

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ TiSiN ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ РАСПЫЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ ИЗ Ti И Si ИОНАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКОМ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМЫ

В.А. Белоус, В.М. Лунёв, Г.И. Носов, А.С. Куприн, Г.Н. Толмачёва, И.В. Колодий

Национальный Научный центр "ХФТИ" (Харьков)

Украина

Поступила в редакцию 09.12.2013

Отработана методика легирования TiN покрытий путём одновременного распыления мишеней из Ti и Si ионами азота и аргона, генерируемыми источником газовой плазмы (ИГП). Наибольшее значение твёрдости (~33 ГПа) достигалось при $C_{Si} \sim 7$ вес %. За счёт образования на поверхности Ti и Si стойких к распылению соединений скорость их травления снижалась, по сравнению с распылением в чистом аргоне, соответственно, в ~10 и ~7 раз. Рентгеноструктурный анализ показал, что на поверхности Ti мишени присутствует гексагональный нитрид титана ($TiN_{0,3}$). На дифрактограмме Si мишени присутствует только одна линия Si (111). Глубина модифицированного слоя для Ti составляла более 3 мкм, а для Si < 0,5 мкм.

Ключевые слова: титан, кремний, плазма, азот, аргон, ионы, распыление, покрытие, твёрдость, диффузия.

СИНТЕЗ TiSiN ПОКРИТТІВ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ РОЗПИЛЕННІ МІШЕНЕЙ З Ti ТА Si В АЗОТ-АРГОНОВІЙ ПЛАЗМІ

В.А. Білоус, В.М. Луньов, Г.І. Носов, О.С. Купрін, Г.М. Толмачова, І.В. Колодій

Відпрацьована методика легування TiN покриттів шляхом одночасного розпилення мішеней з Ti та Si іонами азоту і аргону, генерованими джерелом газовой плазми (ДГП). Найбільше значення твердості (~33 ГПа) досягнуто при $C_{Si} \sim 7$ ваг. %. За рахунок утворення на поверхні Ti та Si стійких до розпилення сполук швидкість їх травлення знижувалася, порівняно з розпиленням в чистому аргоні, відповідно, в ~10 та ~7 разів. Рентгеноструктурний аналіз показав, що на поверхні Ti мішені присутній гексагональний нітрид титану ($TiN_{0,3}$). На дифрактограмі Si мішені присутня тільки одна лінія Si (111). Глибина модифікованого шару для Ti становила понад 3 мкм, а для Si < 0,5 мкм.

Ключові слова: титан, кремній, плазма, азот, аргон, іони, розпилення, покриття, твердість, дифузія.

SYNTHESIS OF TiSiN COATINGS BY SIMULTANEOUS SPUTTERING OF Ti AND Si TARGETS IN NITROGEN-ARGON PLASMA

V.A. Belous, V.M. Lunev, G.I. Nosov, A.S. Kuprin, G.N. Tolmachova, I.V. Kolodiy

Technique of doping TiN coatings by simultaneous sputtering of Ti and Si targets by nitrogen and argon ions generated from the gas plasma source (GPS) was developed. The highest value of hardness (~33 GPa) was achieved at the $C_{Si} \sim 7$ wt%. The etching rate of Si and Ti, compared to sputtering in pure argon, are decreased due to the formation on their surfaces resistant to sputtering compounds ~10 and ~7, respectively. XRD analysis showed that the surface of the Ti target contains hexagonal titanium nitride ($TiN_{0,3}$). At diffractogram of Si target there is only one line of Si (111). The depth of the modified layer of Ti is over 3 mm and for Si < 0,5 microns.

Keywords: titanium, silicon, plasma, nitrogen, argon, ions, sputtering, coatings, hardness, diffusion.

ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные наноструктурные нитридные покрытия на основе двух или более металлов, такие как, например, TiAlN [1, 2], TiSiN [1, 3 – 6] или TiAlN с добавками Si и Y [1] обладают более высокими физико-механическими характеристиками, по сравнению

с однокомпонентными, – жаростойкостью [1], повышенной стойкостью к износу трением и ионному распылению [6]. Для получения таких покрытий используют различные методы.

Так, в работе [4] приведены результаты исследования плёнок из нитридов Ti, легиро-

ванных Si, осаждённых в плазме ВЧ разряда в газовой среде, состоящей из H_2N_2 , $TiCl_4$ и SiH_4 (CVD метод). Наибольшее значение твёрдости для TiSiN плёнок (~50 ГПа) имело место при содержании Si в покрытии ~4,7 вес %, при этом размер кристаллитов составлял около 3 нм. К недостатку данного способа осаждения следует отнести наличие в газовой смеси токсичных соединений $TiCl_4$ и SiH_4 .

