

## **ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ НА ПРОЦЕСС ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ СТРУКТУР, АКТИВИРУЕМЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ**

**В.В.ОДИНОКОВ<sup>1</sup>, Г.Я. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, В.К. САМОЙЛИКОВ<sup>2</sup>, П.А. ИРАКИН<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт “Точного машиностроения”, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*НИИУ -Московский институт электронной техники г.Москва, Россия.*

При производстве современной элементной базы микро- и нанoeлектроники широко используются процессы осаждения из газовой фазы, активируемые низкотемпературной плазмой (PE CVD). Качество и равномерность PE CVD слоев во многом зависят от газодинамики инжектируемого в вакуумную камеру рабочего газа. В работе исследовался процесс осаждения пленки нитрида кремния при подаче одиночной микроструи рабочего газа  $\text{SiH}_4:\text{N}_2$  в плазму ICP разряда с ВЧ индуктором, расположенным вблизи поверхности кремневой пластины. В докладе дается анализ полученных результатов и рекомендации по оптимизации конструктивно-технологических условий осаждения слоев на пластинах большого диаметра.

### **Введение**

Тенденции развития микроэлектроники определяются переходом на обработку подложек большого диаметра. Одной из главных причин такого перехода является возможность одновременного изготовления большего количества чипов на одной пластине, что способствует существенному увеличению выхода годных, а следовательно и снижению себестоимости изделий микроэлектроники

В современных СБИС используется широкий спектр диэлектрических тонких слоев, которые обеспечивают электрическую изоляцию между проводящими областями, а также используются как финишные пассивирующие слои. В качестве этих слоев наибольшее распространение получили пленки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . В зависимости от предельно допустимой температуры, которой может подвергаться изделие, используются различные методы осаждения. Химические газофазные осаждения при атмосферном и низком давлениях обычно проводятся при температурах свыше  $400^\circ\text{C}$ . Такое значение температуры в процессах осаждения диэлектрических пленок может быть критичным и приводить к генерации дефектов в полупроводниковых структурах, термической деформации подложек и т.п., что неизбежно повлияет на выход годных приборов. Поиск путей снижения температуры привел к появлению процессов химического газофазного осаждения, активируемых неравновесной плазмой, с температурой осаждения ниже  $400^\circ\text{C}$ . Это послужило толчком к широкому внедрению низкотемпературных плазмохимических газофазных процессов и устройств, обеспечивающих возможность получения высококачественных диэлектрических слоев нанометрового диапазона..

Свойства слоев, получаемых в процессах плазмохимического осаждения (ПХО), зависят от большого количества конструктивно-технологических условий ПХО [1], что приводит к необходимости использования полуэмпирических подходов, как при проектировании оборудования, так и при реализации процессов осаждения. Особую актуальность эти задачи приобретают при переходе на пластины большого диаметра. Поэтому для дальнейшего развития и совершенствования процессов ПХО должны быть разработана обобщенная методика проектирования оборудования. Принципиальной

основой такой методики должно быть сочетание знаний о физико-химических и химических особенностях процессов, происходящих в низкотемпературной плазме, с явлениями переноса и взаимодействия реагирующих масс с поверхностями осаждения.

Одним из основных показателей качества взаимодействия неравновесной химически активной плазмы с поверхностью (подложкой) является высокая однородность формируемых структур по поверхности взаимодействия. Достижению этого показателя способствуют, на наш взгляд, два основных условия:

- энергетическая однородность обрабатываемой поверхности;
- равнодоступность обрабатываемой поверхности активированной (плазмой) внешней средой.

Первый из этих показателей может быть охарактеризован равномерностью распределения температуры по обрабатываемой поверхности подложки. Равномерность и распределение температуры по поверхности обеспечиваются идентичностью локальных тепловых балансов обрабатываемой поверхности. Но учитывая, что плазмохимические процессы проводят при пониженном давлении, при котором теплообмен между подложкой и подложкодержателем локализован в точках физического их контакта, задача организации равномерности температуры по подложке значительно усложняется и требует специальных научно-технических решений [2]

Требование равнодоступности поверхности подложки активной средой также является не простой задачей. С одной стороны, необходимы хорошо распределенный транспорт технологических газов и удаления продуктов реакции. С другой стороны, необходима однородность обработки технологических газов химически активными частицами плазмы

### Струйное истечения в вакуум.

В основу анализа влияния газодинамики на процесс ПХО была положена модель течения реального газа, истекающего со звуковой скоростью в затопленное пространство с пониженным давлением, и его взаимодействие с поверхностью [3]. В этом случае вдоль границы струи развиваются слои вязкого перемешивания с турбулентным или ламинарным режимом течения, определяемые числом Рейнольдса. Вязкое перемешивание приводит к существенной перестройке профилей плотности, давления и температуры (в сжатом слое газа между висячим скачком и границей струи), изменяет положение границы струи. Описанная картина существенно усложняется плазмохимическими гомогенными и гетерогенными процессами.

