

Следует отметить, что рассматриваемая модель процесса испарения даже в предположении  $\theta(T) = \text{const}$  качественно объясняет различие значений энергии активации  $\Delta E$  процесса свободного испарения в вакууме и энтальпии испарения  $\Delta H$  галлия и индия. Действительно, из (1) следует, что в рассматриваемом интервале температур с большой точностью имеет место приближение

$$\frac{\exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)}{\sqrt{T}} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Из соотношения (2) видно, что  $\Delta H > \Delta E$ , и это действительно подтверждается экспериментально.

### Список литературы

- [1] Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. В.П. Глушко. М.: Наука, 1964. Т. 3. 395 с.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 583 с.
- [3] Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961. 929 с.

02;04;07

Журнал технической физики, т. 66, в. 4, 1996

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА СМЕШЕНИИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С МОЛЕКУЛАМИ $\text{CCl}_4$ , $\text{HCl}$ И $\text{SF}_6$

© В.С.Розулич, В.С.Шевера

Ужгородский государственный университет,  
294000 Ужгород, Украина  
(Поступило в Редакцию 10 марта 1995 г.)

Для решения многих научных и технических задач (взаимодействие излучения с веществом, фотохимия, микро- и химическая технология и т. д.) крайне необходимы мощные источники спонтанного и вынужденного излучения. В настоящее время [1-4] существенный интерес здесь представляют разработка непрерывных источников излучения и поиск новых перспективных способов накачки активных сред различных модификаций плазмохимических лазеров.

В настоящей работе проведено исследование характеристик излучения эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  в плазменной струе на смешении сверхзвуковых потоков плазмы инертных газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ) с невозбужденными потоками галогеноносителей  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{SF}_6$ . Получены данные об эффективности возбуждения  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  в непрерывных плазменных потоках с участием галогенов. Такие исследования являются актуальными и связаны с решением проблемы создания непрерывных плазмодинамических лазеров высокой удельной мощности в УФ диапазоне спектра.

Эксперименты проведены на плазмотронной установке, подробно описанной в [1,2]. Источником струи плазмы служит плазмотрон постоянного тока, при этом диапазон изменения тока дуги  $I = 50-200$  А, падение напряжения на разрядном промежутке  $U = 15-40$  В. Применялись медные и графитовые сопла критических диаметров  $\sim 5$  мм. Галогеносодержащие молекулы  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{SF}_6$  вводились в предварительно полученные потоки плазмы инертных газов как в предсопловой камере, так и за соплом на различных дистанциях от него.

Проведена оптимизация условий образования эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  по способам смешения инертных и галогеносодержащих газов, компонентному составу и давлению, роду галогеноносителя и т. д. Установлены условия получения максимальной интенсивности излучения эксимерных молекул при вводимой в плазмотрон мощности до 8 кВт. Получены данные о заселенностях возбужденных молекул в плазменном потоке.

Определение концентраций возбужденных молекул проводилось оптическим методом, основанным на сравнении интенсивностей излучения от струи плазмы и источника с известным распределением энергии по спектру. В качестве эталонного источника использовалась ленточная вольфрамовая лампа СИ 10-300У и водородная лампа ДВС-25.

Установлено, что в смесях инертных газов с  $\text{CCl}_4$  и  $\text{SF}_6$  возбуждение  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  является более эффективным при смешении газовых компонентов за соплом в двухкомпонентных смесях  $\text{Xe}(\text{Kr})-\text{CCl}_4(\text{SF}_6)$ , т. е. в смесях без участия буферного газа  $\text{Ar}$  или  $\text{He}$ . По отношению к смесям инертных газов с  $\text{CCl}_4$  образование  $\text{XeCl}^*$  в смеси  $\text{HCl}$  проходит эффективно только при введении хлористого водорода в предсопловую камеру плазмотрона. В смесях с  $\text{CCl}_4$ , наоборот, эффективным для возбуждения  $\text{XeCl}^*$  является вариант подмешивания  $\text{CCl}_4$  в поток плазмы за соплом, при этом интенсивность излучения  $\lambda = 308$  нм  $\text{XeCl}^*$  увеличивается примерно на порядок по отношению к вводу молекул четыреххлористого углерода в предсопловую камеру.

