

## О протекании ионно-кластерных реакций, инициируемых электронным пучком в смесях аргона с метаном и моносиланом

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

Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

\*Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: madirbaev@phys.nsu.ru

Выполнено экспериментальное исследование процессов возбуждения излучения аргона в конденсирующихся сверхзвуковых потоках его смесей с метаном, моносиланом и двуокисью углерода при электронно-пучковой активации потока. Обнаружено, что на отдельных стадиях конденсации наблюдается аномальное возрастание интенсивности излучения некоторых линий атомарного аргона. Показано, что эффект появляется на начальной стадии конденсации и затухает при формировании больших смешанных кластеров.

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

Проведено экспериментальное исследование процессов энергообмена при электронно-пучковой активации в сверхзвуковых импульсных потоках аргона с примесями. Использовались смеси аргона с 5%  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , He, а также чистый аргон. Показано, что добавление примеси метана, моносилана или двуокиси углерода приводит к относительному увеличению интенсивностей излучения отдельных линий атомарного аргона. Для каждой смеси определен диапазон параметров торможения, при которых наблюдается указанный эффект. Показано, что в чистом аргоне, а также в смеси с неконденсирующимся гелием селективного возбуждения уровней энергии атомарного аргона не происходит во всем диапазоне параметров потока.

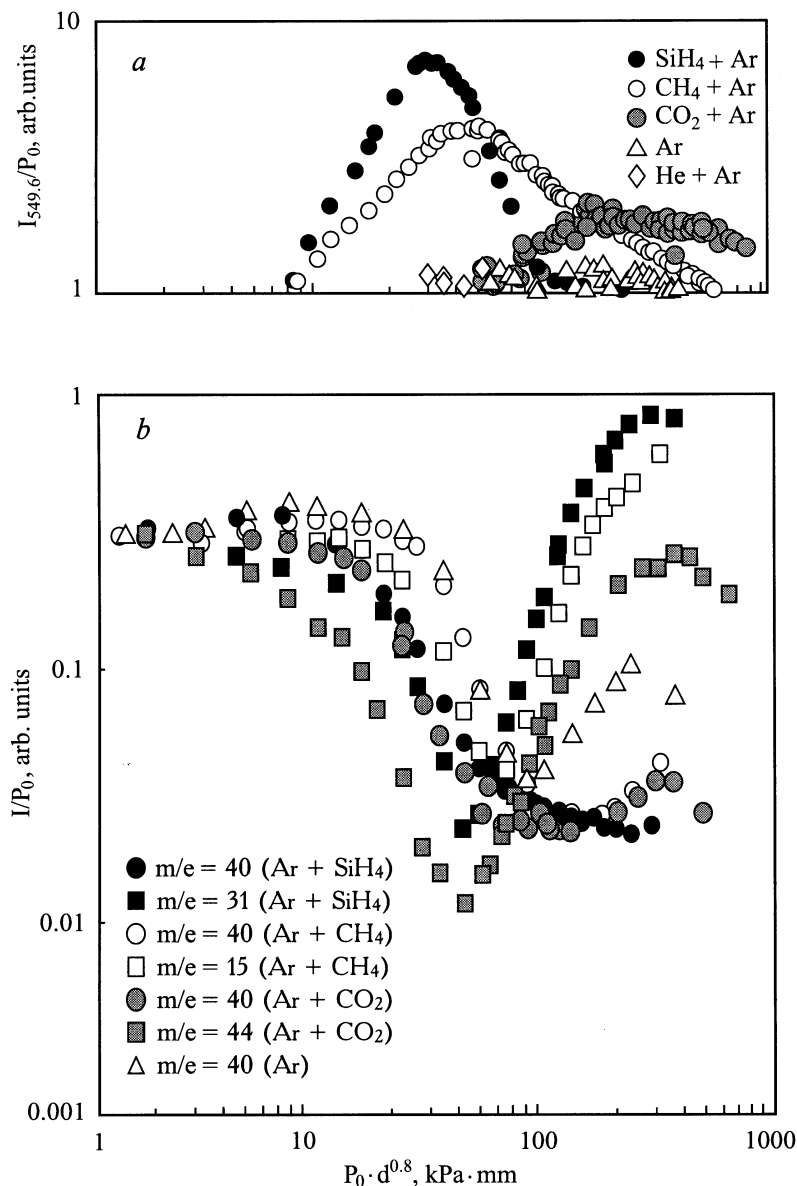
Работа выполнена на комплексе стендов ЛЭМПУС Новосибирского государственного университета [1]. Для возбуждения излучения использовался пучок электронов [2] с энергией 6 keV, формируемый электронной пушкой. Ток электронов  $i = 10$  mA поддерживался постоянным. Спектры излучения, возбуждаемого в импульсных струях Ar и смесей, излучались в диапазоне давлений торможения  $P_0 = 0 - 1500$  kPa при температуре торможения  $T_0 = 300$  K. Струя за звуковым соплом с диаметром среза  $d = 0.55$  mm формировалась с помощью импульсного электромагнитного клапана. Измерения производились на расстоянии  $x/d = 30$  вниз по потоку от среза сопла. Сравнивались зависимости от давления торможения интенсивностей линий атома ( $\lambda = 549.6$  nm) и иона аргона ( $\lambda = 461.0$  nm), используемых в качестве реперных линий.

