

02;03;06;12

Конденсация смесей моносилан–аргон и моносилан–гелий в свободной струе

© С.Я. Хмель, С.Ю. Федоров, Р.Г. Шарафутдинов

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

(Поступило в Редакцию 2 августа 2000 г.)

Конденсация газовых смесей моносилан–аргон и моносилан–гелий исследовалась в свободных струях с помощью диагностики, основанной на рэлеевском рассеянии лазерного излучения. Процесс конденсации в смеси SiH₄–Ar начинается при меньшем давлении торможения, на меньшем расстоянии от сопла и протекает более интенсивно, чем в смеси моносилан–гелий и в чистом аргоне. Результаты рэлеевских измерений в струе конденсирующейся смеси моносилан–аргон обобщаются по параметру $P_0 d^{0.8}$. Анализ полученных результатов и литературных данных позволяет предположить, что в смеси моносилан–аргон идет процесс совместной конденсации моносилан–аргон с образованием смешанных кластеров.

Введение

В настоящее время в электронике интенсивно развиваются направления, связанные с изготовлением полупроводниковых структур на больших площадях подложек (солнечные элементы, тонкопленочные транзисторы для жидкокристаллических дисплеев и т.д.). Условно их называют электроникой больших площадей [1]. Традиционные методы осаждения тонких пленок, основанные на использовании электрических разрядов различных типов, ограничивают развитие электроники больших площадей. Поэтому в последнее время для нанесения тонких пленок различного состава находят все более широкое применение газовые струйные методы с различными способами активации газообразных реагентов [2–8]. Они позволяют достичь высоких локальных скоростей осаждения [4,8] и решить проблему создания слоев на больших площадях подложек.

В струях газообразных реагентов, применяемых для получения тонких пленок, может протекать процесс конденсации, возникающий из-за охлаждения газа при его адиабатическом расширении [9,10]. В настоящее время влияние этого процесса на скорости осаждения и качество синтезируемых пленок изучены недостаточно [11]. В работе [4] для синтеза пленок аморфного гидrogenизированного кремния использовали свободную струю смеси моносилан–аргон, активированную электронным пучком. При увеличении давления в газовом источнике наблюдался ряд эффектов: стремление скорости роста пленок к постоянному пределу, аномальное излучение атомов аргона и молекул моносилана [11–13]. В указанных работах было сделано предположение, что причина этих эффектов — процесс конденсации в струе.

В работе [14] есть упоминание о том, что в свободной струе моносилан–аргон наблюдали процесс конденсации, т.е. образование и последующий рост кластеров моносилана, но нет самих данных. В [15] методом масс-спектрометрии молекулярного пучка наблюдали образо-

вание кластеров в импульсной струе смеси моносилан–аргон за соплом диаметром 1 мм.

Целью настоящей работы является систематическое исследование процесса конденсации в свободных струях газовых смесей моносилан–аргон и моносилан–гелий с помощью лазерной рэлеевской диагностики, обеспечивающей прямое измерение частиц конденсата непосредственно в газовом потоке.

Эксперимент

Эксперименты проводились на газодинамической установке низкой плотности ВС-4 Института теплофизики СО РАН. Используемое оборудование схематически показано на рис. 1. Источником газа 1 служили осесимметричные звуковые сопла, изготовленные из

