

## РЕАКТИВНЫЙ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК НЕПОСРЕДСТВЕННО ИЗ ПУЧКОВ ИОНОВ

К.А. Валиев, Ю.П. Маишев, С.Л. Шевчук

*Физико-технологический институт РАН, (Москва, Российская Федерация)*

Поступила в редакцию 25.02.2003

Проведено комплексное исследование разработанного метода реактивного ионно-лучевого синтеза (РИЛС) тонких пленок непосредственно из пучков ионов химических веществ сложного состава. В качестве источника ионов (ИИ) использовался многопучковый источник "Радикал-М250" с замкнутым дрейфом электронов и холодным катодом. Управление энергией ионов пучка в процессе осаждения, являющееся одним из достоинств метода, позволило сформировать тонкопленочные покрытия с различными свойствами из пучков ионов одного и того же вещества. Исследование свойств тонких пленок осуществлялось совокупностью методов: эллипсометрия, спектрофотометрия, ИК и Оже-спектрометрия, электронография. Показана зависимость оптических свойств полученных алмазоподобных и кремнийсодержащих тонких пленок от параметров пучков ионов в диапазоне изменения средней энергии осаждаемых ионов 150 ÷ 550 эВ. Продемонстрированы практические применения метода РИЛС.

### ВВЕДЕНИЕ

Основными наиболее распространенными в настоящее время методами получения тонких пленок в вакууме являются: распыление или испарение материала мишени, термоионное осаждение вещества, плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы. Возможности этих методов ограничены в процессе получения тонких пленок с заданными электрофизическими свойствами в связи с отсутствием возможности управления энергией осаждаемых частиц, отсутствием направленного переноса вещества и точного прямого контроля количества осаждаемого вещества (табл. 1).

При испарении и распылении материала мишени поток осаждаемого вещества состоит из нейтральных частиц, энергия которых низкая и не превышает 0,2 и 10 эВ соответственно. Осаждаемое вещество распространяется по закону косинуса. Отсутствие ионной компоненты затрудняет оперативный контроль роста осаждаемого покрытия.

В методах с частичной ионизацией рабочего вещества ионная компонента составляет незначительную долю (до 20 %), поэтому в этих условиях практически сохраняются недостатки, свойственные испарению и распылению материала мишени (отсутствие направленного переноса вещества и невозможность оперативного контроля роста покрытия). Применение электрического ВЧ смещения подложки позволяет изменять

энергию только ионной компоненты, не оказывая влияния на нейтральные частицы. Постоянное электрическое смещение можно подавать только на проводящие подложки и при осаждении металлических покрытий.

Разработанный метод реактивного ионно-лучевого синтеза тонких пленок основан на осаждении покрытия непосредственно из низкоэнергетичных пучков ионов высокой интенсивности. В данном случае используется автономный ионный источник, в котором осуществляется ионизация газо-парообразного рабочего вещества. В ионно-оптической системе (ИОС) источника осуществляется формирование ионного пучка, который, ускоренный до определенной энергии, распространяется без столкновений до подложкодержателя, где происходит осаждение и рост пленки непосредственно из вещества, переносимого ионным пучком. Таким образом, поток осаждаемого вещества, из которого осуществляется рост пленки, практически на 100 % состоит из ионов, образованных и ускоренных в ИОС. Этот метод обладает рядом достоинств:

имеется возможность управления свойствами осаждаемых тонких пленок посредством изменения в широком диапазоне энергий ионов пучка; строгая направленность ионного пучка позволяет наносить покрытия на структуры сложного профиля, осуществлять заполнение глубоких канавок;

Таблица 1

Общая характеристика основных методов нанесения тонких пленок в вакууме

Метод нанесения тонкой пленки	Энергия осаждаемых частиц		Направленность потока осаждаемых частиц	Доля ионной компоненты в потоке осаждаемых частиц	Контроль количества осаждаемого вещества
	эВ	управление			
Испарение материала мишени: термическое, электронно-лучевое	≈ 0,2	нет	закон косинуса	нет	нет
Распыление материала мишени: ионно-плазменное, магнетронное, ионно-лучевое	5÷10	нет	закон косинуса	нет	нет
Термоионное осаждение, ion-plating	0,2÷2000	ВЧ или постоянное смещение на подложке	Нейтралы: закон косинуса Ионы по нормали к поверхности	1÷10 %	нет
Плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы	0 ÷ 500	ВЧ смещение на подложке	Нейтралы: хаотическое движение Ионы: по нормали к поверхности	≈10÷20 %	нет
Реактивный ионно-лучевой синтез (РИЛС)	10 ÷ 1000	Ускоряющее напряжение ИИ	Направленное под любым заданным углом к поверхности	≈ 100 %	точный контроль по току пучка ионов

имеется возможность точного контроля скорости роста пленки по плотности тока пучка в процессе осаждения.

В работе осуществлено обширное исследование процесса осаждения тонких пленок методом РИЛС, установлена зависимость оптических свойств полученных алмазоподобных и углеродных кремнийсодержащих тонких пленок от энергии ионов пучка, показаны практические применения РИЛС, связанные с направленностью ионного пучка и зависимостью свойств осаждаемого покрытия от энергии ионов пучка.

**ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проводились на установке ионно-лучевой обработки “Каштан” [1] (рис. 1), оснащенной многочастотным источником ионов “Радиал-М250” (4) [2,3], формирующим ионный пучок рабочего вещества, распространяющийся в технологической камере (1) на расстояние до 180 мм. Откачка системы до остаточного вакуума  $10^{-4}$  Па осуществляется с использованием турбомолекулярного насоса ТМН 1500 (3). Рабочее давление изменяется в диапазоне  $2 \times 10^{-2} \div 2 \times 10^{-1}$  Па. В состав установки входит охлаждаемый водой подложкодержатель (2), совершающий сложное вращательно-колебательное движение, блок питания ИИ (5), система управления технологическим процессом (6).