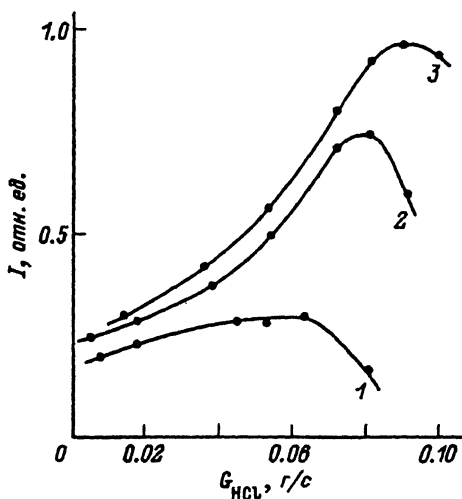


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения  $\lambda = 308$  нм  $\text{XeCl}^*$  от расходов  $\text{Xe}$  и  $\text{HCl}$  в смеси  $\text{Ar-Xe-HCl}$ .

$G_{\text{Xe}}, \text{ г/с}$ : 1 — 0.2, 2 — 0.3, 3 — 0.4.

Методом сравнения интенсивностей измерены абсолютные величины концентрации  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  в плазменной струе. Концентрация эксимерных молекул в смесях с  $\text{CCl}_4$  достигает величины  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  и эквивалентна полной удельной мощности  $\sim 1 \text{ Вт/см}^3$  спонтанного излучения  $\text{XeCl}^*$  при КПД преобразования электрической энергии в излучение  $\sim 0.02\%$ . В смесях с  $\text{HCl}$  соответствующие параметры примерно на порядок ниже, что свидетельствует о том, что в условиях плазменной струи при низких значениях электронной температуры  $[^1]$  ( $T_e = 0.1-0.2 \text{ эВ}$ ) более эффективным для возбуждения  $\text{XeCl}^*$  является галогенагент  $\text{CCl}_4$ . Что касается  $\text{KrF}^*$ , то по отношению к ранее полученным результатам  $[^{1,2}]$ , где значение возбужденных молекул составило величину  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , нам удалось увеличить плотность  $\text{KrF}^*$  в 1.5 раз, т. е. достичь значения  $7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  в основном за счет увеличения расходов эксимеробразующих компонентов и эффективности смешения газов. При этом удельная плотность излучения полосы  $\text{KrF}^*$  составила величину  $\simeq 40 \text{ Вт/см}^3$ , а КПД преобразования энергии  $\geq 2\%$ .

Для изучения вопроса о достижении максимального выхода эксимерных молекул в плазменной струе исследованы зависимости интенсивности излучения  $\lambda = 308 \text{ нм}$   $\text{XeCl}^*$  и  $\lambda = 249 \text{ нм}$   $\text{KrF}^*$  от расходов газов и вводимой в дуговой разряд плазматрона мощности. Зависимость от мощности является особенно важной, поскольку дает информацию о КПД преобразования электрической энергии в излучение.

Эксперименты показали, что с увеличением как расходов газов, так и введенной в плазматрон мощности интенсивности излучения полос  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrF}^*$  увеличиваются. В качестве примера такая информация для  $\lambda = 308 \text{ нм}$   $\text{XeCl}^*$  в смеси  $\text{Ar-He-HCl}$  представлена на рис. 1. Видно, что при фиксированной величине энерговклада максимум интенсивности излучения  $\text{XeCl}^*$  смещается в сторону более высоких расхо-