Большая часть публикаций по получению и исследованию характеристик сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий посвящена работам с применением вакуумно-дугового метода [1, 5 – 7, 8]. Так, в работах [1, 5 – 7] для получения покрытий TiSiN использовался вакуумно-дуговой источник с катодом из композита TiSi с содержанием Si ~ 4 ÷ 5 вес.%. При увеличении содержания Si в таких покрытиях от 1 до 2,4 вес.% их твёрдость возрастала от 34,5 до 35,7 ГПа при твёрдости покрытия TiN 33,3 ГПа. Такие конденсаты показали повышенную стойкость к абразивному износу и ионному распылению. К недостатку данного метода следует отнести присутствие в конденсируемом покрытии капель и низкий коэффициент использования распыляемого материала из-за потерь при транспортировке плазменного потока от катода к подложке. Так, при осаждении покрытий из Ti на поверхность образцов площадью $1,5 \cdot 10^4$ мм² отношения конденсируемой массы к распыляемой составляют для вакуумно-дугового источника и ИГП, соответственно, 3 и 21% [10].

В работе [3] исследовались свойства TiSiN плёнок полученных путём одновременного распыления мишеней из Ti и Si. Распыление Ti осуществлялось в магнетроне на постоянном токе, а Si – ВЧ магнетроном. Плёнки осаждались в смеси Ar с N_2 в соотношении 8/2 при давлении смеси $5 \cdot 10^{-1}$ Па. Скорость осаждения покрытий составляла (1,2 ÷ 1,6) мкм/час. Фаза Si_3N_4 и силициды Ti в покрытиях не обнаружены при использовании рентгеноструктурного анализа. Предполагается, что кристаллы TiN покрыты слоями SiN_x в аморфной фазе. Наибольшее значение твёрдости (~34 ГПа) наблюдалось при содержании Si в покрытиях на уровне 10 вес.%.

Расширение областей применения наноструктурных покрытий стимулировало ис-

следования и разработки методов их осаждения. Одним из способов получения бескапельных плёнок, в отличие от вакуумно-дуговых, является распыление материала мишени высокоэнергетичными ионами, генерируемыми источником газовой плазмы с термоэмиссионным катодом (ИГП) [9, 10]. В работе [10] с помощью такого источника были синтезированы бескапельные покрытия из Cu, Ti и TiN. Скорость их осаждения составляла, соответственно, 12; 5,5 и 3 мкм/час. Твёрдость покрытий из TiN была равна 33 ГПа, в то время как для вакуумно-дугового метода в прямом потоке ~28,5 ГПа. Помимо обеспечения более эффективного использования распыляемого материала, в сравнении с вакуумно-дуговым методом [10], он имеет широкие возможности независимого регулирования параметров процесса и, соответственно, более тонкого управления структурой плёнок, чем в магнетронах.

В настоящей работе приведены результаты исследований, выполненные в продолжение работ опубликованных ранее [10]. Целью работы являлась отработка методики легирования покрытий из TiN малыми добавками. В качестве легирующего компонента был выбран Si. Изучалось влияние содержания кремния в покрытиях на их твёрдость. Поскольку, за счёт образования на поверхности Ti мишени стойких к ионному распылению соединений происходит снижение скорости её травления и, соответственно, скорости осаждения покрытий, то рентгеноструктурным анализом определялся тип таких соединений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по получению покрытий из TiN, легированные Si, проводились на установке, описанной ранее в работе [10]. Она содержала источник газовой плазмы в виде трубчатого анода диаметром 200 и длиной 380 мм и вольфрамовый термокатод. Снаружи анода располагалась фокусирующая катушка, создающая магнитное поле величиной до 50 Э. Ток накала вольфрамовой спирали составлял ~100 А. Эксперименты проводили при положительном потенциале анода в интервале +40 ÷ +50 В и токе разряда 30 ÷ 50 А. В качестве рабочего газа использовалась смесь