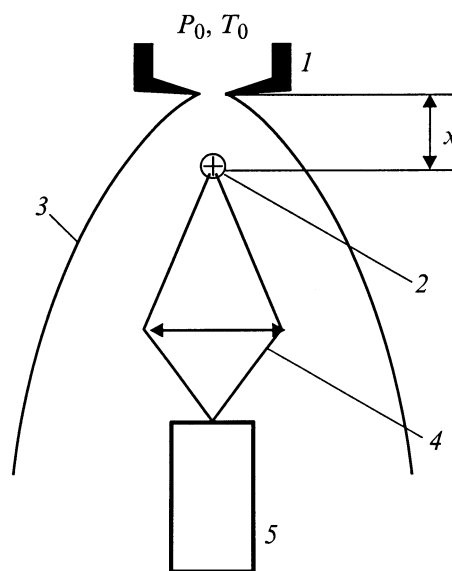


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

кварцевых трубок с внутренним диаметром 20–21 мм и зауженным концом в виде круглых отверстий диаметром $d = 0.54, 1.07, 1.98, 3.6, 4.8$ мм. Давление в форкамере сопла или давление торможения измерялось с помощью мембранных датчиков. Форкамера оборудована омическим нагревателем, что позволяло регулировать температуру торможения в пределах от комнатной до 300°C. Температура газа в форкамере контролировалась термпарой и обычно равнялась комнатной температуре. Газовый источник был установлен на трехкомпонентном координатном механизме, с помощью которого проводились юстировки сопла и изменялось расстояние между соплом и лазерным лучом с точностью до 0.1 мм. Газ из источника расширялся в вакуумную камеру, откачиваемую бустерными насосами с производительностью 35 000 л/с. В рабочих режимах с расходом газа давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне 10^{-3} – 10^{-2} Торр. Основная часть исследований была проведена с использованием газовой смеси 5% моносилана в аргоне. Кроме того, отдельные измерения были проведены на смеси 10% моносилана в гелии.

В экспериментах использовался твердотельный Nd:YAG лазер с модуляцией добротности и преобразованием излучения во вторую гармонику (532 нм, 10 мДж/импульс, 20 нс, 10 Гц). Пучок лазера, пройдя вращатель поляризации, направлялся через входное окно внутрь камеры. С помощью двухлинзовой системы ($F = 300$ мм) пучок 2 фокусировался в области измерений внутри струи 3, образуя измерительный объем с диаметром 0.1 мм. Рассеянный свет собирался линзой 4 ($F = 100$ мм), проходил через выходное окно камеры и фокусировался на диафрагме, ограничивающей длину измерительного объема размером 0.2 мм. Оси фокусирующей и собирающей систем были взаимно перпендикулярны, причем ось собирающей системы совпадала с осью сопла. Такое расположение оптических элементов благоприятно для юстировки и фокусировки и при этом не возмущает струю из-за достаточно большого расстояния сопло–линза собирающей системы. Сигнал, с расположенного за диафрагмой фотомножителя 5 (ФЭУ-97), пройдя линию задержки, попадал на вход 1 зарядо-цифрового преобразователя ЗЦП-4, установленного в кресте Камак. Синхронизация системы регистрации осуществлялась по сигналу с лавинного фотодиода. Совмещение сигнала с "окном" интегрирования (200 нс) контролировалось по осциллографу С1-75. Для контроля энергии лазерного импульса часть излучения лазера попадала на фотодиод, сигнал с которого подавался на вход 2 ЗЦП-4. Преобразователь ЗЦП-4 через систему Камак управлялся персональным компьютером, что позволяло осуществлять накопление данных для последующей обработки. В дальнейшем по результатам моноимпульсных измерений рассчитывались "мгновенные" плотности, которые затем усреднялись по ансамблю из 100 значений.

Предварительно проводилось измерение фоновых (в вакууме) и калибровочных (в воздухе при давлении

20–40 Торр) сигналов. Затем измерялись сигналы в струе в зависимости от расстояния, давления или температуры в форкамере. Единичные значения калибровочных сигналов, заметно превышающие средний уровень из-за рассеяния на пыли, подвергались отбраковке. При измерениях в струях присутствие пыли не обнаружено.

Интенсивность рассеянного рэлеевского излучения I в газе определяется выражением [16]

$$I = A(n - 1)^2 W N, \quad (1)$$

где N — числовая плотность газа, W — интенсивность лазерного излучения, n — показатель преломления исследуемого газа в стандартных условиях.

Величина постоянного коэффициента A определялась из калибровки, проведенной при известной плотности воздуха. Значения показателей преломления для воздуха (1.000292), аргона (1.000284), гелия (1.000035) были взяты из [17], для моносилана (1.000833) — из [18]. Значение показателя преломления для смеси газов n_{mix} вычислялось по формуле [16]

$$(n_{\text{mix}} - 1)^2 = \alpha \times (n_1 - 1)^2 + (1 - \alpha) \times (n_2 - 1)^2, \quad (2)$$

где n_1, n_2 — показатели преломления для компонентов 1 и 2 смеси; α — концентрация первого компонента в смеси.