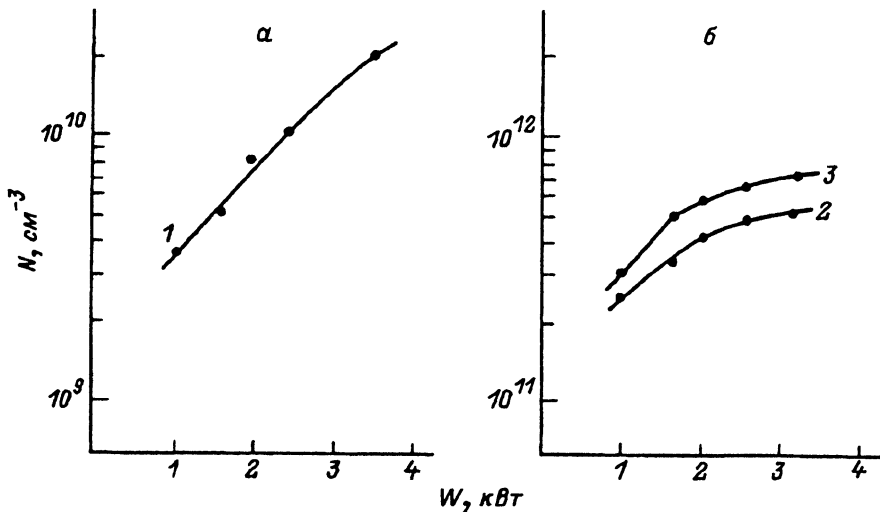


Рис. 2. Зависимость концентраций  $\text{XeCl}^*$  (а) и  $\text{KrF}^*$  (б) от вводимой в дуговой разряд мощности.

1 —  $\text{Ar-Xe-CCl}_4$  ( $G_{\text{Xe}} = 0.5 \text{ г/с}$ ,  $G_{\text{CCl}_4} = 0.07 \text{ г/с}$ ,  $G_{\text{Ar}} = 0.1 \text{ г/с}$ ); 2 —  $\text{Kr-SF}_6$  ( $G_{\text{Kr}} = 0.68 \text{ г/с}$ ,  $G_{\text{SF}_6} = 0.72 \text{ г/с}$ ); 3 —  $\text{Kr-SF}_6$  ( $G_{\text{Kr}} = 0.7 \text{ г/с}$ ,  $G_{\text{SF}_6} = 0.75 \text{ г/с}$ ).

дов рабочих компонентов. Кривые 1-3 получены при фиксированных расходах Хе и вводимой мощности  $W = 1.7$  кВт.

Зависимость интенсивностей излучения  $\lambda = 308$  нм ХеСl\* и  $\lambda = 249$  нм КгF\* в смесях Аг-Хе-ССl<sub>4</sub> и Кг-SF<sub>6</sub> от вводимой мощности представлена на рис. 2. Здесь выход эксимерных молекул дан в абсолютных единицах — концентрациях возбужденных  $B^2\Sigma$ -состояний. Из представленных зависимостей следует, что как для ХеСl\*, так и КгF\* с увеличением вводимой в дуговой разряд мощности выход эксимерных молекул возрастает и имеется еще значительный ресурс его увеличения.

В целом из полученных результатов следует, что самые высокие значения концентраций возбужденных молекул достигнуты для КгF\* и составляют величину  $\sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Данная величина концентрации позволила провести оценку коэффициента усиления на  $B \rightarrow X$ -переходе КгF\*, значение которого равно  $\simeq 2 \cdot 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>. Очевидно, что для достижения порога генерации  $\sim 10^{-2}$  см<sup>-1</sup> необходимо увеличить плотность КгF\* более чем на порядок, что связано в основном с существенным увеличением энергозатрат и повышением расходов рабочих компонентов. По оценкам для достижения пороговых значений инверсии необходимо при достигнутом КПД  $\geq 2\%$  ввести в плазмотрон удельную мощность по крайней мере не меньше 30-50 кВт/см<sup>2</sup> и обеспечить условия получения протяженных однородных потоков плазмы при расходах и давлениях газов, близких к атмосферным.

Таким образом, полученные в эксперименте данные свидетельствуют о том, что плазменный поток является высокоинтенсивным источником УФ излучения и может служить в качестве активной среды для непрерывного ОКГ.

#### Список литературы

- [1] *Розулич В.С., Стородуб В.П., Шевера В.С.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 10. С. 1893-1896.
- [2] *Розулич В.С., Стородуб В.П., Шевера В.С.* // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. Вып. 4. С. 756-758.
- [3] *Алегин А.А., Баринев В.А., Герасько Ю.А. и др.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 65-73.
- [4] *Алегин А.А., Баринев В.А., Герасько Ю.А. и др.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 43-51.