N_2 и Ag в соотношении 1/1 при суммарном давлении $(4 \div 5) \cdot 10^{-1}$ Па. Источник работал следующим образом. При напуске в систему рабочего газа зажигался дуговой разряд низкого давления. Плазма, генерируемая разрядом, направлялась на мишень плазмо-оптической системой. Расстояние между анодом и мишенью составляло – 50 мм. Титановая мишень имела форму прямоугольника площадью $\sim 1,8 \cdot 10^4$ мм² и толщину $\sim 1,5$ мм. В центре Ti мишени располагались пластины из кремния толщиной 0,5 мм. Концентрация Si в покрытиях задавалась площадью кремневой мишени. К мишени прикладывался отрицательный потенциал, равный –400 В. Распыляемые атомы мишени осаждались на образцы из нержавеющей стали размером 10×20 мм² и толщиной 1,5 мм. Образцы крепились на подложкодержателе из нержавеющей стали длиной 150 и шириной 15 мм с отбортовкой в сторону противоположную аноду. Напыляемая сторона образцов была обращена к мишени на расстоянии от неё, равном 30 мм. На подложку подавался отрицательный потенциал –100 В. Измерение температуры образцов и мишени проводились хромель-алюмелевой термопарой. В зависимости от потенциала анода и разрядного тока температура мишени изменялась от 600 до 750 °С. В ходе экспериментов определяли скорость травления материалов мишени (Ti и Si) и скорость осаждения покрытий. Измерения скорости осаждения проводились методом “теневого ножа” на микроинтерферометре МИИ-4, а также гравиметрическим методом. Твёрдость и модуль Юнга покрытий измеряли с помощью наноиндентера G200 методом CSM до глубины внедрения индентора Берковича ~ 200 нм. Состав покрытий TiSiN определялся методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) на приборе “СПРУТ”.

Ранее в работе [10] отмечалось, что при распылении Ti-мишени в ИГП более низкие скорости осаждения покрытий из TiN, по сравнению с Ti, обусловлены образованием на поверхности мишени эрозионностойких соединений. Для определения типа этих соединений были проведены рентгеноструктурные исследования титановых и кремниевых

мишеней после их одновременного распыления ионами аргона и азота при синтезе TiSiN покрытий. Исследования образцов мишеней проводились на дифрактометре ДРОН-4-0,7. Дифрактограммы снимались как со стороны мишеней обращённых к ИГП (лицевая сторона), так и с обратной. Изменение твёрдости мишеней в зависимости от расстояния до их поверхности (толщина модифицированного слоя) определялось по глубине отпечатков на приборе ПМТ-3 при нагрузках 20; 50; 100 и 200 Г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для легирования покрытий из TiN кремнием сначала отработывалась методика его распыления ионами Ag^+ . Для распыления использовались пластины Si площадью 150 мм². К мишени прикладывался отрицательный потенциал величина которого варьировалась от –200 В до –500 В. Кремний относится к полупроводниковым материалам, для которых характерен рост проводимости при увеличении температуры по экспоненциальному закону. В отсутствие разряда, за счёт излучения термокатода температура кремния достигала ~ 200 °С. При увеличении потенциала от 0 до –400 В она возрастала до ~ 700 °С. За счёт увеличения температуры удельное электросопротивление, измеренное по току, проходящему через мишень, при постоянном значении потенциала, снижалось от $\sim 2 \cdot 10^4$ до $\sim 4 \cdot 10^2$ Ом·см, т.е. практически на 2 порядка. Необходимо отметить, что помимо нагрева за счёт ионной бомбардировки и теплового излучения от термокатода увеличение проводимости может быть вызвано также действием электрического поля и фотопроводимостью.

На рис.1 представлена зависимость скорости травления ($v_{тр}$) Si мишени ионами Ag от приложенного потенциала.

Из рис. 1 следует, что при изменении U_m от –200 до –400 В $v_{тр}$ возрастает от 5 до 20 мкм/час, т.е. в 4 раза и имеет практически линейную зависимость. Содержание Si в покрытиях TiSiN, как ранее отмечалось, варьировалось изменением площади Si мишени. На рис. 2 приведена зависимость концентрации Si в образцах с покрытиями, расположенны-

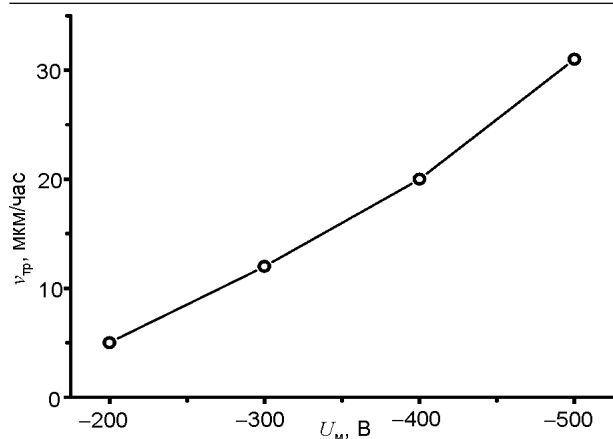


Рис. 1. Зависимость скорости травления ($v_{тр}$) Si мишени ионами Ag от приложенного к ней потенциала (U_m).

