

04

Аномальное возбуждение аргона в импульсных сверхзвуковых потоках смесей $\text{Ar} + \text{CH}_4$, $\text{Ar} + \text{SiH}_4$ и $\text{Ar} + \text{CH}_4 + \text{SiH}_4$, активируемых электронным пучком

© В.Ж. Мадирбаев, А.Е. Зарвин, Н.Г. Коробейщиков,
Р.Г. Шарафутдинов

Новосибирский государственный университет
E-mail: zarvin@phys.nsu.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2001 г.

Исследованы процессы энергообмена в сверхзвуковых потоках смесей аргона с метаном и моносиланом, активируемых электронным пучком. Показано, что на начальной стадии конденсации в потоке происходит селективное возбуждение энергетических уровней атомов аргона. Определены граничные параметры, при которых наблюдается эффект возбуждения аномального излучения.

Использование высокоэффективной струйной плазмохимической технологии для осаждения пленочных покрытий, конверсии углеводородов, переработки аэропромвыбросов стимулирует интерес к исследованию процессов энергообмена, протекающих в конденсирующихся газовых потоках, активируемых электронно-пучковой плазмой [1]. Нами исследован процесс аномального возбуждения излучающих состояний атома аргона в сверхзвуковых потоках его смесей с метаном и моносиланом в условиях конденсации.

Работа выполнена на комплексе стендов ЛЭМПУС [2] Новосибирского государственного университета. Спектры излучения, возбужденного электронным пучком [3] в импульсных струях смесей $5\% \text{SiH}_4 + 95\% \text{Ar}$, $5\% \text{CH}_4 + 95\% \text{Ar}$ и $5\% \text{SiH}_4 + 5\% \text{CH}_4 + 90\% \text{Ar}$, изучались в диапазоне давлений торможения $P_0 = 0 \div 1500 \text{ kPa}$ при температуре торможения $T_0 = 295 \text{ K}$. Измерения производились на расстоянии $x/d_* = 30$ от среза звукового сопла ($d_* = 0.55 \text{ mm}$). Сравнивались зависимости от давления торможения интенсивностей линий атома ($\lambda = 549.6 \text{ nm}$) и иона аргона ($\lambda = 461.0 \text{ nm}$).

Впервые явление аномального возрастания интенсивности излучения отдельных линий атома аргона в смеси с моносиланом, активируемой электронами, было обнаружено в [4]. Авторы этой работы связали зарегистрированный эффект с процессом конденсации в потоке. Однако использование стационарной техники формирования газовых струй ограничило диапазон давлений торможения изучаемого потока. Применение импульсной техники позволило существенно расширить этот диапазон и определить граничные параметры потока, при которых наблюдается эффект. Кроме того, аномальное излучение линий атома аргона обнаружено при разбавлении аргона метаном, а также в тройной смеси $\text{Ar-SiH}_4\text{-CH}_4$.

Для всех исследованных смесей, как показано на рис. 1, интенсивность линий иона аргона ($\lambda = 461.0 \text{ nm}$) с ростом P_0 возрастает линейно. Для атома Ar ($\lambda = 549.6 \text{ nm}$), напротив, после начального небольшого участка линейного роста интенсивность резко возрастает, а при дальнейшем увеличении давления возвращается на линейную аппроксимацию начального участка кривой, нанесенную сплошной линией. Отход от линейного роста и возврат на линейную аппроксимацию происходят в исследованных смесях при разных давлениях торможения. Границы нелинейного роста видны на рис. 2, *a*, где значками нанесены интенсивности линий атома аргона для разных смесей, нормированные на давление торможения, и коэффициент, приравнивающий нормированную интенсивность при малых P_0 к единице. Такая нормировка кроме определения границ существования эффекта позволила также сравнивать вклады в возбуждение излучающего состояния аргона от вторичного процесса, приводящего к аномальному росту интенсивности, и от возбуждения прямым электронным ударом. Поскольку в смеси $\text{Ar} + \text{SiH}_4$ наблюдается восьмикратный рост интенсивности излучения атома (для других смесей — примерно четырехкратный), в процессе задействован высокоэффективный канал возбуждения, связанный с аномально большим сечением столкновительного взаимодействия.