С использованием этих формул измерялись абсолютные значения плотности в свободных струях аргона, смесей аргон–моносилана и гелий–моносилан в отсутствие процесса конденсации.

Интенсивность рассеянного излучения I в смеси газ–конденсат пропорциональна величине [19]

$$I = A(n - 1)^2 W \sum_{g=1}^{\infty} N_g g^2, \quad (3)$$

где N_g — концентрация кластеров размером g (содержащих g мономеров).

В отсутствие кластеров формула (3) сводится к формуле (1). Формула (3) может быть преобразована к следующему виду [20]:

$$I = A(n - 1)^2 W N [(1 - q) + q \langle g \rangle], \quad (4)$$

где $N = \sum_{g=1}^{\infty} N_g \times g$ — полная числовая плотность смеси

газ–конденсат, $q = \sum_{g=2}^{\infty} N_g \times g / N$ — доля конденсата,

$\langle g \rangle = \sum_{g=2}^{\infty} N_g \times g^2 / \sum_{g=2}^{\infty} N_g \times g$ — средний размер кластера.

Для конденсата достаточно консервативная величина и она обычно не превышает 30%. При этом размер кластеров может составлять десятки и сотни мономеров. Таким образом, вклад кластерного компонента по сравнению с газовым компонентом в интенсивность рассеяния быстро увеличивается по мере размеров кластеров, что позволяет регистрировать в газе даже небольшое количество

кластеров большого размера. При наличии данных о доле конденсата с помощью формулы (4) можно определить средний размер кластеров в смеси газ-конденсат.

Результаты

Сначала в работе исследовался процесс конденсации в струе чистого аргона как для методической проверки диагностики, так и для последующего сравнения с конденсацией смеси моносилан-аргон. На рис. 2 приведена зависимость относительной интенсивности рассеянного рэлеевского излучения I/I_0 на оси свободной струи аргона за звуковым соплом диаметром 1.98 mm от расстояния сопло-точка измерения для давления торможения 562 Torr и комнатной температуры газа в источнике. За I_0 принято значение I соответствующее числовой плотности газа в форкамере N_0 при указанных значениях давления и температуры торможения. На этом же рисунке приведены экспериментальные и расчетные данные из работ [20,21], а также расчетная изоэнтропическая зависимость относительной плотности N/N_0 для одноатомного газа. В отсутствие процесса конденсации, согласно формуле (1), $I/I_0 = N/N_0$. Как показали измерения для расстояний меньше 3.5 калибров, плотность примерно на 30% ниже расчетной, но при этом характер поведения экспериментальной и расчетной величин (наклон зависимости) одинаков. Разница между экспериментом и расчетом, по-видимому, объясняется неидеальностью сопла. При дальнейшем увеличении расстояния измеренная величина резко возрастает и отклоняется от изоэнтропического расчета. Это обусловлено появлением кластеров в потоке и теперь измеренная величина пропорциональна $Nq\langle g \rangle$ (4) (она скорее отражает концентрацию и размер кластеров, а не плотность газа). Процесс конденсации в потоке протекает очень быстро, что приводит к образованию фронта конденсации. На

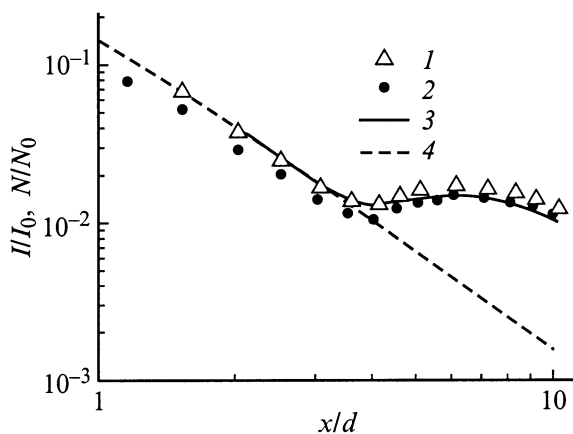


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности рассеянного рэлеевского излучения I/I_0 и плотности газа N/N_0 от расстояния x/d на оси свободной струи аргона. 1 — эксперимент, работа [20], $d = 1.93$ mm; 2 — эксперимент, настоящая работа, $d = 1.98$ mm; 3 — расчет, работа [21]; 4 — изоэнтропа.

