

УДК 533.9:621.039.66, 539.23+546.28

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ГАЗОВ, АКТИВИРОВАННЫХ В ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЕ

В. О. Константинов, С. Я. Хмель

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mail: khmel@itp.nsc.ru

Представлены результаты зондовых измерений температуры, концентрации, функции распределения по энергиям электронов и потенциала плазмы в свободной струе газа, активированной в электронно-пучковой плазме, и в плоском реакторе. Измерения проводились с помощью одиночного, двойного и тройного электростатических зондов в струях газовых смесей гелий — аргон и гелий — аргон — моносилан. Последняя из названных смесей использовалась для осаждения пленок микрокристаллического и эпитаксиального кремния. Более качественные пленки микрокристаллического кремния получались в плотной ( $n_e \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ) и холодной ( $T_e \approx 1,0 \div 0,5 \text{ эВ}$ ) плазме с низким потенциалом ( $U_{sp} \approx 10 \text{ В}$ ), в то время как для выращивания монокристаллических пленок кремния требовалась более горячая плазма ( $T_e \approx 3 \div 5 \text{ эВ}$ ) с потенциалом  $U_{sp} \approx 15 \text{ В}$ .

**Ключевые слова:** зондовая диагностика, электронно-пучковая плазма, плазмохимическое осаждение тонких пленок кремния.

**Введение.** Для осаждения тонких пленок широко используются плазмохимические методы с активацией газообразных реагентов в плазме электрических разрядов или плазме электронного пучка [1, 2]. В частности, для осаждения пленок кремния применяется силановая плазма [3–5]. Исследование такой плазмы представляет собой актуальную задачу, причем одним из наиболее распространенных методов диагностики является зонд Ленгмюра [6–8]. По зондовой характеристике можно получить информацию о температуре электронов, их плотности, потенциале плазмы, а в общем случае — о функции распределения электронов по энергиям. Однако при использовании одиночного и двойного зондов невозможно определить мгновенные значения параметров плазмы (измерение и обработка вольт-амперной характеристики — достаточно длительная процедура). Эту информацию позволяет получить тройной зонд [8].

В работе [9] с использованием зондовой диагностики показано, что в электронно-пучковой плазме азота температура и концентрация вторичных электронов составляют  $0,5 \div 2,5 \text{ эВ}$  и  $10^{16} \div 10^{17} \text{ м}^{-3}$  соответственно. Установлено, что при увеличении давления в электронно-пучковой плазме температура понижается, а концентрация растет. Измерения, проведенные в аргоновой электронно-пучковой плазме [10], показали, что температура электронов составляет около 1 эВ, концентрация —  $5 \cdot 10^{16} \div 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , потенциал плазмы приближенно равен 4 В. Такая плазма оказывает мягкое, неразрушающее воздействие на поверхность и пригодна для обработки материалов и осаждения качественных тонких пленок [2]. Для осаждения эпитаксиальных слоев требуется более жесткая плазма, однако в этом случае принципиальной является величина потенциала плазмы [11].

В химически активной плазме поверхность зонда загрязняется растущими пленками, поэтому для проведения корректных измерений в такой плазме используют подогреваемые зонды [7]. В работе [12] с помощью подогреваемых зондов установлено, что при увеличе-

нии расхода моносилана или давления в разрядной камере температура и концентрация электронов снижаются.

В данной работе проведены исследования в свободных струях смесей гелий — аргон и гелий — аргон — моносилан, активированных в электронно-пучковой плазме, и в потоке газа внутри плоского реактора. Целью данной работы является определение с помощью зондовой диагностики оптимальных параметров плазмы для осаждения пленок микрокристаллического и эпитаксиального кремния.