Источник ионов с холодным катодом и замкнутым дрейфом электронов “Радиал-М250” формирует широкие низкоэнергетичные интенсивные пучки ионов химически активных веществ (рис. 2). Принцип создания пучка основан на ионизации рабочих веществ высокоэнергетичными электронами, ускоряемыми в специально организованной потенциальной “яме” и в локализованных скрещенных электрическом и магнитном полях, обеспечивающих максимальное изменение энергии электронов в промежутке анод – катод. Извлечение ионов и формирование пучка ионов осуществляется ускоряющим электродом. ИИ формирует слабо-расходящийся пучок ионов рабочего газа диаметром

$\approx 250$  мм, распространяющийся в технологической камере до подложкодержателя на расстояние  $70 \div 180$  мм. В качестве рабочих веществ могут использоваться углеводороды, органические соединения, хлор- фторсодержащие газы, аргон, кислород.

Управление параметрами ионного пучка (энергией и интенсивностью ионов пучка) осуществлялось посредством вариации электрофизических параметров разряда (напряженность магнитного поля в ускоряющей промежутке, напряжение на разряде, поток рабочего вещества) и конструкции ионно-оптической системы источника. Для характеристики геометрии ионно-оптической системы введен конструктивный комплексный показатель “а”, содержащий в себе данные о геометрической форме и размерах элементов ионно-оптической системы и зазоров между ними. При этом рассматривались четыре различных варианта ИОС, получившие обозначение “а0”...”а3”, где “а0” соответствует расположению штыря в плоскости анода, “а1” – смещение штыря от плоскости анода на 1 мм и т.д. Для проведения анализа распределения ионов по энергиям в пучке применялся четырехсеточный зонд.

При исследовании распределения плотности тока пучка вдоль диаметра пучка, проводимом зондовым методом, выполнялось диафрагмирование пучка. Диафрагма представляла собой узкую щель, расположенную вдоль диаметра пучка.

Алмазоподобные (АПП) и кремнийсодержащие углеродные пленки осаждались на пластины монокристаллического кремния КЭФ-20 из пучков ионов углеводородов (циклогексан, ацетон, пропанол) и кремний органических мономеров (гексаметилдисилазан (ГМДС), винилтриметоксисилан (ВТМОС), смеси ВТМОС и атомарного кислорода). Непосредственно перед нанесением покрытия проводилась очистка подложки пучками ионов аргона.

Определение толщины и показателя преломления пленок осуществлялось эллипсометрическим методом при нанесении пленки на полированную кремниевую

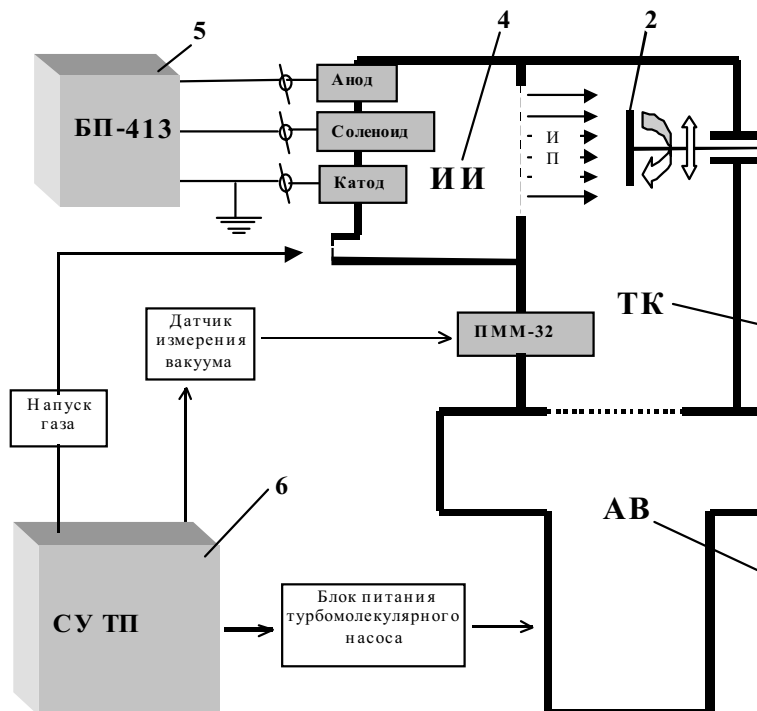


Рис.1 Схема установки ионно-лучевой обработки “Каштан”.



Рис. 2 Фотография источника ионов “Радикал-М250”

подложку. Измерения проводились на стандартном промышленном эллипсомере “ЛЭМ-2М” на длине волны 0,6328 мкм с использованием номограмм и таблиц, приведенных в техническом описании эллипсометра.

При определении ширины запрещенной зоны измерялось поглощение пленок, нанесенных на тонкое покрывное стекло (для микроскопа). Измерения проводились на спектрофотометре “СФ-26” в диапазоне энергий фотонов  $4,25 \div 2,00$  эВ ( $292 \div 620$  нм). Определялось пропускание тонкого стекла с пленкой относительно пропускания стекла без пленки. После расчета  $\alpha$  вычислялся коэффициент Тауца  $(\alpha h\nu)^{1/2}$ , по которому строились зависимости  $(\alpha h\nu)^{1/2} = f(h\nu)$ . Экстраполяция этих кривых к  $(\alpha h\nu)^{1/2} \rightarrow 0$  позволяет определить ширину запрещенной зоны пленок.

