

Из (5) можно сделать вывод, что ослабление числа бета-частиц с первоначальной энергией E_0 за счет обратного кулоновского рассеяния происходит по закону, близкому к экспоненциальному. Действительно, поскольку

$$E_0^{\alpha-2} - \left(E_0^\alpha - \frac{B}{\rho} \chi \right)^{\frac{\alpha-2}{\alpha}} \cong - \frac{\alpha-2}{\alpha} \frac{B}{\rho} E_0^{\alpha-2} \frac{\chi}{E_0^\alpha} = - \frac{\alpha-2}{\alpha} \frac{B}{\rho} \frac{\chi}{E_0^2},$$

то

$$I(\chi) \cong I_0 \exp \left[- \frac{\pi Z^2 e^4}{4} \frac{N_A}{A} \frac{\alpha}{\alpha-2} \frac{\rho}{B} \frac{\alpha-2}{2} \frac{\beta}{\rho} \frac{\chi}{E_0^2} (-1) \right] = \\ = I_0 \exp \left(- \frac{\pi Z^2 e^4}{4} \frac{N_A}{A} \frac{\chi}{E_0^2} \right).$$

Поскольку ионизационные потери стабилизируют форму непрерывного энергетического спектра бета-частиц в широком диапазоне толщин поглотителей, то экспоненциальный закон ослабления выполняется и для непрерывного спектра. Отклонения от него можно ожидать при небольших толщинах поглотителей (переходная область от исходного бета-спектра к стабилизированной форме) и больших толщинах поглотителей, когда действие обратного кулоновского рассеяния ужесточает спектр. Эти выводы согласуются с экспериментальными результатами.

Если далее учесть, что ионизационные потери для равных поверхностных толщин примерно одинаковы для всех веществ, то измерение массовых коэффициентов поглощения для легких и тяжелых поглотителей позволяет разделить вклад ионизационных потерь и кулоновского рассеяния.

Таким образом, совместный учет влияния ионизационных потерь и обратного кулоновского рассеяния позволяет объяснить особенности энергетических спектров бета-частиц при прохождении через поглотители варьируемой толщины, экспоненциальный характер ослабления числа бета-частиц и область выполнения экспоненциального закона ослабления.

Список литературы

1. Стародубцев С. В., Романов А. М. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент, 1962.
2. Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов / Пер. с англ. М., 1979.

Поступила в редакцию 20.10.86.

УДК 669.039.61

В. П. ГОЛЬЦЕВ, Г. Д. КАРПЕНКО, В. А. ЛОЙКО,
В. М. ДРАКО, В. В. ХОДАСЕВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОСАЖДЕНИИ

При взаимодействии потока ионизированных частиц с твердым телом в его поверхностных слоях протекает ряд сложных физических процессов, характер которых определяется типом ионов и их энергией. Так, при энергиях порядка десятков — сотен кэВ происходит имплантация ионов; при энергиях от единиц до десятков кэВ преобладающим процессом, кроме имплантации, является распыление; при энергиях порядка сотых — десятых долей кэВ происходит конденсация вещества из ионного пучка при одновременном, но вяло выраженном процессе распыления поверхности [1]. Наличие такой связи энергии ионов с характером взаимодействия с поверхностью твердого тела послужило основанием для разработки физических методов нанесения покрытий осаждением из плазмы [2].

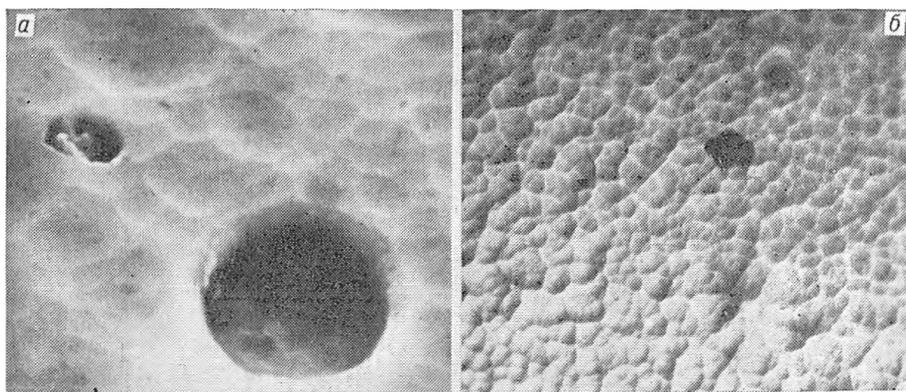


Рис. 1. Топография поверхности образцов после ионного травления Ti^+ (а) и нанесения покрытия $Ti(NC)$ (б); $\times 10000$

Покрyтия со структурой карбонитрида титана наносили на поверхность образцов из армо-Fe методом конденсации из плазмы электродугового разряда (с интегрально-холодным расходуемым титановым катодом) с ионной бомбардировкой в атмосфере особо чистого азота, насыщенного парами бензола.

Процесс состоял из двух стадий: очистки поверхности в результате ее распыления под воздействием потока ионов титана и осаждения из потока плазмы ионизированных титана, азота и углерода с формированием на поверхности конденсации карбонитрида титана.