Характеристика течения в пограничном слое на начальном участке струи определяется величиной числа Рейнольдса, в котором характерная длина пропорциональна квадратному корню из степени расширения  $N = p_0/p_\infty$  или степени нерасчетности  $n$ . В качестве такой длины принято считать расстояние от среза сопла до диска Маха  $x_c$  или точки пересечения висячего скачка уплотнения с осью струи [4]. Принимая в качестве характерных значений плотности и вязкости их значения в окружающем пространстве, а в качестве скорости — максимальную скорость истечения  $v_m$ , получим

$$Re = \rho_\infty v_m x_c / \mu_\infty \quad (1)$$

С учетом зависимости преобразований  $x_c/d_c \sim M_a \sqrt{n}$  выражение (1) после несложных приводится к виду:

$$Re_L = Re_* / \sqrt{n}; \quad Re_* = \rho_* v_* d_* / \mu_* \quad (2)$$

где  $\rho^* v^* d^*$  - значения плотности, скорости и вязкости в критическом сечении сопла соответственно.

Проведенная оценка величины  $Re_L$  при указанном выше расходе газовой смеси и давлении в реакционной камере 100,50 и 10 Па дала следующие значения величин  $Re_L = 1,3; 0,9$  и  $0,4$  соответственно.

На рис. 1 представлены (условно) области характерных режимов истечения газовых струй [5]

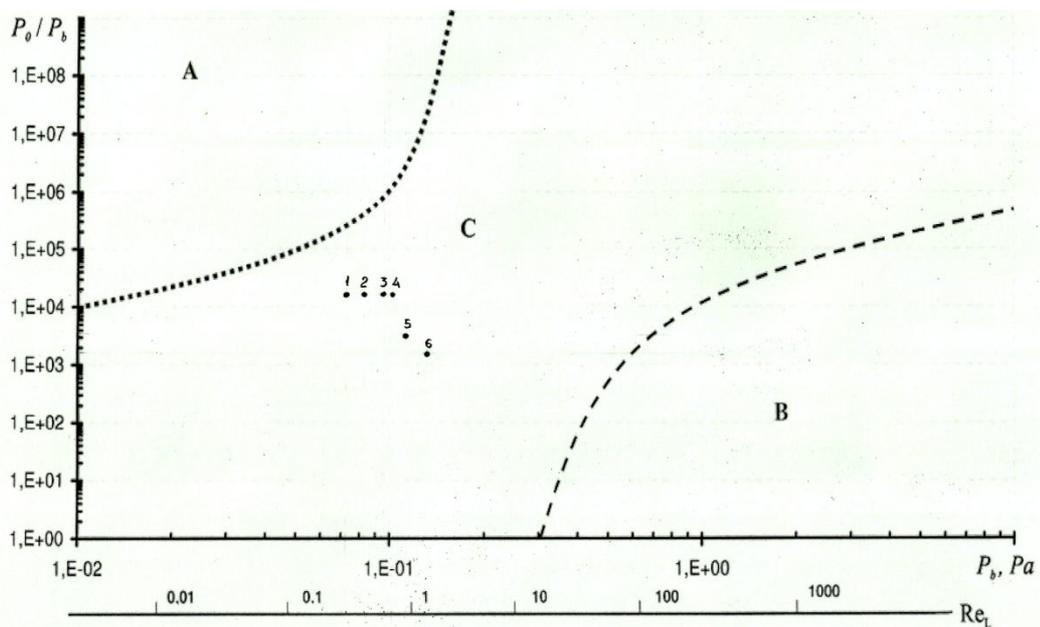


Рис.1. Режимы истечения газовых струй: А – в вакуум; В – в сплошную среду; С – в среду с пониженным давлением

Известно [4], что при  $Re_L < 10^2$  на газодинамическую структуру и параметры струй начинают влиять эффекты разреженности: размывается характерная бочкообразная ударно-волновая структура, возможна диффузия фонового газа в ядро струи. Таким образом, все исследуемые в работе режимы течения (точки 1,2..6) находятся в области С, т.е. в области влияния фонового газа [5].

При осесимметричном свободном расширении предельный угол разворота линий тока относительно оси струи  $\theta_m$  определяется показателем адиабаты  $k$  и числом Маха на срезе сопла  $M_c$ . Основная же масса истекающего газа проходит через приосевую область в пределах угла  $0,5 \theta_m$ . В нашем случае ( $k = 1,53$  и  $M_c = 1$ ) величина угла  $\theta_m \sim 100 - 110^\circ$  [4].

Авторы [5] предложили следующую схему струйного истечения в пространство с пониженным давлением фонового газа. При относительно малой плотности фонового газа на начальном этапе истечения скорость частиц истекающего газа может достигать предельной скорости потока. В результате взаимодействия истекающей струи с фоновым газом постепенно формируется сплошной передний фронт течения, разделяющий истекающий газ и вытесняемый фоновый. С продвижением переднего фронта вниз по течению от источника масса вытесненного газа нарастает и приводит к торможению истекающего газа на переднем фронте потока. Поскольку тормозящее влияние фонового газа не столь велико, то это и не приводит к образованию ударных волн на границах течения. Однако скорость движения переднего фронта истекающего газа оказывается заметно меньше предельной скорости стационарного потока.