При определении фазового состава пленок проводилось исследование поглощения образцов в диапазоне  $400 \div 4000$  см<sup>-1</sup> по стандартной методике с использованием ИК спектрометра Perkin Elmer 1720X с Фурье преобразованием. Максимальная разрешающая способность прибора при использовании стандартного КВг интерферометра составляет 0,5 см<sup>-1</sup>.

Исследование элементного состава поверхности тонких пленок осуществлялось по стандартной методике Оже-спектроскопии с использованием спектрометра “МАС-2” фирмы “Riber”. Облучение поверхности образца осуществлялось электронным пучком с энергией электронов 2,5 кэВ, при этом диаметр пучка электронов составлял 0,2 мм. Глубина выхода Оже-электронов достигала  $8 \div 10$  ангстрем. На основе анализа дифференциальных Оже-спектров образцов установлен элементный состав поверхности пленок. Определение доли sp<sup>3</sup> связей атомов в пленке осуществлялось по распределению плотности электронных состояний в пленке, рассчитанному обращением самосвертки KVV Оже-линии углерода.

Исследование структуры тонких пленок проводилось электронографическим методом с использованием электронографа “ЭР 100” при ускоряющем напряжении 100 кВ (длина волны электрона 0,037Å) методом отражения. Максимальная глубина проникновения пучка электронов в объем образца составила  $20 \div 25$  нм.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ИОНОВ**

Исследование распределения плотности тока ионного пучка вдоль диаметра пучка проводилось с целью определения неравномерности распределения плотности тока вдоль диаметра, обуславливающей неравномерность обработки в процессе осаждения пленки из ионных пучков на неподвижную подложку.

Неравномерность распределения плотности тока рабочих режимах ИИ на диаметре 150 мм не превышает  $\pm(2,5 \div 3)$  %, на диаметре 100 мм –  $\pm(0,7 \div 1,25)$  %, что обеспечивает нанесение тонких пленок с большой однородностью на неподвижные пластины диаметром до 150 мм.

Установлено, что основными параметрами, определяющими распределение плотности тока пучка вдоль диаметра пучка, являются способ подачи и величина потока газа в ИИ, напряжение на разряде и напряженность магнитного поля в ячейке ИИ. Вариация выше-названных параметров позволяет получить распределение плотности тока пучка вдоль диаметра пучка различного типа (вогнутое, плоское, выпуклое), при этом степень кривизны профиля распределения определяется электрофизическими характеристиками ионных пучков и способом напуска газа в ИИ (рис. 3).

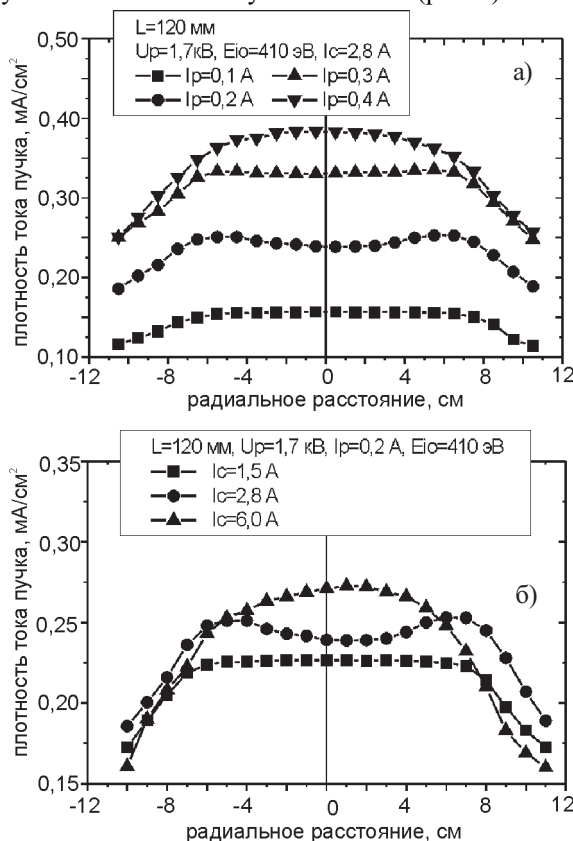


Рис. 3. Распределение плотности тока ионного пучка вдоль диаметра пучка: а) зависимость от тока пучка; б) зависимость от напряженности магнитного поля в ячейке ИИ.

На рис. 4 представлены графики распределения ионов по энергиям  $f(E)$  для пучков ионов циклогексана, полученные дифференцированием кривых задержки ионного тока, в геометрии ИОС “a2” и напряжении на разряде  $U_p = 1,7$  кВ при различных потоках газа в источник. Из графиков следует, что ионный пучок характеризуется разбросом ионов по энергиям. Действительно, в ИИ данного типа ионизация электронным ударом может происходить в любом месте ускоряющего промежутка. Следствием этого является энергетический разброс ионов пучка, так как энергия иона в данных условиях определяется разностью потенциалов между эквипотенциалью в месте “рождения” иона и потенциалом ускоряющего электрода и подложки, имеющих потенциал земли. Аналогичные зависимости получены для всех исследуемых вариантов геометрии.