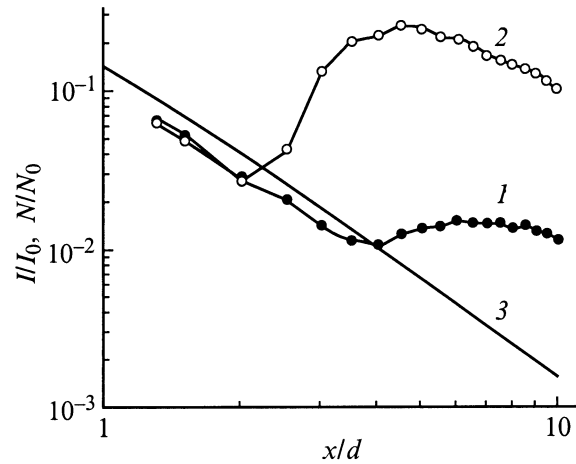


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности рассеянного излучения I/I_0 плотности газа N/N_0 от расстояния x/d на оси свободной струи аргона и смеси моносилан-аргон. 1 — Ar, $P_0 = 537$ Torr; 2 — Ar + 5% SiH₄, $P_0 = 554$ Torr; 3 — изоэнтропа.

этом участке зависимости возрастание рассеянного сигнала за счет увеличения размера и количества кластеров превосходит его уменьшение за счет падения плотности. При дальнейшем расширении потока процесс конденсации "замораживается" из-за недостатка столкновений, а экспериментальная и расчетная величины опять уменьшаются с ростом расстояния примерно одинаково. На рисунке также приведено распределение относительной интенсивности вдоль оси свободной струи аргона, измеренное с помощью рэлеевской диагностики в работе [20]. Согласно между данными нашей работы и данными, полученными в [20] в тех же условиях за соплом диаметром 1.93 mm, хорошее, особенно за фронтом конденсации. Существенно лучшее соответствие между изоэнтропой и результатами эксперимента [20] до фронта конденсации по сравнению с нашими данными обусловлено тем, что в указанной работе использовали более качественные стальные сопла со специально профилированной дозвуковой частью сопла. Кроме того, на рис. 2 приведен расчет течения газа с конденсацией за звуковым соплом диаметром 1.93 mm в тех же условиях [21]. Удовлетворительное согласие между результатами эксперимента и расчетом подтверждает достоверность полученных в настоящей работе результатов.

На рис. 3 приведены распределения относительной интенсивности рассеянного излучения I/I_0 вдоль оси струи за звуковым соплом диаметром 1.98 mm при постоянном давлении торможения для чистого аргона и смеси моносилан-аргон. Ошибка измерений не более 5%. Здесь же представлена расчетная изоэнтропическая зависимость N/N_0 для смеси. Заметим, что для смеси расчетная зависимость близка к изоэнтропе для чистого газа, но меньше последней на 3–5%, поэтому она не приведена на рисунке. По этой же причине до фронта конденсации распределение плотностей в струе чистого

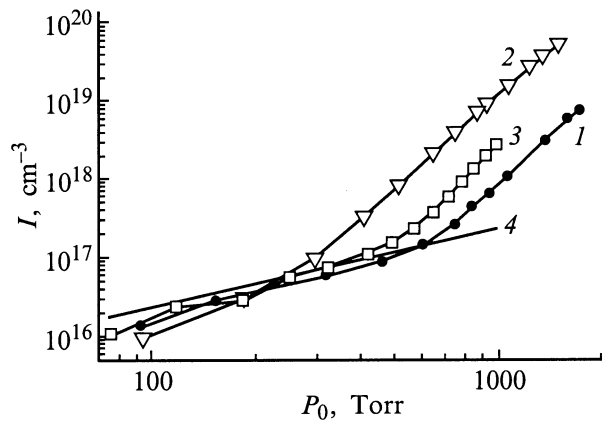


Рис. 4. Зависимость интенсивности рэлеевского сигнала I от давления торможения P_0 в свободных струях аргона и смесей моносилан-аргон и моносилан-гелий. 1 — Ar, 2 — Ar + 5% SiH_4 , 3 — He + 10% SiH_4 , 4 — изохропа.