Как результат, первичная волна разрежения, формирующаяся при истечении в вакуум перед областью стационарного течения, в данных условиях отсутствует, а передний фронт определяет нижнюю границу стационарной области.

На заключительной стадии истечения движение переднего фронта все более замедляется и, наконец, он достигает предельного размера струи  $L$ , определяемого соотношением давления торможения и фонового давления.

Истекающий газ, заторможенный на медленно движущемся переднем фронте, формирует вторичную волну разрежения, которая представляет собой обратный поток частиц, оказывающий влияние на характеристики результирующего потока.

### Методика исследования

#### Экспериментальная установка и условия проведения эксперимента.

В настоящей работе были проведены исследования газодинамики процесса ПХО слоев  $Si_xN_y$ .

Отличительной особенностью слоев  $Si_xN_y$  является возможность прямого наблюдения (визуализация) результатов взаимодействия реагирующей газовой смеси с подложкой. Это обеспечивает возможность формирования наглядных физических представлений об исследуемом явлении, способствует (более успешному, объективному) формированию модели исследуемого процесса и решению задач оптимизации конструктивно-технологических параметров процесса ПХО.

При проведении исследований была использована методика, позволяющая прямое наблюдение конфигурации осаждаемого слоя [2]. Методика основана на процессе осаждения (на кремниевые подложки) слоев плазмохимического нитрида кремния -  $Si_xN_y$ , из газовой смеси, содержащей  $SiH_4$ ,  $N_2$  и  $Ar$

Основной задачей работы было исследование газодинамики процесса с целью разработки методологических основ проектирования оборудования ПХО на подложки большого диаметра.

На рис.2 представлен общий реакционной камеры осаждения диэлектрических слоев  $Si_xN_y$ ,

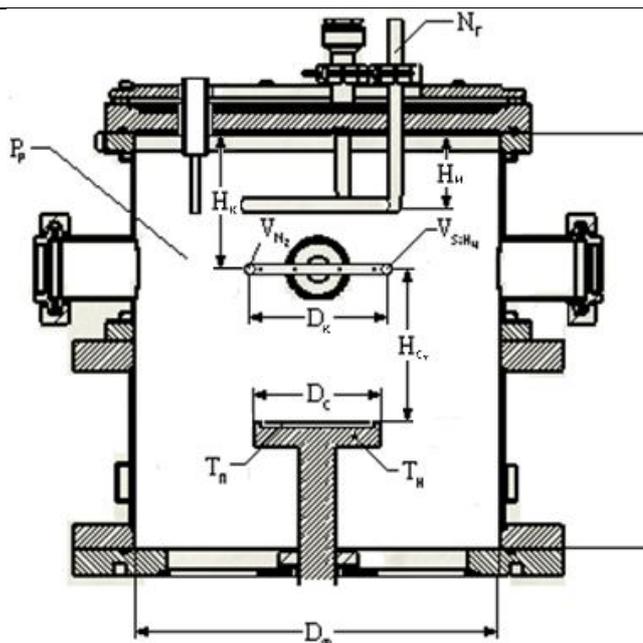


Рис.2. Схема реакционной камеры.

Плазмохимический реактор представляет собой цилиндрическую камеру диаметром  $D_{\phi} = 320\text{мм}$  и высотой 205мм, В состав рабочей камеры входят:

- индуктор (мощность до 600 Вт с рабочей частотой 13,56 МГц), представляющий собой 3-х витковую спираль с радиусом наибольшего витка 67 мм ;
- газораспределительный кольцевой коллектор с 9-ю равномерно распределенными отверстиями, направленными в центр кольца (см. рис.3);
- подложкодержатель, обеспечивающий вертикальное перемещение и подогрев подложки до  $800^{\circ}\text{C}$ ;

Подача газовой смеси к поверхности подложки (2) осуществлялась через контролируемое отверстие кольцевого коллектора (1) (рис.3).

Система вакуумной откачки установки обеспечивала создание и поддержание рабочего давления в реакторе в диапазоне от 10 до 100 Па. Необходимое давление в рабочей камере устанавливалось с помощью мотыльковой заслонки контроль давления. Контроль давления осуществлялся с помощью датчика BARATRON.

Подложка, загружаемая в шлюзовой камере в «руку» манипулятора, после выравнивания давления (В шлюзе и в реакторе) перегружалась на подложкодержатель, который (с помощью механизма вертикального перемещения) устанавливался на рабочую позицию в объеме реактора. Далее включался нагрев подложкодержателя с подложкой до заданной температуры. После выхода температуры на стационарный режим в реактор подавалась рабочая газовая смесь ( $\text{N}_2 + \text{SiH}_4 + \text{Ar}$ ) с контролируемым расходом и составом. По достижении заданных рабочего давления и температуры подложкодержателя включался ВЧ генератор, в рабочей камере загоралась плазма и начинался процесс осаждения.