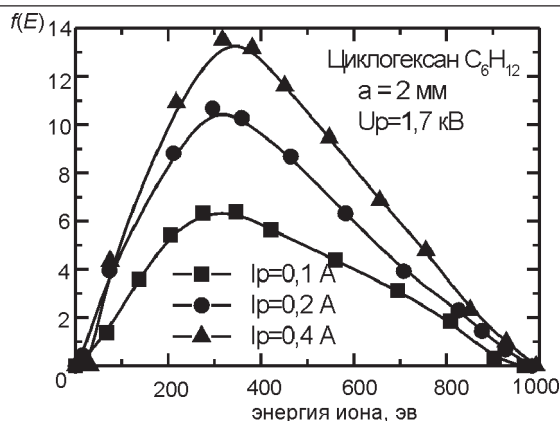


Рис. 4. Распределение ионов по энергиям в пучке ионов циклогексана для геометрии ИОС "а2", напряжении на разряде  $U_p=1,7$  кВ и токах разряда 0,1 А, 0,2 А, 0,3 А.

ри ячейки в различных рабочих режимах для ряда исходных веществ: циклогексан, аргон, кислород [4].

Проведенные эксперименты позволили выявить различия в распределении ионов по энергиям и осуществить расчет средних энергий ионов пучка. Установлена возможность управления средней энергией ионов пучка в диапазоне от 150 до 550 эВ посредством модификации геометрии ИОС (рис.5).

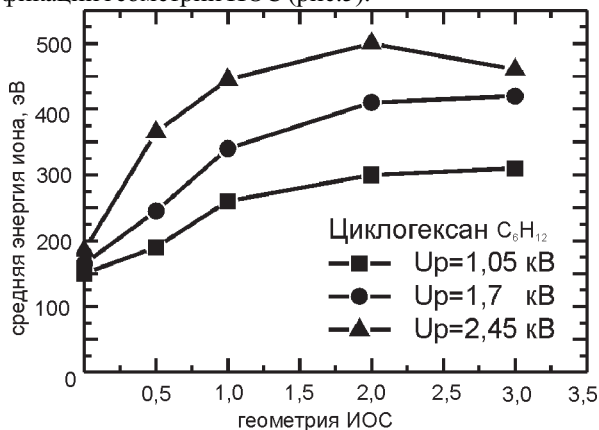


Рис. 5. Зависимость средней энергии ионов пучка циклогексана от геометрии ИОС при напряжениях на разряде 1,05 кВ, 1,7 кВ, 2,45 кВ.

С вариацией зоны ионизации рабочего вещества в ускоряющем зазоре при преобразовании геометрии ячейки коррелируют как энергетические характеристики, так и интенсивности пучков ионов (рис. 6). При увеличении расстояния между штыревым катодом и ускоряющим электродом (т.е. изменении параметра "а") наблюдается возрастание отношения тока пучка и тока разряда  $I_n/I_p$ , характеризующее эффективность формирования ионных пучков для различных вариантов геометрии ИОС. Максимальные значения  $I_n/I_p$  составляют на аргоне до 60 %, на циклогексане до 70 %, на кислороде до 80 %. Изменение отношения токов обусловлено изменением как тока пучка, так и тока разряда. Абсолютные значения тока пучка составляют до 600 мА ( $j=2,0$  мА/см<sup>2</sup>).

При необходимости обеспечения нейтрализации заряда на поверхности растущей диэлектрической пленки в промежутке между ИИ и подложкой устанавливается накаливаемый катод нейтрализации, который в процессе осаждения диэлектрической пленки непосредственно из пучков ионов позволяет эффективно осуществлять компенсацию тока пучка на обрабатываемую поверхность и перекомпенсацию на 100 %.

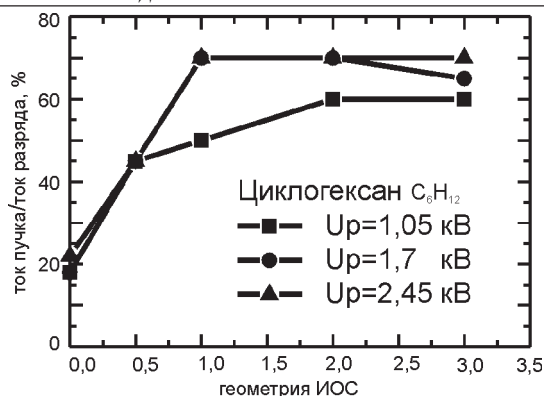


Рис.6. Зависимость отношения тока пучка и тока разряда от геометрии ИОС для пучка ионов циклогексана при напряжениях на разряде 1,05 кВ, 1,7 кВ, 2,45 кВ.

Величина поверхностного потенциала на диэлектрике может составлять сотни вольт, повышение напряжения на разряде приводит к возрастанию потенциала; увеличение тока пучка способствует нейтрализации заряда на диэлектрической поверхности при неизменном напряжении на разряде и снижению потенциала. В процессе токовой компенсации посредством введения в ионный пучок медленных термоэлектронов осуществляется нейтрализация заряда на поверхности диэлектрика (рис.7).

