

02;04;12

## Исследование образования молекул фторида аргона при взаимодействии потока плазмы аргона с парами фторида калия и элегаза

© А.К. Шуаибов, Л.Л. Шимон, И.В. Шевера

Ужгородский национальный университет,  
88000 Ужгород, Украина  
e-mail: eshev@univ.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 22 февраля 2006 г.)

Приведены результаты сравнительного исследования образования молекул фторида аргона при помощи плазмодинамической струи на смесях аргона с парами фторида калия и аргона с элегазом. Изучены зависимости яркости излучения полосы 193 nm ArF\* от расходов аргона и элегаза, мощности накачки и величины расстояния от сопла.

PACS 52.80.-s.

Для создания мощных источников коротковолнового спонтанного излучения возможно использование плазмодинамических струй тяжелых инертных газов, к которым на выходе из сопла подмешиваются молекулы-галогеносители. Впервые такой способ образования эксимерных молекул, а также оптимизация соответствующих излучателей были реализованы в Ужгородском университете [1,2], изучалось излучение молекул XeF\*, XeCl\*, KrF\* и KrCl\*. Основными галогеносителями в экспериментах служили молекулы CCl<sub>4</sub> и SF<sub>6</sub>. Образование эксимерной молекулы в таких плазменных средах происходит преимущественно в реакции рекомбинации:  $R^+ + X^- + (R) - RX^* + (R)$ , где R — Xe, Kr; X — F, Cl. Для получения высокой плотности эксимерных молекул необходимо иметь и высокую плотность отрицательных ионов галогена, которые сильно поглощают в ультрафиолетовом диапазоне длин волн [3]. Поэтому для решения данной проблемы и увеличения средней мощности УФ-излучения моногалогенидов криптона и ксенона до 2–4 kW за счет увеличения мощности накачки (и энергозапаса в плазменной струе тяжелых инертных газов), а также объема плазменной среды в работах [4,5] для образования эксимерной молекулы было предложено смешивание паров галогенида щелочного металла с потоком плазмы ксенона или криптона. В этих источниках излучения эксимерные молекулы формируются в двухчастичных реакциях замещения типа  $R^{+*} + NaCl(X^1\Sigma^+) + Na^+(^1S_0)$ . Все вышеперечисленные исследования плазмодинамических излучателей на эксимерных молекулах были выполнены только для ксенон- и криптонсодержащих соединений, которые при распаде излучают полосы в спектральной области 220–354 nm. С целью увеличения энергии кванта излучения плазмодинамического излучателя и перехода к менее дорогостоящим рабочим средам перспективно исследование рабочих смесей на основе атомов аргона, где эффективно образуются молекулы ArF\* (193 nm) и ArCl (175 nm). Но образование фторидов и хлоридов

аргона в стационарных условиях накачки, где формировалась плазма низкой плотности, изучалось преимущественно в тлеющем разряде постоянного тока [6,7]. В такой электроразрядной плазме развиваются различные неустойчивости, что приводит к замене стационарного режима излучения импульсно-периодическим или комбинацией этих режимов излучения. В плазмодинамических эксимерных излучателях роль неустойчивой плазмы менее существенна, поэтому они излучают в стационарном режиме.

С целью сравнения эффективности разных механизмов образования эксимерной молекулы в плазмодинамической струе в настоящей статье приводятся результаты исследования образования молекулы фторида аргона в рабочих средах Ar–KF и Ar–SF<sub>6</sub>.

Эксперименты выполнены на установке, где источником плазмодинамической струи служил плазмотрон постоянного тока с газовихревой стабилизацией дуги и звуковым графитовым соплом с критическим диаметром 5 mm. Ток дуги плазмотрона находился в пределах 50–150 A, падение напряжения на разрядном — 20 V. Плазма на основе аргона формировалась в дуговой камере плазмотрона, а фторсодержащие молекулы SF<sub>6</sub> подмешивались в сформированную струю плазмы аргона за сопловым блоком на различных расстояниях от него. Давление аргона изменялось от нескольких десятков Pa до 15 kPa. Ввод паров фтористого калия в плазмодинамическую струю на основе аргона осуществлялся в промежуток анод–сопло плазмотрона из специального тигля, для разогрева которого до температуры 600–800°C применялся молибденовый нагреватель. Максимальная плотность паров фторида калия в зоне ввода его в струю могла достигать 10–30 Pa [8].

Исследование излучения плазмодинамической струи за сопловым блоком производилось с использованием монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106 [2].