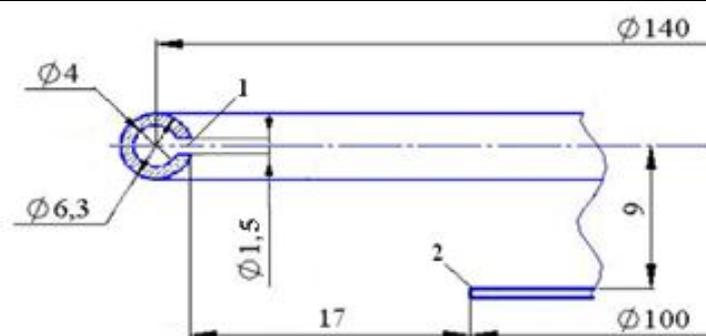


Рис.3. Фрагмент геометрии системы истечения газовой смеси и подложки:  
1 – кольцевой коллектор; 2 – подложка

Конфигурация осажденного слоя  $\text{Si}_x\text{N}_y$  (см. рис.4) и являлась качественным показателем взаимодействия потока газовой смеси с поверхностью подложки, т.е. важной (зашифрованной) характеристикой процесса осаждения.

При планировании эксперимента в качестве базовых были выбраны следующие условия:

- исходная газовая смесь, подаваемая в реактор, имела следующий состав:  $\text{N}_2:\text{SiH}_4:\text{Ar} = 7,5:1:19$  (наличие аргона обусловлено «баллонной» поставкой силано-аргоновой смеси с 5% концентрацией  $\text{SiH}_4$ );
- рабочее давление в ректоре  $P_p = 10$  Па;
- мощность, вводимая в плазму  $N_{пл}$  изменялось (в соответствии с планом эксперимента) от 150 Вт до 450 Вт;
- расходы газов  $V_{\text{N}_2} = 0,6$  л/час,  $V_{\text{Ar}+\text{SiH}_4} = 1,5$  л/час;
- температура подложкодержателя  $T_{нд} = 200^{\circ}\text{C}$ .

Эксперименты по ПХО слоев  $\text{SiN}_x\text{H}_y$  проводились при следующих условиях: - подача газовой смеси в зону осаждения осуществлялась через отверстие диаметром  $d_0 = 1,5$  мм и направленным в центр кольца параллельно плоскости пластины;  
 - расстояние (по горизонтали) от отверстия до подложки -  $H_z = 17$  мм;  
 - расстояние (по вертикали) от отверстия до подложки  $H_e$  изменялось (в соответствии с планом эксперимента) от 9 мм до 52 мм.

Для определения влияния параметров процесса на количественно-качественные показатели процесса (толщину осаждаемого слоя, показатель преломления и их равномерность по поверхности подложки) планом эксперимента было предусмотрено поочередное изменение одного из параметров процесса при сохранении других постоянными. В таблице 1 представлены исследованные варианты.

Таблица 1.

Изменения параметров процесса

№ п/п	Высота $H_b$ , мм	Давление $P$ , Па	Мощность $N_{пл}$ , Вт	Температура $T_{пл}$ , °C	Расход газа $V_{сум}$ , кг/сек
1	9	10	150	40	$2,8 \cdot 10^{-7}$
2	32	50	300	200	$3,8 \cdot 10^{-7}$
3	52	100	450	500	$5,15 \cdot 10^{-7}$

Количественные показатели процессов ПХО слоев  $\text{SiN}_x\text{H}_y$  (толщина и показатель преломления слоев) определялись в 5 точках по основным осям пластины (вдоль и поперек направлению подачи газа) методом эллипсометрии. Метод основан на измерениях и анализе изменений поляризационного состояния электромагнитного излучения оптического диапазона при отражении от исследуемого объекта. Таким образом определяют параметры поверхностей и тонких пленок, нанесенных на подложку. Анализ, проводимый при нескольких углах падения и для нескольких длин волн, так называемый метод многоугольной спектральной эллипсометрии позволяет одновременно определять показатель преломления  $n$  ( $\lambda$ ) и толщину пленки  $d$  с достаточно высокой точностью.

Основное уравнение эллипсометрии, связывающее между собой эллипсометрические параметры дельта ( $\Delta$ ) и пси ( $\Psi$ ) и комплексные значения коэффициентов отражения по амплитуде  $R_p$  и  $R_s$  для  $p$ - и  $s$ -поляризованного света записывается в виде:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta}$$

По измеренным величинам  $\Delta$  и  $\Psi$  при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели определяются оптические параметры поверхности образца.[1]

#### Методика обработки результатов.

Основные результаты по осаждению слоев плазмохимического  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , были получены на установке «Изоплаз – 200».

Результаты эксперимента обрабатывались как в традиционном (размерном) виде, так и в обобщенном представлении. Последнее представление имеет несравненное преимущество перед первым, так как дает возможность распространять результаты

единичных экспериментов на группу подобных явлений, имеющих общую физическую природу с единичными экспериментами [6]. Это открывает возможность разработке методологии проектирования устройств, реализующих процессы ПХО.

В качестве обобщенного параметра, характеризующего процесс ПХО выбран коэффициент превращения вещества -  $\Phi$ . Этот коэффициент характеризует отношение массы вещества, перешедшей в данную (твердую фазу) и осажденную на единицу поверхности подложки -  $G$ , к массе, которая введена в реактор, отнесенная на единицу площади отверстия ввода газовой смеси в реактор -  $G_{max}$ .