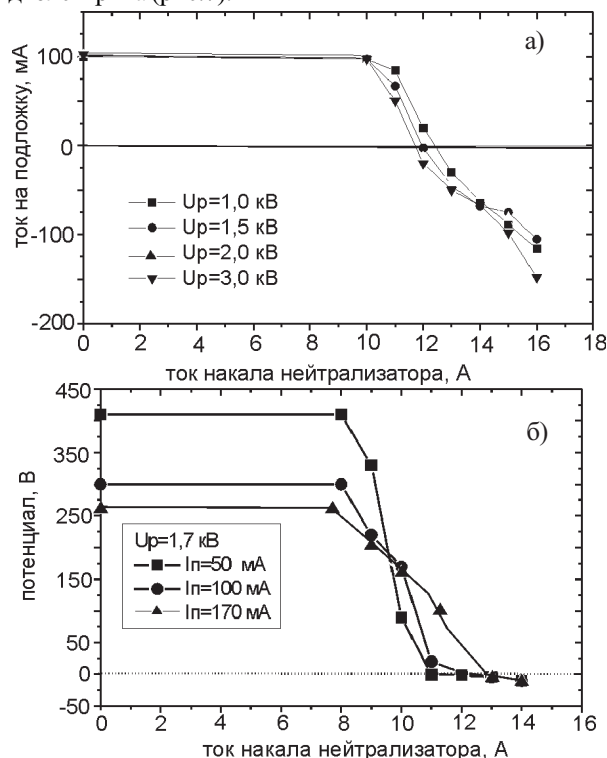


Рис. 7. Зависимость ионного тока на подложку (а) и потенциала изолированного подложкодержателя (б) от тока накала катода-нейтрализатора в процессе осаждения диэлектрической пленки при напряжении на разряде  $U_p=1,7$  кВ и токе пучка до нейтрализации 50 мА, 100 мА, 170 мА.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ И СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Проведенные ранее исследования показали принципиальную возможность нанесения тонких пленок, в частности алмазоподобных, осаждением из пучка ионов [5 – 8]. В данной работе представлены результаты нанесения как алмазоподобных, так и кремнийсодержащих углеродных покрытий, полученных из пучков ионов химически сложных веществ [9].

На рис. 8 приведены скорости осаждения АПП из пучков ионов циклогексана и ацетона. Полученные зависимости имеют линейный характер и могут быть описаны выражением:  $V_{oc} \approx K_m \times j_n$ , где  $K_m$  – технологический коэффициент пропорциональности;  $j_n$  – плотность тока пучка ионов.

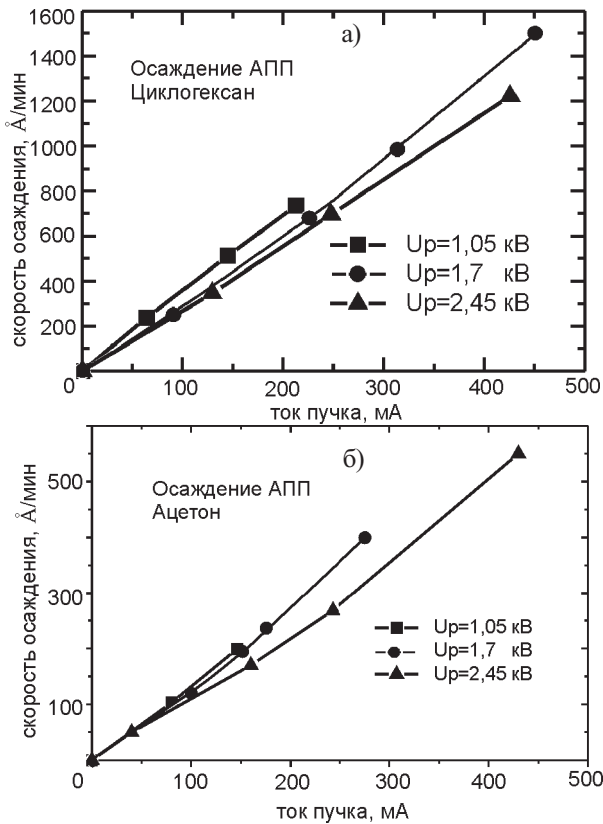


Рис. 8 Скорость осаждения алмазоподобной пленки из пучков ионов циклогексана (а) и ацетона (б).

Технологический коэффициент пропорциональности  $K_m$  зависит, главным образом, от состава молекулы рабочего вещества, а также напряжения на разряде в процессе осаждения.

В рассматриваемом диапазоне энергий ионов скорость нанесения тонких пленок определяется плотностью тока пучка и составом иона и практически не зависит от энергии ионов (не более 10 %) (табл. 2). Следовательно

Таблица 2

Скорости процессов осаждения тонких пленок методом РИЛС.

Скорость осаждения $V_{oc}$ , ангстрем/мин. (плотность тока пучка $1 \text{ mA/cm}^2$ )			
Пленка: Рабочее вещество	$U_p = 1,05$ кВ	$U_p = 1,7$ кВ	$U_p = 2,45$ кВ
АПП: Циклогексан	1070	980	900
Ацетон	475	450	375
Пропанол	450	360	340
SiCN : ГМДС	2800	2600	2300
SiCO : ВТМОС	2300	2000	1800
SiO <sub>2</sub> : ВТМОС+O <sub>2</sub>	900	-	-

тельно, предлагаемый метод нанесения покрытия позволяет контролировать скорость осаждения непосред-

ственным измерением плотности тока пучка на подложку. Энергетическая зависимость скорости осаждения пленки позволяет считать, что повышение энергии ионов свыше 500 эВ является нежелательным.

Исследование свойств тонких пленок, проведенное совокупностью методов, показало зависимость свойств пленки от энергии и интенсивности ионов пучка в процессе осаждения. Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  алмазоподобных пленок зависит от плотности мощности в процессе осаждения, причем в диапазоне рабочих режимов получены АПП, характеризующиеся оптической шириной запрещенной зоны в интервале  $0,8 \div 1,5$  эВ. Увеличение плотности мощности сопровождается снижением  $E_g$ , которое обусловлено изменением структуры графитового кластера. Кремнийсодержащие углеродные покрытия обладают более высокой прозрачностью в диапазоне длин волн  $0,3 \div 0,62$  мкм, чем АПП. При этом изменение оптических показателей кремнийсодержащих углеродных пленок в зависимости от энергии ионов составило: оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g = 1,8 \div 2,4$  эВ, показатель преломления  $n = 1,75 \div 2,4$ , коэффициенты экстинкции  $K = 0,01 \div 0,2$ .