Впервые явление аномального возрастания интенсивности излучения отдельных линий атома аргона в смеси с моносиланом, активируемой электронами, было обнаружено в [3]. Авторы связали зарегистрированный эффект с процессом конденсации в потоке. Однако использование непрерывного истечения газовой струи из стационарного источника существенно ограничило

уровень достигаемых плотностей в струе. Применение в настоящей работе импульсной техники формирования потоков позволило на порядок увеличить диапазон давлений торможения.

Для всех исследованных смесей интенсивность линий иона аргона ( $\lambda = 461.0$  nm) с ростом  $P_0$  возрастает сначала линейно, затем вследствие столкновительного гашения [4] рост интенсивности незначительно замедляется. Поведение интенсивностей излучения атома Ar ( $\lambda = 549.6$  nm), напротив, зависит от рода примеси. В струе чистого аргона, а также при разбавлении его гелием особенностей в поведении интенсивностей излучения атома аргона не наблюдается во всем исследованном диапазоне параметров. В потоках смесей аргона с метаном, моносиланом и диоксидом углерода после небольшого участка линейного роста интенсивность излучения атома аргона резко возрастает, а при дальнейшем увеличении давления возвращается к линейной зависимости начального участка кривой. Это отклонение в исследованных смесях наблюдается при разных давлениях торможения.

Границы нелинейного роста интенсивности видны на рисунке (часть *a*), где значками нанесены интенсивности линий атома аргона в разных смесях, нормированные на давление торможения и коэффициент, приравняющий нормированную интенсивность при малых  $P_0$  к единице. Такая нормировка, кроме определения границ существования эффекта, позволила сравнивать вклады в возбуждение атома аргона от вторичного процесса, приводящего к аномальному росту интенсивности, и от возбуждения прямым электронным ударом. Поскольку наблюдается многократный рост интенсивности излучения атома (для смеси At +  $\text{SiH}_4$  в максимуме — в 8 раз), в процессе задействован высокоэффективный канал возбуждения, связанный с аномально большим сечением столкновительного взаимодействия.



Зависимости от давления торможения нормированных интенсивностей излучения атома аргона (*a*) и масс-спектрометрического сигнала мономеров аргона и примесей (*b*) в смесях.

Кривые интенсивности излучения сравниваются с результатами масс-спектрометрических измерений [5] в тех же смесях (часть *b* на рисунке). Интенсивности масс-спектрометрического сигнала мономеров аргона и примесей также отнормированы на давление торможения. 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 данные спектральных измерений и масс-спектрометрии даны в зависимости от широко используемого при изучении конденсации параметра подобия  $P_0 d^{0.8}$ .

Поскольку явление аномального возбуждения атома аргона наблюдается, во-первых, в смеси с конденсирующейся добавкой и, во-вторых, в условиях конденсации,

можно предположить, что влияние добавки на величину и границы эффекта должно коррелировать со свойствами кластера и, следовательно, с поведением мономерных кривых газа-носителя и примеси, измеренных с помощью молекулярно-пучковой масс-спектрометрии. Заметим, что в области давлений  $P_0 d^{0.8} > 100$  kPa·mm основной вклад в сигнал мономеров вносит фрагментация крупных кластеров в ионизаторе масс-спектрометра [5]. Следовательно, в области больших значений давления торможения относительные изменения интенсивностей масс-спектрометрического сигнала мономеров газа-носителя и примеси демонстрируют изменение состава образующихся кластеров, а также характеризуют эффективность их разряда электронным ударом. Анализ данных масс-спектрометрии показывает, что аномальный эффект

выражен тем ярче, чем больше мономеров примеси высыпается из кластера при электронном ударе и чем позже начинается обогащение кластера атомами аргона.

Наблюдаемые особенности процесса возбуждения (корреляции с данными масс-спектрометрии, линейная зависимость от тока пучка [3], 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, 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, в работе показано, что в смесях аргона с метаном, моносиланом и двуокисью углерода наблюдается процесс аномального возбуждения атома аргона. Значительная величина регистрируемого эффекта свидетельствует о существенной роли ионизированных частиц. Эффект локализован в диапазоне параметров торможения, ограниченном снизу начальной стадией конденсации, а сверху — формированием больших смешанных кластеров и, по-видимому, перестройкой их структуры, облегчающей выбивание примесной частицы электроном.

## Список литературы

- [1] А.Е. Зарвин, Н.Г. Коробейщиков, В.Ж. Мадирбаев, Г.Г. Гартвич, В.В. Каляда, В.С. Айрапетян. ПТЭ **5**, 64 (2000).
- [2] Г.Г. Гартвич, А.Е. Зарвин, В.В. Каляда, В.Ж. Мадирбаев. ПМТФ **34**, 5, 150 (1993).
- [3] S.Ya. Khmel, R.G. Sharafutdinov. Abstracts of invited lectures and contributed papers of 15th ESCAMPIC. Hungary. **24A**, 384 (2000).
- [4] В.Ж. Мадирбаев, А.Е. Зарвин. ПМТФ **39**, 6, 16 (1998).
- [5] А.Е. Зарвин, Н.Г. Коробейщиков, В.Ж. Мадирбаев, Р.Г. Шарафутдинов. Письма в ЖТФ **26**, 22, 21 (2000).
- [6] Р.Г. Шарафутдинов, А.Е. Зарвин, Н.Г. Коробейщиков, В.Ж. Мадирбаев, С.Я. Хмель. Письма в ЖТФ **25**, 21, 47 (1999).