Масса вещества, содержащаяся в осажденном слое, определяется:

$$G_{сл} = \bar{\delta}_{сл} \rho_{сл}$$

где  $\bar{\delta}_{сл}$  - средняя толщина слоя  $Si_xN_y$ , осажденного на участке замера толщины;  $\rho_{сл}$  - плотность осажденного слоя  $Si_xN_y$

Масса вещества, вошедшего в зону превращения

$$G_{гс} = \frac{V_{гс} \rho_{гс}}{f_{отв}} \tau$$

где  $V_{гс}$  - объемный расход,  $\rho_{гс}$  - плотность газовой смеси;  $f_{отв}$  - площадь сечения отверстия выхода газовой смеси в реактор;  $\tau$  - продолжительность процесса осаждения.

По найденным значениям  $G_{сл}$  и  $G_{гс}$  вычислялись коэффициенты превращения

$$\Phi = \frac{G_{сл}}{G_{гс}}$$

Выше отмечено, что одним из определяющих чисел подобия, характеризующих струйное истечение в среде пониженного давления, является число  $Re_L$ .

При переносе компонентных масс и энергии на подложку определяющую роль выполняют коэффициенты диффузии компонентной массы  $D_I$  и энергии  $a$ . Поэтому в исследованиях, связанных с переносом масс и энергии, числами подобия параметрического типа, отражающими переносные свойства газов и их смесей, являются соответственно число Шмидта  $(\eta_{см}/\rho_{см})/D_1 = S_{сш}$  и число Прандтля  $(\eta_{см}/\rho_{см})/a = Pr$ .

Так как в проточных реакторах процессы переноса замедляются по длине поверхностей осаждения, то для учета этого эффекта вводились геометрические параметры, характеризующие местоположение (продольную координату) рассматриваемой точки, от устья сопла до начала поверхности осаждения (подложки) -  $l_0$ , от начала подложки (в направлении потока) -  $x$  и вертикальной координаты -  $h$ , отсчитываемой от оси струйного потока. За характерный геометрический размер потока принимался диаметр отверстия истечения потока газовой смеси -  $d_0$ .

С учетом того, что в наших экспериментах физические свойства практически не изменялись, то в результирующем обобщенном уравнении отсутствуют числа Шмидта и Прандтля.

Таким образом, результаты экспериментов обобщались зависимостями типа

$$\Phi = f(Re_L, \frac{x}{d_0}, \frac{l_0}{h})$$

### Результаты исследования

На рис. 4 представлены результаты (визуализации) процесса ПХО слоев  $Si_xN_y$

Рабочая смесь газов поступала в реакционную камеру (с пониженным давлением) через отверстие диаметром 1,5 мм.

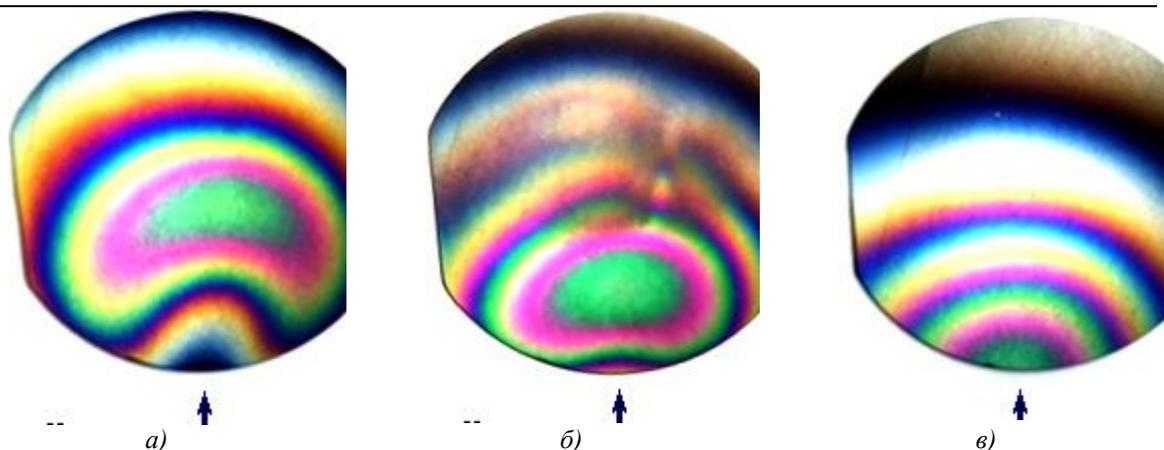


Рис.4 Конфигурация осажденных слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в зависимости от  $\text{Re}_L$  и  $p_p$   
 а)  $\text{Re}_L = 1,2$ ,  $p_p = 100$  Па; б)  $\text{Re}_L = 0,8$ ,  $p_p = 50$ ; в)  $\text{Re}_L = 0,4$ ,  $p_p = 10$

Анализируя результаты рис.4 можно заметить, как выраженная струйная структура потока, истекающая в фоновую газовую среду (рис.4, а при  $\text{Re}_L = 1,3$ ,  $p_p = 100$  Па) размывается (рис. 4, б при  $\text{Re}_L = 0,9$ ,  $p_p = 50$  Па) и переходит в волновую (рис. 4, в при  $\text{Re}_L = 0,4$ ,  $p_p = 10$  Па).