Электроннографическим методом показана аморфная структура полученных тонких пленок (рис.9).

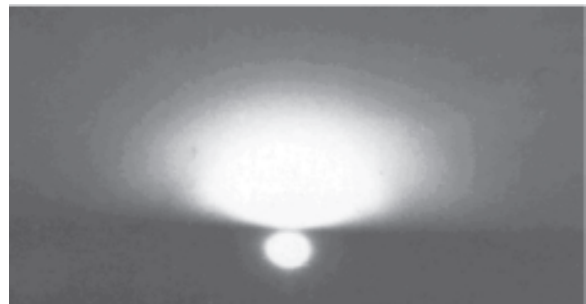


Рис. 9 Типичная электронограмма алмазоподобной пленки, полученной осаждением непосредственно из пучков ионов.

Методом Оже-спектроскопии установлено, что пленки, полученные осаждением из пучков ионов углеродов (циклогексан, ацетон, пропанол), являются алмазоподобными, причем доля тетрагональных связей атомов углерода составляет до 70 ат. % (рис. 10). Ширина и положение (272 эВ) Оже-пика соответствуют аморфному углероду. Отжиг алмазоподобных образцов при температуре 1050°C в атмосфере аргона приводит к образованию твердых слоев с долей  $\pi$ -связей в пленке до 100 %.

Увеличение плеча в распределении плотности электронных состояний в отожженном образце в диапазоне  $5 \div 10$  эВ указывает на возрастание доли  $\pi$ -связей в пленке.

Методом ИК-спектроскопии установлен фазовый состав полученных тонких пленок. В спектрах алмазоподобных пленок наблюдаются:

полосы на  $2870 \text{ cm}^{-1}$  и  $2960 \text{ cm}^{-1}$  соответствуют валентным симметричным и несимметричным колебаниям C-H связей в группах  $sp^3 \text{ CH}_3$ ;

полоса на  $2925 \text{ cm}^{-1}$  соответствует несимметричным колебаниям C-H связей в группах  $sp^3 \text{ CH}_2$ ;

полосы на  $3000 \text{ cm}^{-1}$  и  $3045 \text{ cm}^{-1}$  соответствуют валентным колебаниям алифатических и ароматических  $sp^2$ -СН групп соответственно;

полосы на  $1375 \text{ cm}^{-1}$  и  $1450 \text{ cm}^{-1}$  соответствуют симметричным и несимметричным деформационным колебаниям связей C-H в группах  $sp^3 \text{ CH}_3$ ;

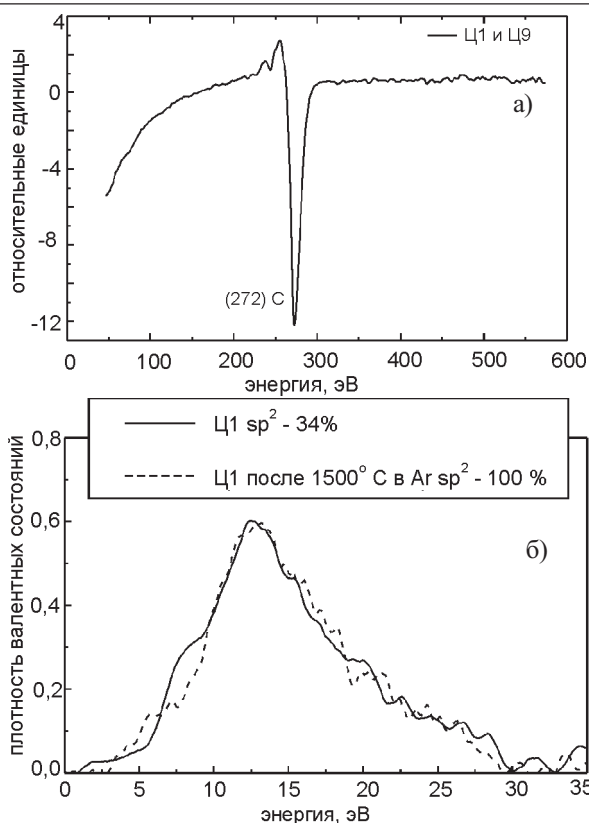


Рис. 10 Дифференциальный Оже-спектр (а) и распределение плотности электронных состояний (б) для алмазоподобного образца Ц1 до (сплошная линия) и после (пунктирная линия) отжига при температуре 1050° С в аргоне в течении 60 минут.

полоса на ≈1600 см<sup>-1</sup> соответствует двойным C = C связям.

Тонкие пленки, полученные осаждением из пучков ионов кремнийорганических мономеров, являются многокомпонентными покрытиями, основу которых составляет Si-C матрица. В зависимости от типа применяемого кремнийорганического мономера образуются оксикарид кремния или карбонитрид кремния. ИК-спектры образцов SiCN-покрытий содержат широкую полосу в области 700÷1000 см<sup>-1</sup>, которая соответствует колебаниям связей Si-C (740 см<sup>-1</sup>), Si C в Si (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-Si (800 ÷820 см<sup>-1</sup>), SiH (860 ÷870 см<sup>-1</sup>) и Si-N (900 ÷1000 см<sup>-1</sup>). ИК-спектры образцов SiCO-покрытий содержат широкую полосу в области 700÷900 см<sup>-1</sup>, которая соответствует колебаниям связей Si-C, Si-CH<sub>3</sub> групп (720 ÷850 см<sup>-1</sup>) и Si-H см<sup>-1</sup>, соответствующую силоксановой Si-O-Si фазе, связанной с органическими группами Si-(CH<sub>3</sub>)<sub>n</sub>, Si-(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-Si.