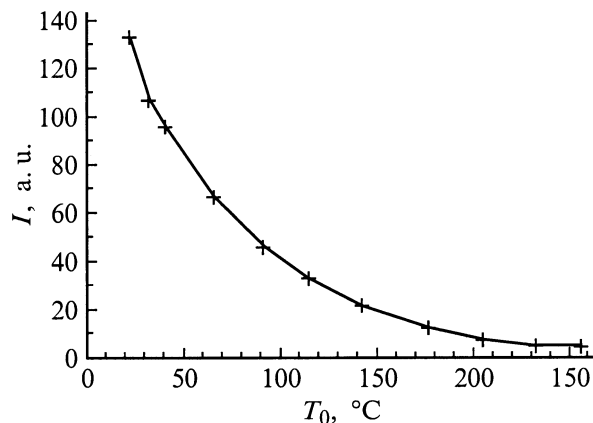


Рис. 5. Зависимость интенсивности рассеянного излучения I от температуры торможения T_0 на оси свободной струи смеси 5% моносилана в аргоне. Исходное давление $P_0 = 1740$ Torr.

аргона и смеси близки друг к другу. Конденсация в смеси начинается заметно раньше и протекает намного более интенсивно, чем в чистом газе. Для смеси фронт конденсации расположен на 2 калибрах, а для чистого аргона — на 3.5 калибрах. За фронтом конденсации рэлеевский сигнал в смеси примерно на порядок больше, чем в чистом газе.

На рис. 4 показаны зависимости интенсивности рассеянного излучения I от давления торможения на фиксированном расстоянии сопло-точка измерения $x = 5$ mm для чистого аргона и смесей моносилан-аргон, моносилан-гелий в струе за соплом диаметром 1.07 mm. Ошибка измерений не превышает 10%. Интенсивность представлена в единицах эквивалентных значений числовой плотности газа. В отсутствие конденсации (при малых P_0) интенсивность и плотность газа совпадают. Как следует из графика, развитая конденсация в струе Ar начинается при $P_0 \sim 600$ Torr, а в

смеси — при $P_0 \sim 250$ Torr. При меньших давлениях измеренные плотности согласуются друг с другом и с изохропой для смеси. Как и в предыдущих измерениях, конденсация в струе смеси протекает намного более интенсивно, чем в струе аргона. Помимо измерений в смеси моносилан-аргон были проведены измерения в смеси 10% моносилан-гелий. Конденсация в струе смеси моносилан-гелий начинается при заметно большем давлении (~ 450 Torr), чем в смеси моносилан-аргон (~ 250 Torr), и протекает с существенно меньшей интенсивностью.

На рис. 5 приведена зависимость интенсивности рассеянного излучения в свободной струе за соплом диаметром 0.54 mm на расстоянии $x = 5$ mm от температуры торможения для смеси моносилан-аргон. При увеличении температуры газа в источнике до 250°C интенсивность рассеяния уменьшается примерно в 30 раз. Этот вполне ожидаемый результат связан с сильной зависимостью конденсации от температуры торможения газа [9,10].

На рис. 6 показаны осевые распределения относительной интенсивности рэлеевского рассеяния в свободной струе смеси моносилан-аргон от расстояния сопло-точка измерения для сопел диаметром 1.07, 1.98, 3.6, 4.8 mm при постоянном давлении. Ошибка измерений не превышает 10%. Здесь же приведена расчетная изохропическая зависимость N/N_0 для смеси. Из рисунка видно, что процесс конденсации протекает в струе за любым из испытанных сопел, однако для сопел с меньшим диаметром он идет интенсивней. Фронт конденсации располагается на расстояниях 2–3.5 калибра, причем чем меньше сопло, тем ближе фронт конденсации. Уже при диаметре 1.07 mm становится затруднительным измерить участок струи до фронта конденсации из-за рассеяния от близко расположенного сопла. Отметим, что для смеси моносилан-гелий фронт конденсации расположен на несколько большем расстоянии (~ 2.5 калибра).