На рис.5 представлены результаты измерения (методом эллипсометрии) толщины осажденного слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в продольном (рис.5,а) и поперечном (рис. 5,б) направлениях истечения струйного потока.

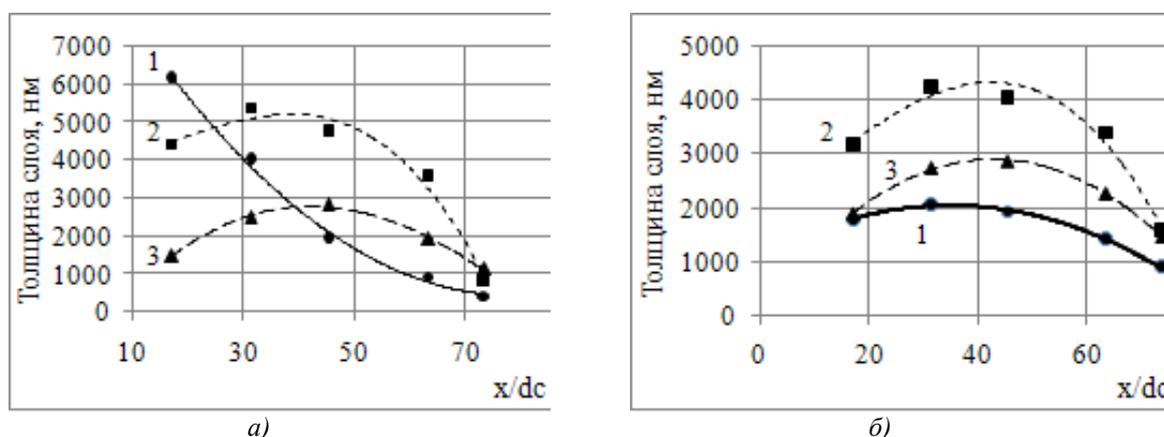


Рис.5. Продольное (а) и поперечное (б) распределение (по диаметру) толщины слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , осажденного на подложки при различных давлениях в реакторе  $p_p$ :  
 1 -  $p_p = 10$  Па; 2 -  $p_p = 50$  Па; 3 --  $p_p = 100$  Па.

Представленные зависимости (рис. 5,а) также свидетельствуют об изменении характера взаимодействия потока с подложкой от струйного, со смещенными максимумами относительно входа потока (рис. 5,а - 2,3), до диффузионного (рис. 5,а - 3), пропорционального примерно квадрату расстояния удаления от устья струи. При этом большая равномерность осаждаемого слоя имеет место при большем давлении, а «растянутый» профиль по диаметру подложки косвенно свидетельствует о развитии потока при пониженном давлении.

Одним из основных, определяющих технологических параметров процесса ПХО является рабочее давление в реакционной камере. От общего давления в реакторе зависит как концентрация активных частиц, так балансовые соотношения между ними. Поэтому задача оптимизации процесса ПХО органично связана с оптимизацией рабочего давления.

На рис. 6 представлены зависимости изменения относительной скорости осаждения слоев  $Si_xN_y$  в продольном (рис. 6,1) и поперечном (рис. 6,2) направлениях (замеренных по 5-ти точкам подложек в каждом из направлении) и усредненная (рис.6,3) (по 49-ти точкам подложек) от давления в реакционной камере. На этом же рисунке приведены сравнительные результаты работы [1]

Из приведенных характеристик следует отметить явно выраженный максимум скорости осаждения. Для наших экспериментов (выраженное струйное продольное истечение) этот максимум находится в диапазоне 55 – 60 Па. Для экспериментов [1] (подача рабочей смеси в направлении нормальном к подложке) максимум скорости ПХО слоев  $Si_xN_y$  находится в области 35 – 40 Па. По нашему представлению это различие, вероятно, связано с различием схем подачи газовой смеси в зону осаждения. Этот факт свидетельствует о заметном влиянии газодинамики потока на процесс ПХО слоев  $Si_xN_y$

