный материал (рис. 1, в, г) с размером областей кристалличности $\sim 1.5 \dots \text{нм}$. По мере перехода к более легкоплавким материалам степень аморфности пленок снижается и увеличиваются размеры кристаллитов (рис. 1, д, е). Для меди и алюминия осажденные пленки представляют собой поликристаллический агрегат с размером кристаллитов уже $\sim 100 \text{ нм}$.

Проведенные электронно-микроскопические структурно-фазовые исследования показывают, что МИП может быть использован для формирования пленок тугоплавких металлов с нанокристаллической структурой. Плотность дефектов I рода можно уменьшить, добиваясь оптимального соотношения плотности мощности в пучке и теплофизических характеристик мишени. Количество дефектов II рода, зависящее от наличия загрязнений и микровключений на поверхности подложки, значительно уменьшается при ее очистке.

Список литературы

- [1] Shimotori Y., Yokoyama M., Isobe H., Harada S., Masugata K., Yatsui K. // J. of Appl. Physics. 1988. V. 63.N 3. P. 968-970.
- [2] Баранов С.В., Грибанов К.Г., Пак В.С., Ремнев Г.Е. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. В. 8. С. 1016-1020.
- [3] Zakutayev A.N., Remnev G.E., Isakov I.F. // Proc. 10-th Intern. Conf. on High-Power Particles Beams. W. Rix and R. White Eds. NTIS, Springfield, VA, 1994. P. 840-843.
- [4] Goncharov O.I., I.F. Isakov, Remnev G.E. et al. // Proc. 8-th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. World Scientific Publishing Co., 1991. V. II. P. 1243.
- [5] Masugata K., Sonogawa T., Ohashi M. et al. Ref. N 4. P. 1254.
- [6] Johnson G.P., Tiwari P., Rej D.J. et al. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 10. P. 5949-5954.

Поступило в Редакцию
16 февраля 1996 г.