ми в направлении оси источника, от соотношения площадей распыляемых мишеней. Такая методика позволила варьировать концентрацию кремния от ~ 2,5 до 30 вес.%.

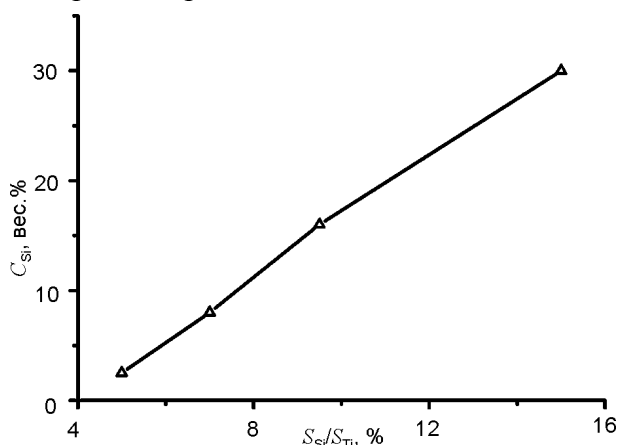


Рис. 2. Зависимость концентрации Si в покрытиях TiSiN от соотношения площадей Si и Ti мишеней.

Проводились также исследования радиального распределения потока распыляемого кремния относительно оси источника. Наибольшая концентрация Si наблюдалась в образцах, расположенных на оси источника (рис. 3). В зависимости от радиуса (с удалением от оси источника) содержание кремния в покрытиях TiSiN изменялось от 5 до 18 вес.%.

На рис. 4 приведена зависимость твердости покрытий TiSiN от содержания в них Si, полученных на образцах расположенных напротив оси источника. Максимальная твердость (~33 ГПа) наблюдалась при содержании Si в покрытии на уровне 7 вес.%. При дальнейшем увеличении концентрации кремния твердость уменьшается и при ~30 вес.% составляет 12 ГПа.

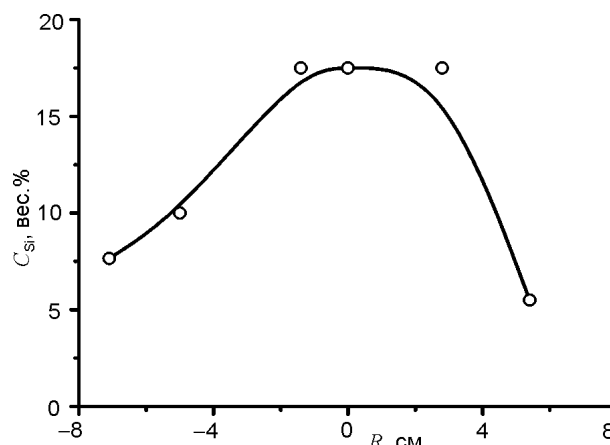


Рис. 3. Радиальное распределение содержания Si в покрытиях TiSiN относительно оси источника: $S_{Si}/S_{Ti} = 7,7\%$.

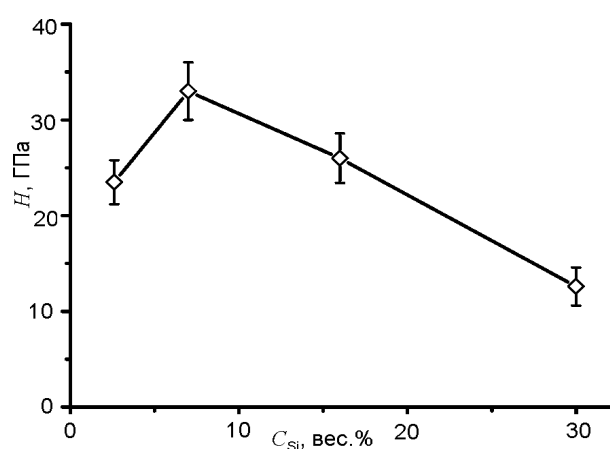


Рис. 4. Зависимость твердости покрытий TiSiN от содержания в них Si.