Свойства полученных тонких пленок (АПП, SCNH, SiCOH) обобщены в табл. 3.

Свойства алмазоподобных и кремнийсодержащих тонких пленок, полученных осаждением из пучков ионов методом РИЛС.

Пленка	Состав	E <sub>p</sub> , Вт/см <sup>2</sup>	SP <sup>3</sup> , %	E <sub>g</sub> , эВ	n	K	V, см/с
a - C : H	sp <sup>3</sup> CH <sub>n</sub>	0,015	до 70	1,5	2,3 - 2,5	0,1 - 0,9	-
	sp <sup>2</sup> CH <sub>n</sub>	0,075		0,9			-
	sp <sup>2</sup> C = C						-
SiCO(H)	SiC	0,014	75	2,1	1,8	0,01 - 0,2	-
	SiOSi			2,35			600
	Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>n</sub> SiH <sub>n</sub> <sup>x,y</sup>	0,028		2,4			-
SiCN(H)	SiC	0,014	75 (5% об)	2,4	2,1	0,01 - 0,2	1500
	SiN			1,8			-
	Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>n</sub> SiH <sub>n</sub> <sup>x,y</sup>	0,028		1,8			-

В табл. 3 представлены следующие параметры тонких пленок, полученных осаждением из пучков ионов при различной плотности мощности E<sub>p</sub>; фазовый состав: доля атомов углерода с sp<sup>3</sup> гибридизацией связей; оптическая ширина запрещенной зоны E<sub>g</sub> (зона Тауца); скорость поверхностной рекомбинации V<sub>g</sub>; показатель преломления n; коэффициент экстинкции K.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РИЛС**

Установлено, что оптические параметры кремнийсодержащих углеродных пленок удовлетворяют требованиям к просветляющим покрытиям, а именно: высокий показатель преломления (n ≥ 2); широкая оптическая зона (E<sub>g</sub> ≈ 2,5 эВ); низкий коэффициент экстинкции; низкая скорость поверхностной рекомбинации.

Анализ оптических свойств кремнийсодержащих пленок показал, что наиболее эффективным для просветления является применение тонких пленок, полученных осаждением из пучков ионов ВТМОС. При этом запыление тыльной стороны солнечного элемента пленкой из пучка ионов ВТМОС при средней энергии ионов 500 эВ и плотности тока j = 0,45 мА/см<sup>2</sup> (свойства покрытия: оптическая ширина запрещенной зоны E<sub>g</sub> = 2,35 эВ, показатель преломления n = 2,4, коэффициент экстинкции K = 0,01 ÷ 0,2, скорость поверхностной рекомбинации v = 600 см/с) повысило спектральную чувствительность элемента в области 0,4 ÷ 1,0 мкм до 60 %.

На рис.11 представлена спектральная чувствительность солнечного элемента Ф с непросветленной поверхностью (1) и с нанесенной просветляющей пленкой (2), осажденной из пучков ионов ВТМОС, при его освещении с обратной стороны. Следует учитывать, что за счет просветления максимальное возрастание сигнала не может превышать 40 %.

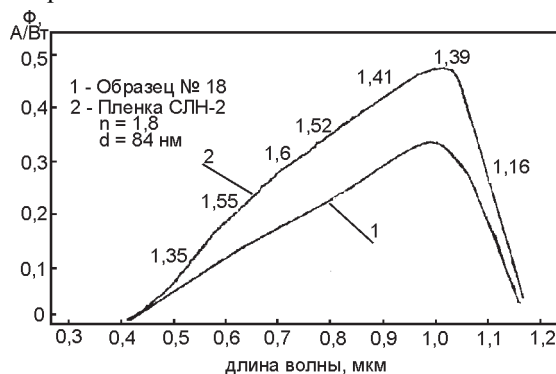


Рис.11. Спектральная чувствительность элемента Ф солнечной батареи: (1) без просветляющего покрытия; (2) с просветляющим покрытием СЛН2.

Таблица 3

Повышение чувствительности элемента свыше 40 % связано со снижением скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела, которая для SiCOH пленки составляет 600 см/с (см. таблица 3), в отличие от используемого в настоящее время в технологии солнечных элементов покрытия ZnS, для которого скорость поверхностной рекомбинации составляет 1300 см/с.

Строгая направленность ионного пучка может эффективно использоваться для нанесения тонкопленочного покрытия непосредственно из пучков ионов на поверхности высокоаспектных углублений.

На рис. 12 представлены тестовые структуры с нанесенной тонкой пленкой, осажденной из пучков ионов ВТОМС. Полученный результат обуславливает принципиальную возможность формирования барьерных слоев для многослойной металлизации УБИС.

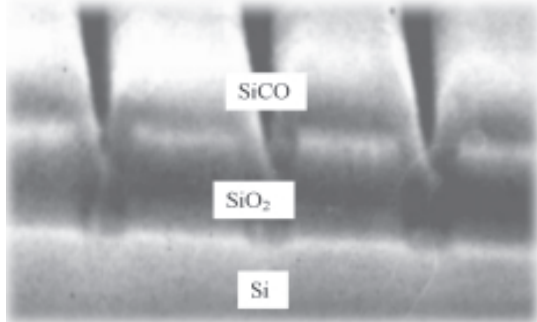


Рис.12 Фотография канавки с аспектным отношением  $A=3$  (ширина и глубина канавки  $0,7 \times 2$  мкм) с нанесенной тонкой пленкой, осажденной из пучков ионов ВТОМС

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что метод реактивного ионно-лучевого синтеза тонких пленок (РИЛС) действительно расширяет технологические возможности процессов осаждения тонких пленок. Так показано, что контролируемое изменение энергии осаждаемых на подложку ионов пучка позволяет при использовании одного и того же рабочего вещества управлять оптическими свойствами многокомпонентных тонких пленок – оптической прозрачностью, показателями преломления и поглощения.