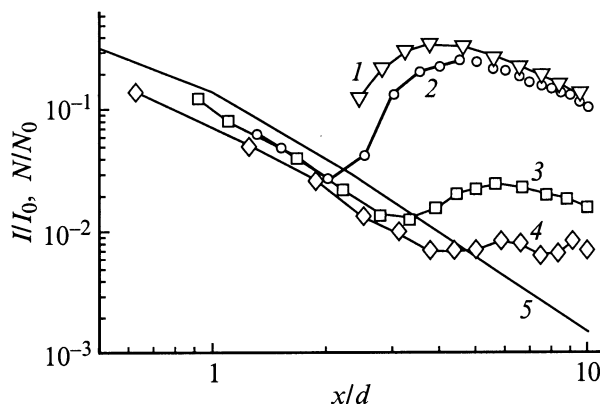


Рис. 6. Зависимость относительной интенсивности рэлеевского сигнала I/I_0 и плотности газа N/N_0 от расстояния x/d в свободной струе смеси 5% моносилана в аргоне для нескольких сопел. 1 — $d = 1.07$ mm, $P_0 = 937$ Torr; 2 — $d = 1.98$ mm, $P_0 = 554$ Torr; 3 — $d = 3.6$ mm, $P_0 = 182$ Torr; 4 — $d = 4.8$ mm, $P_0 = 111$ Torr; 5 — изохропа.

Дискуссия

С помощью рэлеевской диагностики установлено, что в свободной струе 5%-й смеси моносилан–аргон за каждым из испытанных в данной работе сопел идет процесс конденсации, если значение параметра $P_0 d^2$ не меньше $\sim 2500 \text{ Torr} \cdot \text{mm}^2$ (рис. 6). При этом интенсивность процесса конденсации усиливается с уменьшением диаметра сопла, а фронт конденсации перемещается ближе к соплу: от $x/d \approx 3.5$ для сопла с максимальным диаметром до $x/d \approx 1-2$ для сопла с минимальным диаметром. Нагрев газа приводит к подавлению процесса конденсации (рис. 5). Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами масс-спектрометрических измерений в импульсной струе за соплом диаметром 1 mm [15], в частности, согласно нашим данным, развитая конденсация начинается при давлении $P_0 \sim 250 \text{ Torr}$, а согласно данным [15], — при $P_0 \sim 160 \text{ Torr}$. При сравнении необходимо учитывать, что рэлеевская диагностика более чувствительна к наличию крупных кластеров и поэтому начинает реагировать на процесс конденсации при большем давлении.

Из полученных экспериментальных данных следует, что в струе смеси моносилан–аргон процесс конденсации начинается при меньших давлениях, на меньшем расстоянии от сопла и его интенсивность значительно сильнее, чем в струях чистого аргона или смеси моносилан–гелий. Одно из возможных объяснений этих результатов — совместная конденсация моносилана и аргона.

Оценим средний размер образующихся кластеров по интенсивности рассеянного излучения с помощью формулы (4). Однако для ее использования необходимы данные о доле конденсата. Для струи чистого аргона доля конденсата достаточно хорошо определяется из расчета [21]. Средний размер кластеров аргона для условий соответствующих рис. 4 при максимальном давлении равен 300, а для условий рис. 2 и 3 на максимальном расстоянии — 110. Заметим, что в этих двух случаях доли конденсата составляли соответственно 8.1 и 8.3%. Для струй смесей данных о доле конденсата нет. Однако известно, что в потоке смеси прежде всего конденсируется компонента с меньшим давлением насыщенных паров при одинаковой температуре, в данном случае — это моносилан. В режиме с развитой конденсацией легколетучая компонента может сконденсироваться практически полностью при исходных концентрациях $\leq 5-10\%$ [9]. Можно предположить, что струи смесей 5% моносилана в аргоне и 10% моносилана в гелии для условий, соответствующих рис. 4, при максимальном давлении находятся в режиме развитой конденсации и моносилан полностью сконденсировался, т.е. доли конденсата — 5 и 10% соответственно. Так как для второй смеси данные есть только до давления 1000 Torr, то воспользуемся результатами экстраполяции. Тогда средний размер кластера моносилана для смеси моносилан–аргон ≈ 800 , а для смеси моносилан–гелий — ≈ 70 . Отсюда можно было бы сделать вывод, что моносилан в