Скорость осаждения покрытий TiSiN при $C_{Si} \sim 7$ вес.% составляла 2,5 мкм/час. Следует отметить, что по сравнению с распылением Ti мишени в Ag скорость её травления с использованием газовой смеси Ar+N₂ снижалась от $5,6 \cdot 10^{-1}$ до $6,6 \cdot 10^{-2}$ г/мм²·час, т.е. приблизительно на порядок. По-видимому, это связано с образованием на её поверхности стойких к распылению соединений типа TiN/ Si_xN_y.

На рис. 5 представлена зависимость энергетической эффективности процесса распыления Si ионами Ag от приложенного потенциала.

Из рис. 5 следует, что с ростом потенциала от -200 до -400 В энергозатраты снижаются от ~18 до 5 кДж/мг, т.е. в 3,5 раза. Это связано с увеличением температуры Si и, соответственно, электрической проводимости. На этом же рис. 5 представлены энергозатраты на распыление Ti мишени в среде аргона и при осаждении покрытий TiN и TiSiN с

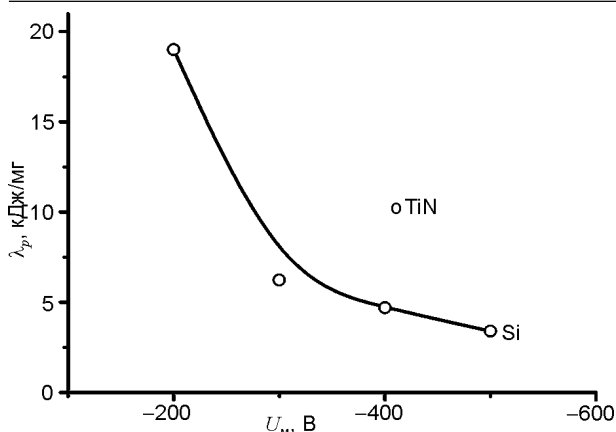


Рис. 5. Зависимость энергетической эффективности λ_p процесса распыления мишени из Si ионами Ar от приложенного потенциала U_m и λ_p мишени из Ti, распыляемой ионами Ar и ионами смеси Ar + N₂ при осаждении покрытий из Ti, TiN и TiSiN при $U_m = -400$ В.

использованием газовой смеси Ar + N₂ при $U_m = -400$ В. Более высокие значения энергозатрат на распыление Ti мишени, при формировании таких покрытий, является дополнительным подтверждением образования на их поверхности соединений стойких к распылению.

Для определения типа соединений, образующихся на поверхности Ti и Si мишеней после их совместного распыления ионами аргона и азота при осаждении TiSiN покрытий, рентгеноструктурному анализу подвергались образцы мишеней, обращённые к ИГП (лицевая сторона), так и, дополнительно, обратная сторона (тыльная). Температура мишени при $U_m = -400$ В составляла ~650 °С, а доза облучения ~1,6·10²¹ ион/см².

На дифрактограмме Ti мишени с лицевой стороны (рис. 6а) выявлены только линии гексагонального нитрида титана типа TiN_{0,3} (твёрдый раствор азота в титане). Параметры решётки составляют: $a = 0,29769$ нм; $c = 0,47751$ нм. Обратная сторона Ti мишени не экранировалась. Эта сторона за счёт расширения плазмы также подвергалась бомбардировке ионами. В отличие от лицевой стороны здесь обнаружены три фазы (рис. 6б):

1. гексагональный нитрид TiN_{0,3} ($a = 0,29764$ нм; $c = 0,47765$ нм; весовое содержание в образце – 66,2%);
2. кубический TiN ($a = 0,42262$ нм; весовое содержание – 8,3%);

3. тетрагональный нитрид Ti₂N (параметры решетки: $a = 0,49508$ нм; $c = 0,30301$ нм; весовое содержание в образце – 25,5%).