Сравнение кривых интенсивности излучения с результатами выполненных ранее [5] масс-спектрометрических измерений в тех же смесях, приведенных на рис. 2, *b*, показывает, что начало процесса аномального возбуждения коррелирует с начальной стадией конденсации в потоке, а окончание — со стадией формирования больших, в том числе смешанных кластеров [6]. Для удобства сравнения результаты спектраль-

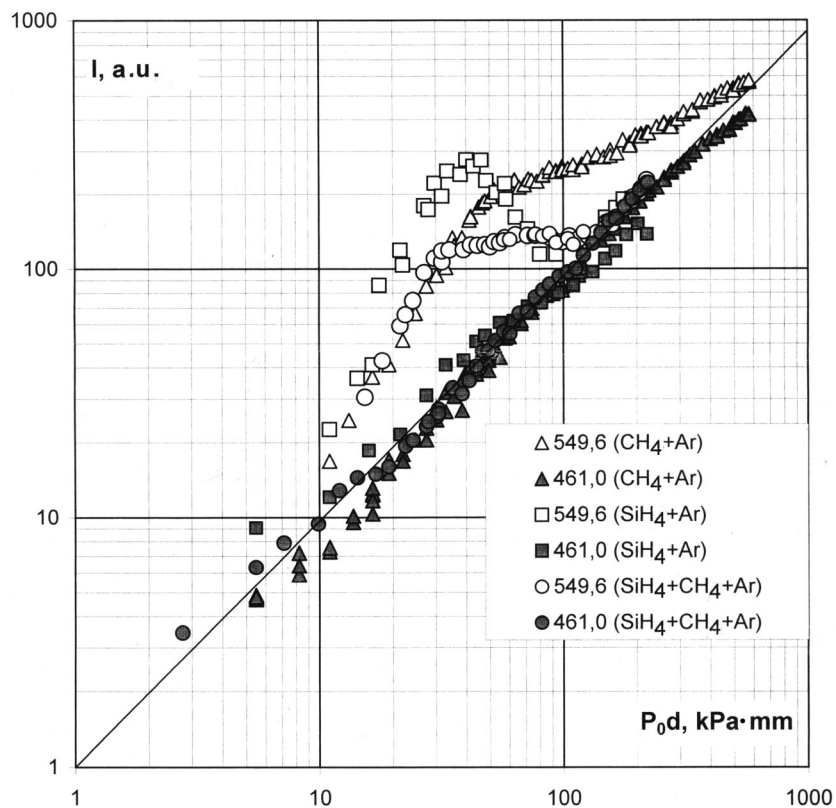


Рис. 1.

ных измерений и масс-спектрометрии даны в зависимости от широко используемого при изучении конденсации параметра подобия $P_0^*d^{0.8}$.

Наблюдаемые особенности процесса возбуждения (корреляция с данными масс-спектрометрии, линейная зависимость от тока пучка [4], большое сечение энергообмена и большое время жизни промежуточных возбужденных состояний) позволяют предположить, что процесс накачки атомарного аргона осуществляется благодаря ионно-кластерному взаимодействию, инициируемому электронно-пучковой плазмой в потоке. В результате образуются долгоживущие возбужденные комплексы,