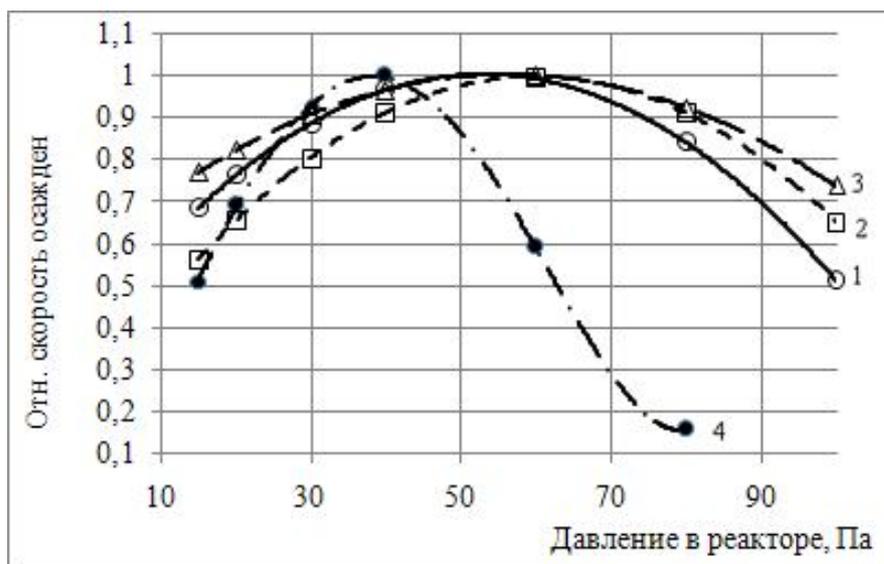


Рис.6. Зависимости скорости осаждения плазмохимических слоев  $Si_xN_y$  по поверхности подложки от рабочего давления в зоне осаждения:  
1 – по направлению потока; 2 – в поперечном направлении к потоку; 3 – усредненное по подложке; 4 – результаты работы [1]

Представленные выше результаты (рис.5 и рис. 6) носят частный характер и их трудно использовать при проектировании установок для обработки подложек больших диаметров. Однако эти трудности могут быть преодолены при использовании обработки результатов в обобщенных переменных. В этом случае результаты единичных опытов могут быть распространены на группу подобных явлений, имеющих общую физическую природу с единичными экспериментами

На последующих рисунках (рис.7 и рис.8) и в таблице 2 приведены примеры обобщения результатов процесса ПХО слоев  $Si_xN_y$

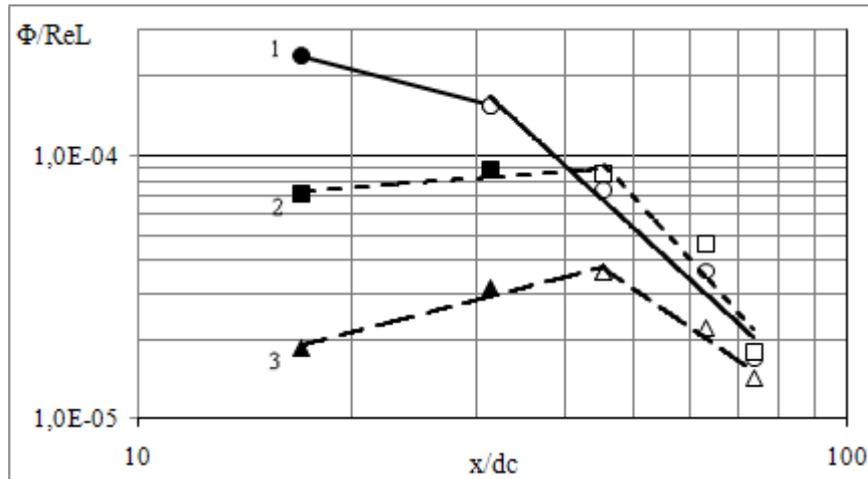


Рис.7. Зависимости локальных коэффициентов превращения вещества при различных давления  $p_p$  в зоне осаждения:  
 1 -  $p_p = 10$  Па; 2 -  $p_p = 50$  Па; 3 -  $p_p = 100$  Па.

При анализе представленных результатов следует подчеркнуть сложный характер зависимостей, имеющих точку перегиба. Причем этот перегиб удален на разные расстояния от начала подложки в зависимости от давления в реакторе. Так изменение хода кривой, отвечающей давлению  $p_p = 10$  Па и имеющей более плавный характер, имеет место при меньшем удалении от начала осаждения ( $x/d_c \approx 32$ ), что соответствует примерно центру подложки диаметром 100мм. Повышение давления приводит к перемещению точки перелома к краю подложки. Так при давлении 50 Па точка перелома находится на удалении уже более 80 мм, а осаждаемый слой  $Si_xN_y$  будет иметь более высокую однородность. Кроме того этот результат является косвенным подтверждением реализации процесса осаждения на подложки диаметром 150 мм (при сохранении геометрии зоны осаждения). Как следует из представленных зависимостей более высокая однородность толщины может быть получена при более низком давлении, находящемся в диапазоне 35-40 Па., что находится в хорошем соответствии с результатами [1], представленными на рис.6,4. Повышение давления приводит к ухудшению результатов.

Обобщенные зависимости локального коэффициента превращения от мощности генератора плазмы (рис.8) свидетельствуют о том, что величина мощности имеет более выраженное влияние на равномерность толщины осаждаемого слоя  $Si_xN_y$ , причем более высокая однородность имеет место при мощности 150 Вт. Можно ожидать, что снижение мощности (менее 150 Вт) приведет к повышению однородности слоев.