**Экспериментальная установка и методика эксперимента.** Эксперименты проводились на газодинамической установке низкой плотности Института теплофизики СО РАН. Схема эксперимента приведена на рис. 1. В качестве генератора плазмы использовался струйный источник, состоящий из электронной пушки с плазменным катодом и двойного осесимметричного сверхзвукового кольцевого сопла [13]. Внешние диаметры сопел 28 и 18 мм, высота критического сечения 1 мм, зазор между пластинами реактора 35 мм. Через внешнее кольцевое сопло в вакуумную камеру подавалась смесь рабочих газов (аргона и моносилана), а через внутреннее — гелий, служивший для защиты электронной пушки. Расход газов контролировался расходомер-регуляторами фирмы “MKS Instruments”. Таким образом формировались струи газовых смесей гелий — аргон и гелий — аргон — моносилан. Давление в вакуумной камере в зависимости от расхода газа поддерживалось на уровне  $0,1 \div 1,5$  Па. Дополнительный кольцевой электрод, установленный за соплом, служил для изменения энергии ионов. Пленки кремния осаждались в плоском реакторе (см. рис. 1).

Для нахождения оптимальных условий осаждения пленок параметры системы изменялись в следующих диапазонах: энергия пучка  $E = 0,6 \div 2,0$  кэВ, ток пучка  $I = 170 \div 400$  мА, расход аргона  $G_{Ar} = 0 \div 12$  н. л/мин, расход моносилана  $G_{SiH_4} = 0 \div 0,2$  н. л/мин (н. л — нормальный литр, т. е. литр газа при нормальных условиях:  $T = 273$  К,  $p = 101\,325$  Па). В данной работе использовались одиночный, двойной, двойной подогреваемый, тройной и тройной подогреваемый вольфрамовые зонды диаметром  $0,15 \div 0,35$  мм и длиной  $4 \div 15$  мм. Зонд крепился на двухкомпонентном координатном механизме на 5 мм ниже оси пучка во избежание возможного повреждения в результате воздействия электронного пучка. В эксперименте измерялись температура и концентрация электронов в свободной струе и плоском реакторе на фиксированном расстоянии от среза сопла при изменении расхода и состава газа для неизменного тока пучка, а также при изменении тока для неизменных расхода и состава газа. Кроме того, измерены поперечные профили температуры и концентрации

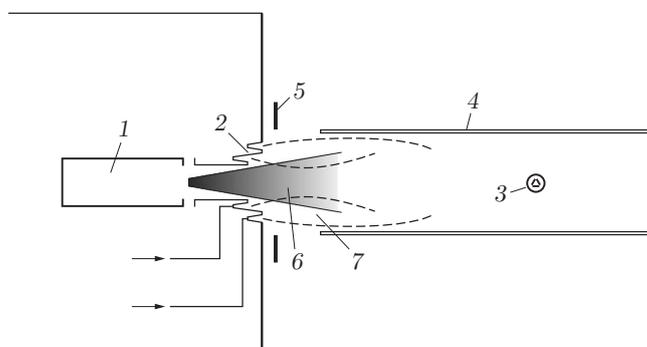


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — электронная пушка с плазменным катодом; 2 — блок кольцевых сопел; 3 — зонд Ленгмюра; 4 — реактор; 5 — дополнительный кольцевой электрод; 6 — электронный пучок; 7 — струя газов; штриховые линии — границы струи