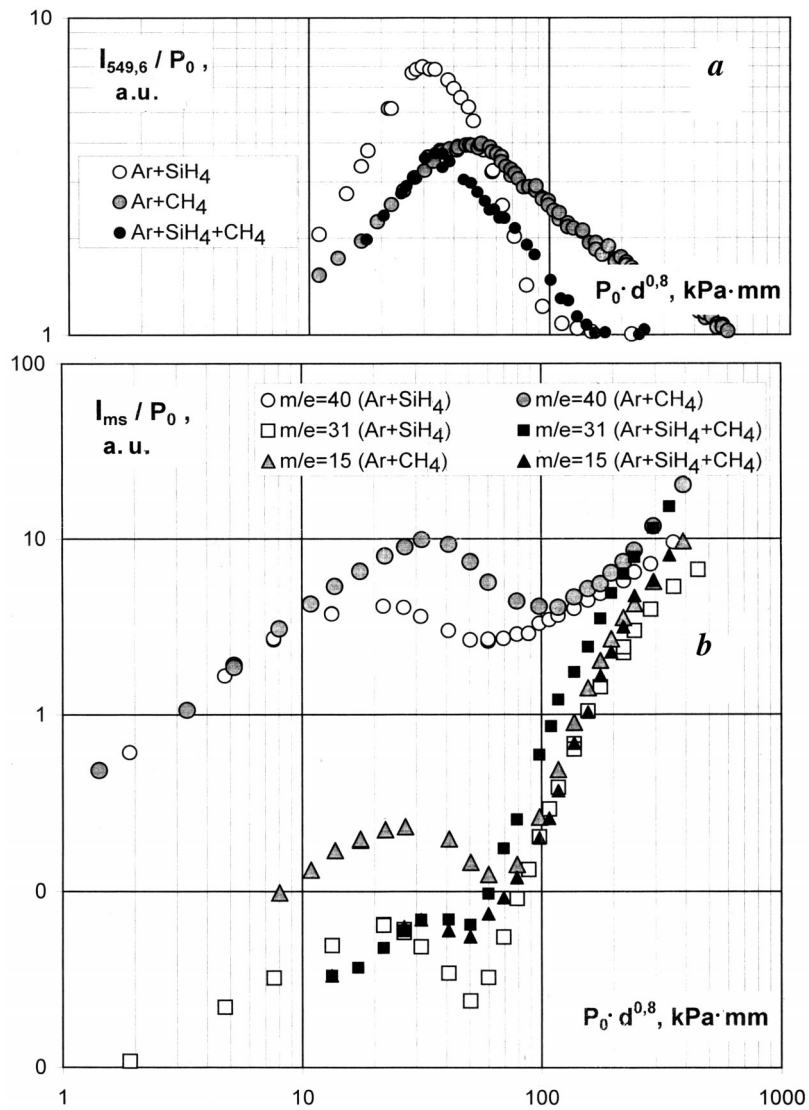


Рис. 2.

включающие в себя как атомы газа-носителя, так и частицы примеси. После передачи возбуждения излучающим состояниям атома аргона происходит, по-видимому, эжекция аргона из кластера с последующим излучением.

Таким образом, эффект аномального возбуждения атома аргона для исследованных смесей наблюдается в диапазоне параметров торможения, определяемом условиями кластерообразования, и вызван, по-видимому, селективным энергообменом при ионно-кластерном взаимодействии. Максимальное проявление эффекта обнаруживается в области роста интенсивности малых кластеров [6], регистрируемых методами молекулярно-пучковой масс-спектрометрии.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-03-33021), Министерства образования РФ по фундаментальному естествознанию (проект № E00-3.2-150) и Министерства промышленности, науки и технологий РФ (проект № 06-05).

Список литературы

- [1] *Babariotskii A.I., Deminskiy M.A., Demkin A.I.* et al. // High Energy Chemistry. 1999. V. 33. N 1. P. 45–51.
- [2] *Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г., Мадирбаев В.Ж.* и др. // ПТЭ. 2000. № 5. С. 64–70.
- [3] *Гартвич Г.Г., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Мадирбаев В.Ж.* // Журнал ПМТФ. 1993. Т. 34. № 5. С. 150–156.
- [4] *Khmel S.Ya., Sharafutdinov R.G.* // Abstracts of invited lectures and contributed papers of 15th ESCAMPIG. Hungary. 2000. V. 24A. P. 384–385.
- [5] *Мадирбаев В.Ж., Гагачев В.В., Зарвин А.Е.* и др. // Тез. докл. XVIII Междунар. семинара "Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах". СПб., 2000. С. 124.
- [6] *Шарафутдинов Р.Г., Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 21. С. 47–51.