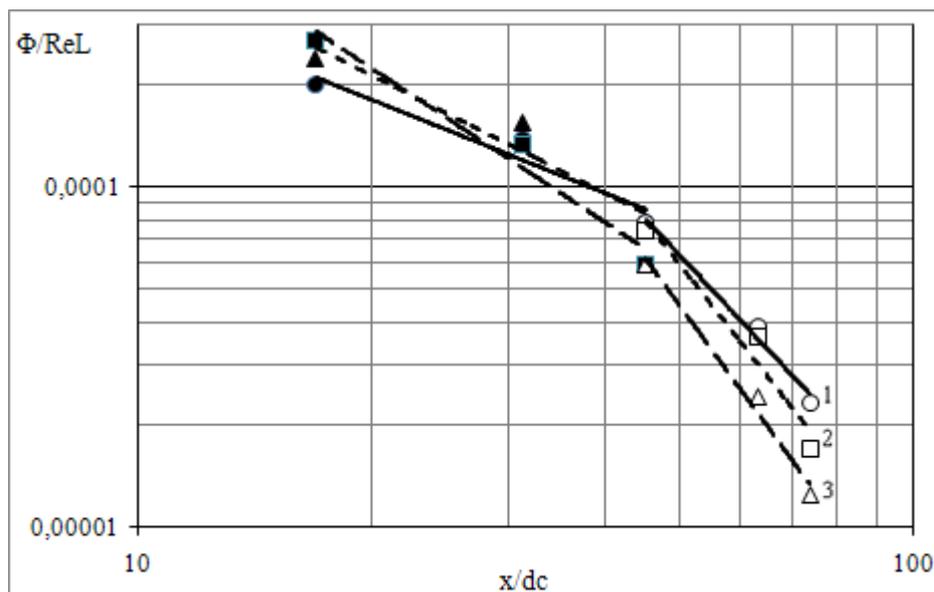


Рис.8. Зависимости локальных коэффициентов превращения вещества при различных мощности генератора плазмы  $N_{пл}$ :  
 1 -  $N_{пл} = 150$  Вт; 2 -  $N_{пл} = 300$  Вт; 3 -  $N_{пл} = 450$  Вт.

### Критериальные уравнения

Таблица 2

	До точки перегиба	За точкой перегиба
/п	<b>2</b>	<b>3</b>
	При условиях изменяющегося давления в реакторе $P_p = Var$	
	$\Phi_1 = 0,0017 \cdot Re_L(x/d_c)^{-0,7}$	$\Phi_1' = 0,8 \cdot Re_L(x/d_c)^{-2,5}$
	$\Phi_2 = 4 \cdot 10^{-5} \cdot Re_L(x/d_c)^{0,2}$	$\Phi_2' = 28 \cdot Re_L(x/d_c)^{-3,3}$
	$\Phi_3 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Re_L(x/d_c)^0$	$\Phi_3' = 0,042 \cdot Re_L(x/d_c)^{-1,8}$
	При условиях изменяющейся мощности плазмы $N_{пл} = Var$	
	$\Phi_1 = 0,0028 \cdot Re_L(x/d_c)^{-0,9}$	$\Phi_1' = 0,9 \cdot Re_L(x/d_c)^{-2,5}$
	$\Phi_2 = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot Re_L(x/d_c)^{-1,15}$	$\Phi_2' = 4,9 \cdot Re_L(x/d_c)^{-2,9}$
	$\Phi_3 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Re_L(x/d_c)^{-1,5}$	$\Phi_3' = 9,7 \cdot Re_L(x/d_c)^{-3,1}$

### Заключение

Процесс ПХО проводится в условиях динамического вакуума, при котором рабочая газовая смесь (через распределительные устройства) с высокой скоростью вводится в зону осаждения, что несомненно должно отражаться на характере распределения свойств осаждаемых слоев. Косвенное подтверждение этого факта находит место в большинстве публикаций, посвященных анализу процессов ПХО слоев. Однако практически ни в одной работе не проводится информация,

акцентирующая внимание на вопросах истечения газового потока в вакуум. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка восполнения этого пробела. Кроме того, в качестве методологической базы предложено использовать основы метода обобщенного анализа, что придает универсальность подхода при разработке процессов ПХО и оборудования, реализующих их.

Использование возможности прямого наблюдения конфигурации осаждаемых слоев  $SiN_xH_y$  и обработки экспериментальных данных в обобщенном виде позволили:

- выявить области ПХО слоев  $SiN_xH_y$ , имеющие различные закономерности по различным частям подложки:
- определить вид и формализацию этих закономерностей:
- показать, что область оптимального рабочего давления ПХО слоев  $SiN_xH_y$  находится в диапазоне 35-40 Па, а мощность генерации плазмы может быть снижена до 100 – 120 Вт.

### Литература

1. Ковалгин, А.Ю. Исследование процессов плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния /Дис.к.т.н., С-Пб, 1995.
2. Самойликов В.К. Оптимизация технологического оборудования и процесса газофазной эпитаксии кремния производства СБИС. :Дис. д.т.н., М.: 1996.
3. Захаров В. В. Прямое моделирование Монте-Карло истечения струй из сверхзвуковых сопел в вакуум при малых числах Рейнольдса и их взаимодействия с параллельной плоской поверхностью /Дис.к.т.н., С-Пб, 2000
4. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984, 234с.
5. Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е. Импульсные сверхзвуковые струи: применение, проблемы, решения //Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2006 .Т.1, вып .2, С.29-47.
6. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М: Высшая школа, 1974. 328 с.