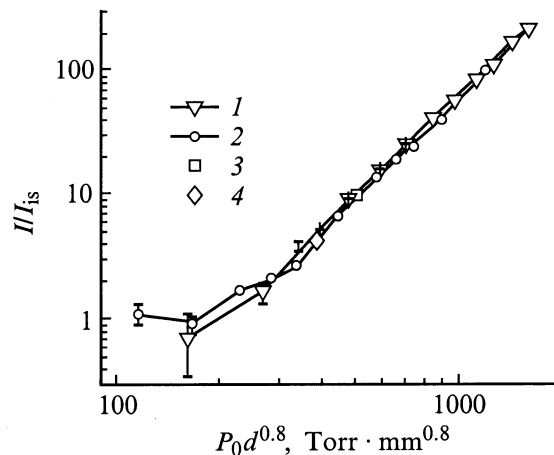


Рис. 7. Зависимость относительной интенсивности рассеянного излучения газа I/I_{is} от параметра $P_0 d^{0.8}$ в свободной струе смеси 5% моносилана в аргоне. $x/d = -9.24$; $d = 1.07$ (1), 1.98 (2), 3.6 (3), 4.8 mm (4).

струе аргона конденсируется значительно интенсивнее, чем в струе гелия. Однако это маловероятно [9] и более предпочтительно предположение о совместной конденсации моносилана и аргона с образованием смешанных кластеров. Соответственно при оценке размера кластера нужно использовать другое значение доли конденсата и т.д. В гелиевой смеси такой процесс практически невозможен, так как гелий слабо конденсируется в струях и с трудом образует кластеры, в том числе смешанные.

В связи с этим представляет интерес, по какому параметру обобщаются данные рэлеевского рассеяния в струе конденсирующейся смеси аргон–моносилан: как при конденсации в струе чистого аргона [10], по $P_0 d^{0.8}$ или, как при конденсации в струе смеси [9], по $P_0 d$. На рис. 7 приведена зависимость $I/I_{is} = f(P_0 d^{0.8})$ для двух сопел разного диаметра, а также по одной экспериментальной точке еще для двух сопел. Здесь I_{is} — рэлеевский сигнал, соответствующий изоэнтропической плотности. После начала конденсации в области значений параметра $P_0 d^{0.8}$ ($P_0 d$) $\sim 100-200 \text{ Torr} \cdot \text{mm}^{0.8}$ обобщение данных происходит по параметру $P_0 d$, а при больших значениях — по параметру $P_0 d^{0.8}$. Этот результат, по-видимому, свидетельствует о том, что при больших давлениях торможения в струе идет одновременная конденсация моносилана и аргона и образуются смешанные кластеры. Образование смешанных кластеров аргон–моносилан наблюдались и другими авторами [15,22]. В работе [22] зарегистрировали образование димера моносилан–аргон в струе 1% смеси, а в работе [15] при масс-спектрометрии струи 5% смеси моносилан–аргон обнаружили кластерные ионы Ar_nSiH_x , где $n = 1-4$, $x = 2-4$, что также свидетельствует об образовании смешанных кластеров.

Следовательно, можно предположить, что процесс конденсации в струе смеси моносилан–аргон протекает

следующим образом: вначале конденсируется моносилан, кластеры которого служат ядрами конденсации для аргона. В результате конденсации аргона начинается при меньшем давлении и на меньшем расстоянии от сопла, что приводит к существенной интенсификации процесса конденсации и образованию более крупных кластеров в струе смеси моносилан–аргон по сравнению со струей чистого аргона. В струе смеси моносилан–гелий процесс конденсации также заметно слабее из-за того, что образование смешанных кластеров моносилан–гелий маловероятно.

Эффекты, упомянутые во Введении и наблюдавшиеся в струе смеси моносилан–аргон, активированной электронной пучком [11–13], имеют четкую корреляцию с процессом конденсации в струе и, по-видимому, обусловлены взаимодействием электронов с образующимися кластерами моносилана и моносилан–аргона. Таким образом, при использовании свободных струй для осаждения пленок и при исследовании таких струй необходимо уделять особое внимание процессу конденсации.