На первой стадии при бомбардировке ионами титана с энергией 1—1,5 кэВ и распылении поверхности наблюдается преимущественное травление зерен армо-Fe с образованием рельефа в виде гребней по межзеренным границам (рис. 1, а). По мере изменения тока дуги в процессе очистки возможно изменение интенсивности внедрения или конденсации ионов титана с образованием обогащенного по титану слоя (рис. 2, а). Наличие тонкого титанового подслоя, как показали проведенные исследования, увеличивает адгезионную прочность покрытия из карбонитрида титана [3].

Повышение тока дуги, кроме того, приводит к возрастанию интенсивности осаждения на поверхности конденсации капельной фазы (см. рис. 1, а). При этом капли титана, конденсирующиеся на начальных эта-

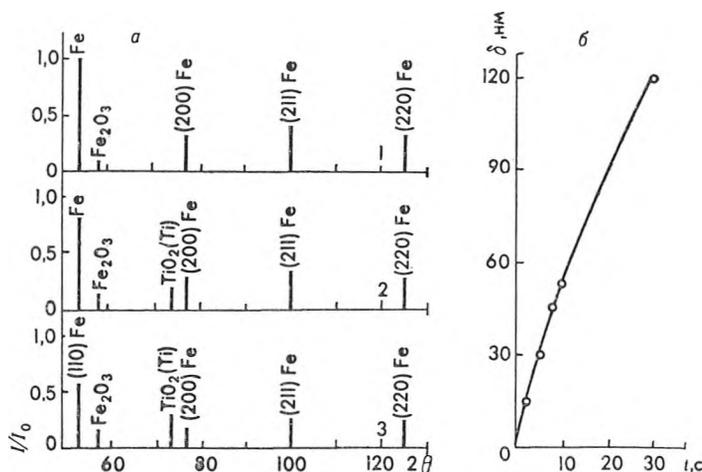


Рис. 2. Штрих-рентгенограммы поверхности образцов после ионной очистки Ti^+ (а) (исходный образец — 1; ток дуги 80 А — 2 и 120 А — 3) и зависимость толщины слоя, насыщенного титаном, от времени ионной очистки (б)

пах процесса ионной очистки практически на холодную основу, имеют пониженную прочность сцепления с ней. В дальнейшем, при ионной бомбардировке, происходит активация диффузионных процессов в результате повышения температуры образца (термическая активация) и генерация дефектов структуры (радиационно-стимулированная активация). Конденсированные на этом этапе частицы капельной фазы, как правило, характеризуются более прочным сцеплением с поверхностью материала. Тем не менее, как показали эксперименты, капли, осажденные при ионной очистке, являются в процессе трения и износа очагами разрушения покрытий вследствие относительно низкой прочности сцепления и механических характеристик материала [4].

Увеличение времени ионной очистки вызывает рост толщины поверхностного слоя подложки, насыщенного атомами титана (см. рис. 2, б). Насыщение происходит за счет внедрения ускоренных ионов и протекающих диффузионных процессов с участием капельной фазы титана.

На второй стадии, в процессе нанесения собственно тонкопленочных покрытий, в рабочую камеру с горящей дугой, формирующей титановую плазму, подавалась паро-газовая смесь азота с бензолом. Высокая энергия плазменного потока, возбужденное состояние отдельных компонент (N и C) обуславливают протекание на поверхности конденсации плазмо-химических реакций прямого синтеза карбонитрида титана при сравнительно низких, порядка 450—550 К, температурах.

Следует отметить, что уже небольшое давление реакционного газа (порядка $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па) в камере приводит к снижению каплеобразования (см. рис. 1, б). Обнаруженный эффект можно объяснить образованием на рабочей поверхности плазмообразующего катода тончайших слоев тугоплавких соединений, а также созданием «противодавления» на ванночку расплавленного металла под катодным пятном и уменьшением плотности тока разряда в катодном пятне.

Характерный рельеф поверхности, сформировавшийся при ионной очистке, не только сохраняется, но и принимает при осаждении покрытия еще более развитую форму в виде хаотически чередующихся гребней и впадин.

Список литературы

1. Дороднов А. М., Петросов В. А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 2. С. 520.
2. Аксенов И. И., Андреев А. А. // УФЖ. 1979. Т. 24. С. 515.
3. Карпенко Г. Д., Лойко В. А., Гарькавая Т. К. // Порошковая металлургия. 1986. Вып. 10.
4. Анищик В. М., Гольцев В. П., Карпенко Г. Д., Лойко В. А. // Физика и технология упрочнения поверхности металлов: Тез. докл. Всесоюз. конференц. Физ.-технол. проблемы поверхности металлов. Л., 1984.

Поступила в редакцию 17.11.87.

УДК 681.51-192

НГУЕН ТХИ ВЬЕТ ХЫОНГ

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Внутренние межэлементарные соединения активных структур современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем выполняются путем нанесения алюминиевой пленки толщиной около 1 мкм на поверхность кристалла с последующей фотолитографией в соответствии с топологией разводки. Если эта проводящая пленка структурно неоднородна, то при протекании электрического тока повышенной плотности (j_0) на границе кристаллических зон, различающихся средним размером зерен, в определенных условиях вследствие электромиграции может постепенно возникнуть трещина. Эта трещина будет вызывать разрыв про-