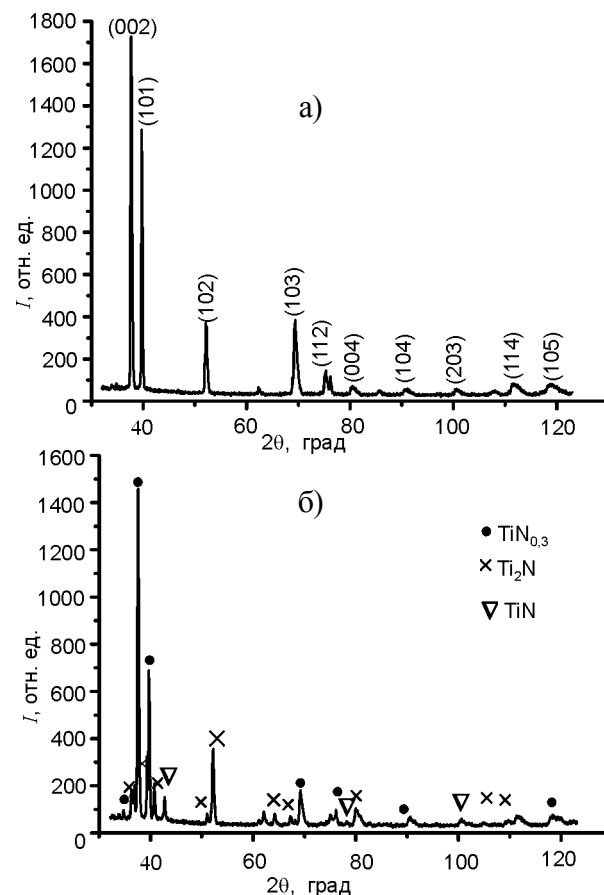


Рис. 6. Дифрактограмма Ti мишени: (а) – лицевая сторона, (б) – тыльная сторона.

У кремниевой мишени тыльная сторона экранировалась. На дифрактограммах кремниевой мишени с обеих сторон присутствует только одна линия кремния (111), а параметр решетки составляет 0,5434 нм. Следует отметить, что интенсивность линий с лицевой стороны, приблизительно в 4 раза ниже, чем с экранированной (тыльной). По-видимому, часть кремния на лицевой стороне расходуется на образование соединений с азотом, которые находятся в аморфном состоянии и рентгенографически не регистрируются.

На рис. 7 приведены результаты измерений микротвердости мишеней из Ti (кривые 2, 3) и Si (кривая 4) в зависимости от расстояния до поверхности после их распыления ионами аргона и азота при осаждении TiSiN покрытий. Из рис. 7 следует, что при глубине 0,2 мкм микротвердость поверхности титановой мишени, определенная микроиндентированием составляет ~22 ГПа, что прибли-

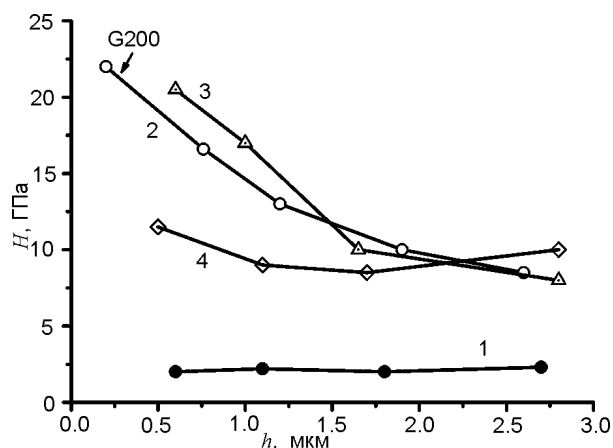


Рис. 7. Зависимость микротвёрдости (H) от расстояния (h) до поверхности мишеней после их распыления при осаждении TiSiN покрытий: 1 – исходный Ti; 2 – Ti (лицевая сторона); 3 – Ti (тыльная сторона); 4 – Si.

зительно в 10 раз выше, по сравнению с исходным образцом. Следует отметить, что за счет рассеяния плазмы тыльная сторона мишени также подвергалась бомбардировке газовыми ионами, причем микротвердость с этой стороны немного выше. По-видимому, это связано с присутствием на ней фаз TiN и Ti₂N, помимо гексагонального нитрида титана TiN_{0,3} (см. рис. 6). В то же время для лицевой и тыльной поверхностей титановой мишени наблюдается зависимость микротвердости от глубины замера. С увеличением глубины от 0,2 до 3 мкм микротвердость снижается приблизительно до 10 ГПа, что превосходит микротвердость мишени в исходном состоянии в 7 раз. На рис. 7 представлена также зависимость микротвердости от глубины для лицевой поверхности кремния после осаждения покрытий из TiSiN (кривая 4). Из рисунка следует, что, в отличие от титана, при глубине отпечатка примерно 0,5 мкм и более, микротвердость кремния практически не изменяется и составляет ~10 ГПа, что близко к микротвердости кремния в исходном состоянии, равной ~11,5 ГПа. Малая глубина модифицированного слоя связана, по-видимому, по сравнению с титаном с низким коэффициентом диффузии азота в кремнии. Так, для кремния при 700 °С коэффициент диффузии азота равен всего лишь ~10⁻¹⁷ см²/с [11], а для титана ~10⁻¹¹ см²/с [12]. Вместе с тем обработанная таким образом поверхность кремния обладает повышенной стойкостью к ионному распылению. Если для исходного

кремния скорость травления в аргоне при $v_m = -400$ В составляет примерно $4,7 \cdot 10^{-3}$ г/см²·час, то для модифицированного – $6,6 \cdot 10^{-4}$ г/см²·час, т.е. скорость травления снижалась примерно в 7 раз.