Заключение

В настоящей работе методом рэлеевского рассеяния исследовалась конденсация в свободных струях газовых смесей 5% моносилана в аргоне для ряда сопел диаметром от 0.5 до 4.8 mm и 10% моносилана в гелии для сопла диаметром 1.07 mm. Установлено, что в свободной струе 5% смеси SiH₄–Ar за каждым из испытанных в данной работе сопел идет процесс конденсации, если значение параметра $P_0 d^2$ не меньше $\sim 2500 \text{ Torr} \cdot \text{mm}^2$. Показано, что результаты рэлеевских измерений в струе конденсирующейся смеси моносилан–аргон обобщаются по параметру $P_0 d^{0.8}$. Процесс конденсации в смеси SiH₄–Ar протекает значительно более интенсивно, чем в смеси моносилан–гелий и в чистом аргоне. Последние два обстоятельства и анализ литературных данных позволяют сделать предположение о совместной конденсации моносилана с аргонem и образовании смешанных кластеров.

Авторы выражают благодарность П.А. Сквородко за проведение расчетов струй Ar с конденсацией применительно к условиям экспериментов.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-03-33924).

Список литературы

- [1] Street R.A. Phys. Stat. Sol. A. 1998. Vol. 166. N 2. P. 695–705.
- [2] Belikov A.E., Biryukov S.A., Sukhinin G.I. et al. // Proc. of 17th Intern. Symposium on Rarefied Gas Dynamics. Aachen (Germany), 1990. VCH. 1991. P. 1568–1575.
- [3] Halpern B.L., Schmitt J.J., Goltz J.W. et al. // Appl. Surf. Sci. 1991. Vol. 48/49. P. 19–26.

- [4] Sharafutdinov R.G., Skrinnikov A.V., Parakhnevich A.V. et al. // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79. N 9. P. 7274–7277.
- [5] Mullins C.B., Pacheco K.A., Banerjee S. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. N 12. P. 6281–6288.
- [6] Motooka T., Abe H., Fons P. // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 63. N 25. P. 3473–3475.
- [7] Ikoma Y., Endo T., Watanabe F. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. Pt 2. Vol. 38. N 3B. L. 301–303.
- [8] De Graaf A., Dinescu G., Longueville J.L. et al. // Thin Solid Films. 1998. Vol. 333. N 1–2. P. 29–34.
- [9] Hagena O.F. // Surf. Sci. 1981. Vol. 106. P. 101–116.
- [10] Hagena O.F., Obert W. // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 56. N 5. P. 1793–1802.
- [11] Sharafutdinov R.G., Fedorov S.Yu., Khmel S.Ya. et al. // Proc. of 14th Intern. Symp. on Plasma Chemistry. Prague, 1999. Vol. 3. P. 1297–1302.
- [12] Khmel S.Ya., Sharafutdinov R.G., Skrinnikov A.V. // Abstracts of Invited Lectures and Contributed Papers of 13th ESCAMPIG. Poprad (Slovakia), 1996. Vol. 20E. Pt B. 425–426.
- [13] Khmel S.Ya., Fedorov S.Yu., Sharafutdinov R.G. // Proc. of 24th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Warsaw, 1999. Vol. 4. P. 105–106.
- [14] Ding A., Cassidy R.A., Cordis L.S. et al. // J. Chem. Phys. 1985. Vol. 83. N 7. P. 3426–3432.
- [15] Шарафутдинов Р.Г., Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 21. С. 47–51.
- [16] Eckbreth A.C. Laser Diagnostics for Combustion Temperature and species. Combustion Science & Technology Book Series. Vol. 3. Australia: Cordon and Breach Publishers, 1996. P. 596.
- [17] Таблицы физических величин. Справочник/ Под ред. Киикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [18] Watson H.E., Ramaswamy K.L. // Proc. of Royal Society of London. Ser. A. 1936. Vol. 156. N A887. P. 144–157.
- [19] Lewis J.W.L., Williams W.D. // The Physics of Fluids. 1976. Vol. 19. N 7. P. 951–959.
- [20] Аборнев Е.М., Нерушев О.А., Новопашин С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 21. С. 84–87.
- [21] Недосекова С.В., Сквородко П.А. // Труды X Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. М., 1989. Т. 3. С. 116–123.
- [22] Randall R.W., Howard B.J. // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 100. N 10. P. 7051–7060.