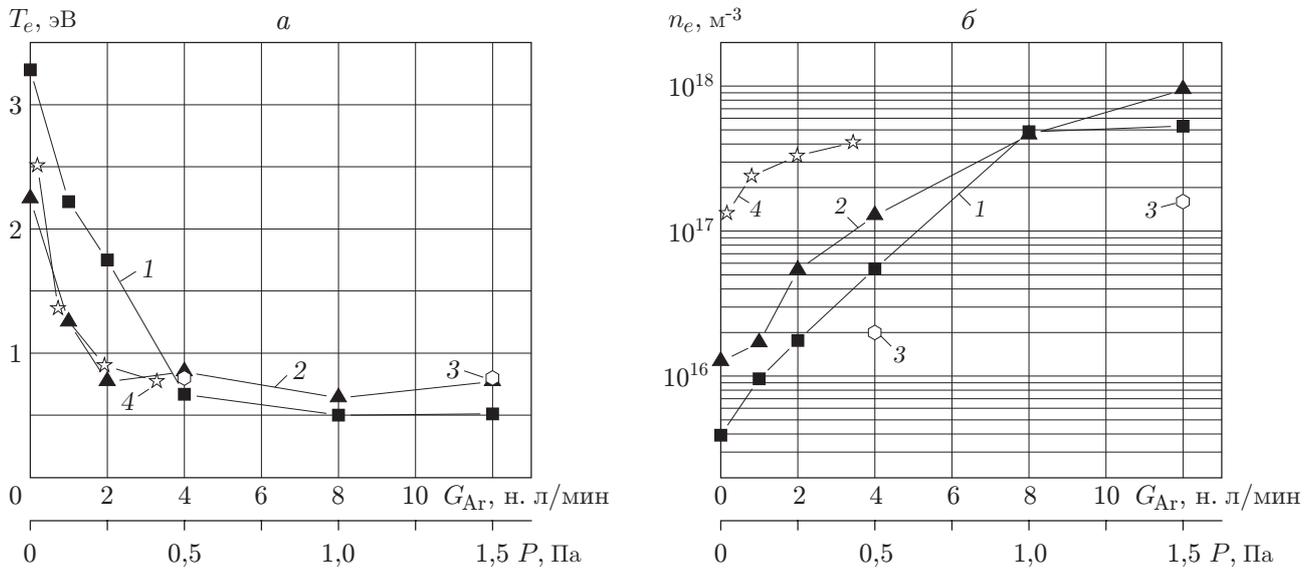


Рис. 2. Зависимости температуры (а) и концентрации (б) электронов от расхода (давления) газа:

1–3 — данные настоящей работы: 1 — свободная струя, 2 — реактор, 3 — реактор ( $G_{SiH_4} = 0,2$  н. л/мин); 4 — данные работы [9]

электронов. В некоторых экспериментах зонд Ленгмюра использовался для измерения или оценки потенциала плазмы и функции распределения электронов по энергиям [6].

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 2 приведены зависимости электронной температуры и концентрации от расхода (давления) аргона, полученные с помощью двойного зонда в гелий-аргоновой электронно-пучковой плазме на расстоянии 150 мм от среза сопла в свободной струе и на расстоянии 80 мм — в реакторе ( $E = 0,6$  кэВ,  $I = 170$  мА). С увеличением расхода аргона температура электронов падает, что может быть обусловлено рассеиванием и деградацией электронного пучка вблизи среза сопла. Согласно оценке длина свободного пробега электронов вблизи среза сопла при увеличении расхода аргона уменьшается до 1 мм, и в результате столкновений они теряют свою энергию. Вероятно, при  $G_{Ar} \approx 4$  н. л/мин в свободной струе и при  $G_{Ar} \approx 2$  н. л/мин в реакторе электронный пучок почти полностью рассеивается и температура становится постоянной. Выход электронной температуры на постоянное значение в реакторе происходит раньше, чем в свободной струе. Это может быть обусловлено наличием ударной волны, образующейся в реакторе, что вызывает увеличение плотности и как следствие дополнительное рассеивание электронов. Такое поведение температуры, по-видимому, означает, что основная область ионизации расположена вблизи среза сопла. При увеличении расхода аргона концентрация электронов резко возрастает и при больших расходах имеет приблизительно одинаковые значения в свободной струе и в реакторе. На рис. 2 приведены также данные работы [9]. Так как в [9] измерения проводились в статических условиях в электронно-пучковой плазме в атмосфере азота, то сравнение результатов можно проводить, используя значения давления фонового газа. Причем сравнение с условиями в реакторе более корректно, так как на входе в него формируется ударная волна, поток становится дозвуковым и давление в нем близко к фоновому. На рис. 2, а видно, что температуры электронов хорошо согласуются. Это означает, что давление, а точнее, плотность газа является определяющим параметром для электронной температуры при условии, что расстояние до точки измерения велико по сравнению с длиной свободного пробега электро-