В табл. 1 приведены механические характеристики массивного TiN и покрытий из TiN и TiSiN, полученных с использованием ИГП. Как видно из таблицы, полученные с помощью ИГП покрытия, имеют значения H^3/E^2 , характеризующие сопротивление материала пластической деформации, и H/E – упругую деформацию разрушения, превосходящие таковые для массивного нитрида титана. Наилучшие результаты по этим параметрам имеют покрытия из TiSiN.

Таблица 1

Механические характеристики покрытий, полученных при распылении титановой мишени с использованием ИГП

Материал	C _{Si} , вес.%	H, ГПа	E, ГПа	H/E	H ³ /E ²	Упругое восстановление, %
TiN массивный	0	25,9	468	0,05	0,08	37
TiN [0]	0	33	478	0,69	0,157	–
Ti-Si-N	7	33	448	0,74	0,18	44

ВЫВОДЫ

1. Отработана методика легирования TiN покрытий путём одновременного распыления мишеней из Ti и Si с использованием ИГП.

2. Обнаружена экстремальная зависимость нанотвёрдости TiSiN покрытий от содержания в них кремния. Максимальная твёрдость ~33 ГПа) наблюдалась при концентрации кремния ~7 вес.%.

3. Концентрации кремния максимальна в образцах, расположенных на оси источника, и убывает при удалении от неё.

4. При осаждении покрытий TiN и TiSiN на поверхности мишеней из титана и кремния образуются стойкие к распылению соединения, что, по сравнению с распылением ионами Ag приводит к снижению скорости травления в ~10 и 7 раз, соответственно.

5. Рентгеноструктурными исследованиями показано, что на поверхности титановой мишени, обращённой к ИГП, присутствует гексагональный нитрид титана (TiN_{0,3}). На

дифрактограмме Si мишени присутствует только одна линия кремния (111).

6. Установлено, что глубина модифицированного слоя для титановой мишени составляет более 3 мкм, а для кремния <0,5 мкм, что обусловлено более низким коэффициентом диффузии азота в кремнии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксёнов И.И., Белоус В.А., Григорьев А.Н., Ермоленко И.Г., Заднепровский Ю.А., Коваленко В.И., Ломино Н.С., Маринин В.Г., Соболев О.В., Толмачёва Г.Н. Износостойкость и жаростойкость вакуумно-дуговых покрытий на основе TiN и TiAlN с добавками Si и Y// ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т. 98, № 4. – С. 169-173.
2. PalDey S., Deevi S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review// Mater. Sci. Eng. A.–2003.– Vol. 342.– P. 58-79.
3. Chawla V., Jayganthan R., Chandra R. A study of structural and mechanical properties of sputter deposited nanocomposite Ti-Si-N thin films// Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204. – P. 1582-1589.
4. Veprek S., Veprek-Heijman M.G.J. The formation and role of interfaces in superhard nc-MeN/б-Si₃N₄ nanocomposites//Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 6064-6070.
5. Аксёнов И.И., Белоус В.А., Голтвяница С.К., Голтвяница В.С., Заднепровский Ю.А., Куприн А.С., Ломино Н.С., Соболев О.В. Перенос и удержание кремния в Ti-Si-N-покрытиях в процессе вакуумно-дугового осаждения// ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение – 2010. – Т. 96, № 5. – С. 119-125.
6. Аксёнов И.И., Белоус В.А., Заднепровский Ю.А., Коваленко В.И., Ломино Н.С. Влияние малых добавок кремния на служебные характеристики нитрид-титановых покрытий //ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т. 98, № 4. – С. 145-149.
7. Аксёнов И.И., Белоус В.А., Голтвяница С.К., Голтвяница В.С., Заднепровский Ю.О., Куприн О.С., Ломино Н.С., Овчаренко В.Д. Перенос катодного материала в процессе вакуумно-дугового формирования покрытий//ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – № 2. – С. 181-184.

8. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твёрдых и сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий //УФН. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 35-64.
9. Belous V.A., Nosov G.I. Ion sputtering of metals in a system with a thermoionic inert gas plasma source//Proceeding of 6-th Symposium “TAFT-98” (Regensburg, Germany). – 1998. – P. 303-306.
10. Белоус В.А., Лунёв В.М., Носов Г.И., Толмачёва Г.Н. Исследование характеристик покрытий, синтезированных с помощью источника газовой плазмы//Физическая инженерия поверхности. – 2011. – Т. 9, № 4. – С. 256-262.
11. Качурин Г.А., Тыщенко И.Е. Поведение бора и азота в приповерхностном слое кремния при синтезе захороненных слоёв имплантацией ионов N⁺//Физика и техника полупроводников. – 1993. – Т. 27, Вып. 7. – С. 1194-1201.
12. Шаповалова О.М., Маркова И.А., Ивченко Т.И. Изменения в поверхностном слое сплава системы Ti–Al–V при газонасыщении //Металлознавство та термічна обробка металів. 2008. – № 3. – С. 18-23.

LITERATURA

1. Aksenov I.I., Belous V.A., Grigor'ev A.N., Ermolenko I.G., Zadneprovskij Yu.A., Kovalenko V.I., Lomino N.S., Marinin V.G., Sobol' O.V., Tolmacheva G.N. Iznosostojkost' i zharostojkost' vakuumno-dugovyh pokrytij na osnove TiN i TiAlN s dobavkami Si i Y//VANT. Ser.: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie.– 2011.– T. 98, № 4.– S. 169-173.
2. PalDey S., Deevi S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review// Mater. Sci. Eng. A.– 2003.– Vol. 342 – P. 58-79.
3. Chawla V., Jayganthan R., Chandra R. A study of structural and mechanical properties of sputter deposited nanocomposite Ti-Si-N thin films// Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204. – P. 1582-1589.
4. Veprek S., Veprek-Heijman M.G.J. The formation and role of interfaces in superhard nc-MeN/б-Si₃N₄ nanocomposites//Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 6064-6070.
5. Aksenov I.I., Belous V.A., Goltvyanica S.K., Goltvyanica V.S., Zadneprovskij Yu.A., Kuprin A.S., Lomino N.S., Sobol' O.V. Perenos i uderzhanie kremniya v Ti-Si-N-pokrytyyah v processe vakuumno-dugovogo osazhdeniya//VANT. Ser.: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radia-

- cionnoe materialovedenie – 2010. – Т. 96, № 5. – S. 119-125.
6. Aksenov I.I., Belous V.A., Zadneprovskij Yu.A., Kovalenko V.I., Lomino N.S. Vliyanie malyh dobavok kremniya na sluzhebnye harakteristiki nitrid-titanovykh pokrytij//VANT. Ser.: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie – 2011. – Т. 98, № 4. – S. 145-149.
 7. Aksenov I.I., Bilous V.A., Goltvyanicya S.K., Goltvyanicya V.S., Zadniprovs'kij Yu.O., Kuprin O.S., Lomino M.S., Ovcharenko V.D. Pernenennya katodnogo materialu v procesi vakuumno-dugovogo formuvannya pokrytij//VANT. Ser.: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie. – 2009. – № 2. – S. 181-184.
 8. Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Azarenkov N.A., Beresnev V.M. Struktura i svojstva tverdyh i sverhtverdyh nanokompozitnykh pokrytij//UFN. – 2009. – Т. 1, № 1. – S. 35-64.
 9. Belous V.A., Nosov G.I. Ion sputtering of metals in a system with a thermoionic inert gas plasma source//Proceeding of 6-th Symposium “TAFT-98” (Regensburg, Germany). – 1998. – P. 303-306.
 10. Belous V.A., Lunev V.M., Nosov G.I., Tolmacheva G.N. Issledovanie harakteristik pokrytij, sintezirovannykh s pomosh'yu istochnika gazovoj plazmy//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2011. – Т. 9, № 4. – S. 256-262.
 11. Kachurin G.A., Tyschenko I.E. Povedenie bora i azota v pripoverhnostnom sloe kremniya pri sinteze zahoronennykh sloev implantaciej ionov N^+ // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 1993. – Т. 27, Vyp. 7. – S. 1194-1201.
 12. Shapovalova O.M., Markova I.A., Ivchenko T.I. Izmeneniya v poverhnostnom sloe splava sistemy Ti-Al-V pri gazonasyschenii//Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv. – 2008. – № 3. – S. 18-23.