Регистрация спектров излучения плазмодинамической струи на смесях Ar–KF, Ar–SF<sub>6</sub> производилась в диа-

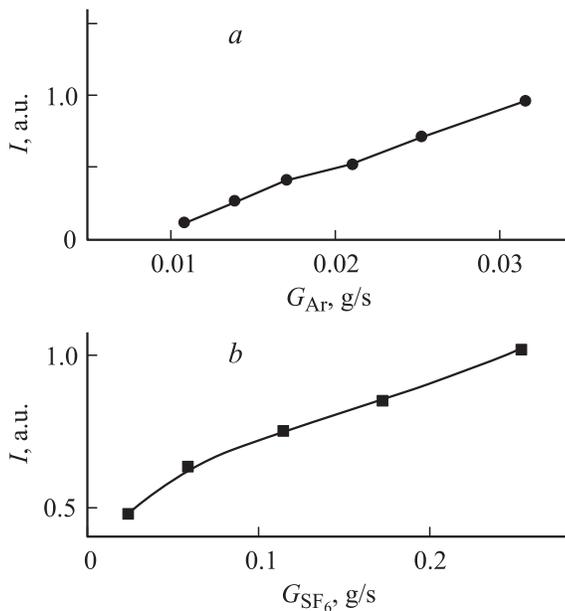
пазоне длин волн 200–800 nm. С целью избежания искажений исследуемых спектров в видимой области за счет вклада излучения второго порядка в ультрафиолетовой области в отдельных экспериментах участок спектра излучения с длиной волны  $\lambda < 350$  nm отсекался с использованием светофильтра.

В условиях настоящего эксперимента на выходе из сопла температура электронов изменялась в диапазоне  $T_e = 0.1–0.2$  eV, а плотность электронов составляла  $N_e = 10^{12}–10^{13}$  cm $^{-3}$ .

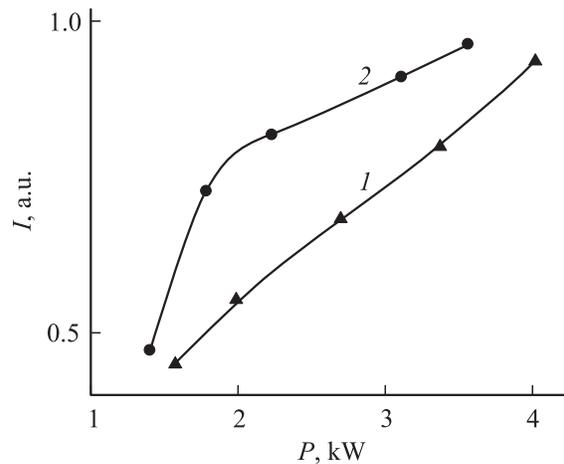
Результаты исследования яркости излучения полосы 193 nm ArF\* в зависимости от расходов газов, мощности, введенной в плазму, и расстояния от сопла представлены на рис. 1–3.

Исследование спектральных характеристик плазменодинамической струи на основе аргона и паров фторида калия или элегаза показало, что в УФ-области спектра основной является полоса с максимумом при 193 nm ArF\*. Кроме излучения эксимерной молекулы зарегистрировано также излучение резонансных спектральных линий атома калия: 766.5 и 769.9 nm.

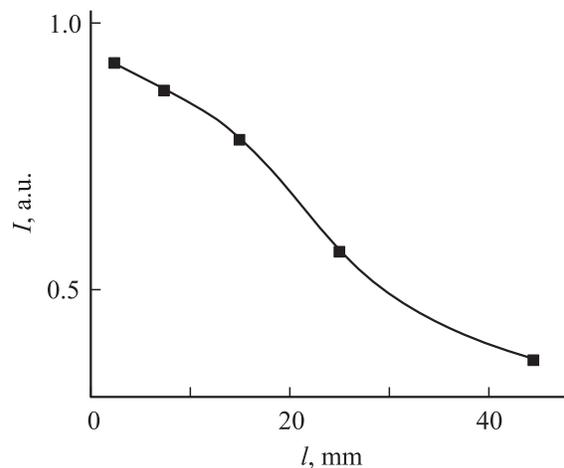
Изучение образования молекул ArF\* в припороговой области по расходу аргона в обеих исследуемых смесях показало следующее. Из рис. 1 видно, что смеси на основе паров KF значительно эффективнее смесей на основе элегаза, поскольку выход излучения у последних такой же, как и на рис. 1, а, но он достигнут при расходах аргона примерно на порядок выше. При таком же способе образования эксимерных молекул KrF\* и XeF\* (при мощности, вкладываемой в струю, 2 kW) оптимальные расходы тяжелых инертных газов находят-



**Рис. 1.** Зависимость яркости излучения полосы 193 nm ArF\* от парциального расхода аргона в смеси Ar–KF при давлении  $P = 6.65$  kPa и вложенной мощности  $W = 2$  kW (a) и от парциального расхода элегаза в смеси Ar–SF<sub>6</sub> при  $P = 6.65$  kPa,  $G_{Ar} = 0.05$  g/s и  $W = 1.8$  kW (b).