Возможность заполнения канавок в структурах с большим аспектным отношением свидетельствует о направленности ионного пучка.

Практически линейная зависимость скорости осаждения от плотности тока пучка позволяет с высо-

кой точностью контролировать процесс нанесения покрытия и общее количество осаждаемого вещества.

Высокая скорость осаждения диэлектрических пленок из пучков ионов открывает широкие перспективы внедрения метода РИЛС и ионных источников с замкнутым дрейфом электронов в кластерные системы промышленного назначения.

Авторы выражают благодарность Фонду содействия отечественной науки за благородную и эффективную поддержку научно-исследовательских работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маишев Ю.П. Источники ионов и ионно-лучевое оборудование для нанесения и травления материалов // Вакуумная техника и технология. – 1992. – Т.2, № 4. – С.53–58.
2. Маишев Ю.П. Источники ионов для реактивного ионно-лучевого травления и нанесения пленок // Электронная промышленность. – 1990. – №5. – С.15-18.
3. Валиев К.А., Великов Л.В., Маишев Ю.П., Терентьев Ю.П. Физические принципы формирования пучков ионов химически активных газов в источниках ионов, предназначенных для травления и нанесения пленок // Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. Труды ФТИАН Т.15. – М.: Наука. Физматлит. – 1990. – С.18–26.
4. Маишев Ю.П., Шевчук С.Л. Ионно-лучевая технология для осаждения и травления алмазоподобных пленок // Труды X Международного симпозиума “Тонкие пленки в электронике”. – Ярославль (Российская Федерация). – 1999. – С. 84–92.
5. Enisherlova K.L., Kontsevov Y.A., Maishev Y.P., Mitrofanov E.A. Diamond-like carbon and SiC films obtained by the industrial system equipped by the ion source with a cold cathode // Spring Meeting Materials Research Society. – San Francisco (USA). – 1995. – P. 188–190.
6. Enisherlova K.L., Kontsevov Y.A., Chevyakova E.N., Maishev Y.P., Mitrofanov E.A. Investigation of diamond-like carbon films produced directly from ion beam on industrial source with a cold cathode // Materials Science and Engineering. – 1997. – Vol. B46. – P. 137–140.
7. Валиев К.А., Великов Л.В., Маишев Ю.П., Митрофанов Е.А., Терентьев Ю.П. Исследование алмазоподобных пленок, осажденных непосредственно из пучков ионов // Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. Труды ФТИАН. Т.15. – М.: Наука. Физматлит. – 1990. – С.27-32.
8. Маишев Ю.П., Шевчук С.Л. Осаждение алмазоподобных пленок из пучков ионов углеродсодержащих веществ // Труды VI Международной конференции “Пленки и покрытия”. – Санкт-Петербург, (Российская Федерация). – 2001. – С. 176 – 180.
9. Маишев Ю.П., Шевчук С.Л., Кальнов В.А., Аверичкин П.А. Синтез тонких пленок из пучка ионов кремнийорганических соединений // Тезисы Всероссийской научно-технической конференции “Микро- и нанoeлектроника-2001”. – Звенигород (Российская Федерация). – 2001. – С. 1 – 43.

## РЕАКТИВНИЙ ІОННО-ПРОМЕНЕВИЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛІВОК БЕЗПОСЕРЕДНЬО З ПУЧКІВ ІОНІВ

К.А. Валиев, Ю.П. Маишев, С.Л. Шевчук

Проведено комплексне дослідження розробленого методу реактивного іонно-променевого синтезу (РІПС) тонких плівок безпосередньо із пучків іонів хімічних речовин складної структури. Як джерело іонів (ДІ) використовувалося багатопучкове джерело “Радикал-М250” із замкнутим дрейфом електронів та холодним катодом. Керування енергією іонів пучка в процесі осадження, що є однією із переваг методу, дозволило сформувати тонкоплівкові покриття з різними властивостями із пучків іонів тієї ж речовини. Дослідження властивостей тонких плівок здійснювалося сукупністю методів: еліпсометрія, спектروفотометрія, ІЧ і Оже-спектрометрія, електронографія. Показано залежність оптичних властивостей отриманих алмазоподібних і кремніймістких тонких плівок від параметрів пучків іонів у діапазоні зміни середньої енергії іонів, що осаджуються,  $150 \div 550$  еВ. Продемонстровано практичні застосування методу РІПС.

## REACTIVE ION-BEAM SYNTHESIS OF THIN FILMS DIRECTLY FROM ION BEAM

K.A. Valiev, Yu.P. Maishev, S.L. Shevchuk

Investigation of the designed method of reactive ion-beam syntheses (RIBS) of thin films directly from complex chemical compound ion beams was carried out. As ion beam source was used multibeam ion source with cold cathode and closed driftage electrons “Radical-M250”. Control of ion beam energy being one of the advantages of the method has allowed to form thin film coatings with different characteristics from ion beam of one and same material. The film property investigation was realized by collection of the methods: IR Fourier spectroscopy, ellipsometry, AES, PES, XPS. The dependency of optical characteristics of obtained diamond-like and silicon containing thin films from ion beam parameters within the range of the change medium ion energy  $150 \div 550$  eV is found. Practical application of the method RIBS are demonstrated.