**Рис. 2.** Зависимость яркости излучения полосы 193 nm ArF\* от введенной в плазматрон мощности: 1 — Ar–SF<sub>6</sub>,  $G_{Ar} = 0.05$  g/s,  $G(SF_6) = 0.1$  g/s; 2 — Ar–KF,  $G_{Ar} = 0.05$  g/s.



**Рис. 3.** Распределение яркости излучения полосы 193 nm AsF\* в плазменодинамической струе на смеси Ar–KF вдоль направления ее распространения при давлении 6.65 kPa и вложенной мощности 2 kW.

ся в диапазоне 0.7–1.0, а молекул элегаза — 0.72 g/s. Сравнение этих результатов с данными рис. 1, b показывает, что образование молекул ArF\* при подмешивании элегаза в струю плазмы аргона за соплом близко к оптимальному. При использовании паров фторида калия имеется еще значительный запас по расходу аргона. Кроме того, технические параметры нашего нагревателя не позволяют увеличить плотность паров KF выше 30 Pa.

Исследование яркости излучения полосы 193 nm от вводимой в дуговой разряд мощности  $W$  (рис. 2) также показывает на более высокую эффективность смеси на основе фторида калия. Наибольшая скорость увеличения яркости излучения эксимерной молекулы в последнем случае получена при  $W < 2$  kW, а при больших мощностях наблюдался линейный рост яркости, с меньшей скоростью. Для смесей Ar–SF<sub>6</sub> получено линейное уве-

личение яркости излучения полосы 193 nm в диапазоне  $W = 1-4$  kW. Для оптимальных же смесей Kr-SF<sub>6</sub>, Xe-SF<sub>6</sub> линейная форма зависимостей, подобных приведенным на рис. 2, сохранялась только в диапазоне мощности дугового разряда 1-2, а при 2-4 kW скорость увеличения яркости полос излучения 249 nm (KrF\*) и 353 nm (XeF\*) значительно уменьшалась. Такое различие в поведении яркости, возможно, связано с более быстрым развитием неустойчивости дугового разряда в более тяжелых инертных газах (Kr, Xe) по сравнению с аргоном.

На рис. 3 представлена зависимость яркости излучения полосы 193 nm от расстояния точки отбора излучения до сопла. При увеличении этого расстояния от 2 до 45 mm яркость излучения молекулы ArF\* уменьшалась примерно на порядок. Максимальная температура и концентрация электронов для струи инертного газа достигается непосредственно у среза сопла. Это приводит к максимальной плотности возбужденных ионов аргона, которые, вступая в двухчастичные реакции с парами KF, формируют молекулы ArF\* в наибольшем количестве сразу же за срезом сопла. При подмешивании к плазменной струе аргона или криптона молекул элегаза в зависимости яркости излучения от величины расстояния от среза сопла наблюдался один максимум при  $l_{\max} = 1-3$  cm. Величина  $l_{\max}$  сильно зависит от состава смеси и скоростей расхода газов, в этом случае параметры плазменной струи значительно изменяются в результате прилипания электронов к молекулам элегаза и продуктам его распада в плазме. Величина  $l_{\max}$  связана с изменением параметров плазмы струи и наработкой соответствующих отрицательных ионов.

Таким образом, установлено, что образование молекул фторида аргона при смешивании стационарной струи плазмы аргона (при мощности энерговыклада в дуговой разряд на уровне 2 kW) с парами калия в припороговых условиях по расходу аргона и плотности фторида калия происходит так же эффективно, как и при подмешивании в струю элегаза в условиях, близких к оптимальным. Оптимизация расхода аргона и плотности паров KF позволит увеличить выход излучения полосы 193 nm ArF\* за срезом сопла примерно в 3-5 раз.

Авторы выражают благодарность В.С. Рогуличу и А.И. Дашенко за помощь в проведении эксперимента.

## Список литературы

- [1] Рогулич В.С., Стародуб В.П., Шевера В.С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 10. С. 606-609.
- [2] Рогулич В.С., Стародуб В.П., Шевера В.С. // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. Вып. 4. С. 756-758.
- [3] Эксиммерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981.
- [4] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Б.В., Костенко О.Ф. и др. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 43-51.
- [5] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 9-20.

- [6] Шуаибов А.К., Дашенко А.И., Шевера И.В. // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 4. С. 371-372.
- [7] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дашенко А.И., Шевера И.В. // Прикладная физика. 2003. № 2. С. 31-36.
- [8] Свойства неорганических соединений. Справочник. Л.: Химия, 1983.