

02

## Излучательные характеристики эксимерных молекул $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ при накачке плотной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CCl}_4$ быстрыми электронами

© А.И. Миськевич<sup>1,2</sup>, А.В. Подкопаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия

<sup>2</sup> АО „ГНЦ РФ-ФЭИ“ Физико-энергетический институт им. академика А.И. Лейпунского,  
242020 Обнинск, Калужская область, Россия

e-mail: aimiskevich@mephi.ru; apodkopaev@ippe.ru

Поступила редакцию 19.04.2021 г.

В окончательной редакции 19.04.2021 г.

Принята к публикации 13.05.2021 г.

Исследованы спектрально-временные характеристики люминесценции газовых смесей ( $\text{Ar} + \text{CCl}_4$ ), возбуждаемых импульсным пучком быстрых электронов ( $E_e = 220 \text{ keV}$ ,  $T = 5 \text{ ns}$ ). Обнаружено, что в плотных газовых смесях происходит образование эксимерных молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ , излучающих широкий континуум ( $4^2\text{G} - 1^2\text{G}$ ) при  $245 \text{ nm}$ . Измерены радиационные времена высвечивания и константы тушения континуума ( $\lambda_{\text{max}} = 245 \text{ nm}$ ) компонентами газовой смеси  $\text{Ar}$ ,  $\text{CCl}_4$ . Предложена плазмохимическая модель образования эксимерных молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  в плотных газовых смесях ( $\text{Ar} + \text{CCl}_4$ ) при накачке заряженными частицами высокой энергии.

**Ключевые слова:** эксимер, молекула  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ , быстрые электроны, люминесценция.

DOI: 10.21883/OS.2021.09.51341.2173-21

### Введение

Ранее нами было обнаружено, что в плотных газовых смесях ( $\text{Ar} + \text{CCl}_4$ ) происходит образование эксимерных молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ , излучающих широкий континуум в интервале длин волн  $220 - 300 \text{ nm}$  с максимумом при  $245 \text{ nm}$ . Молекулы  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  образовывались при повышенных давлениях инертного газа  $\sim 0.5 \text{ atm}$ , причем эффективность их образования возрастала при повышении давления  $\text{Ar}$  в газовой смеси.

Широкополосное излучение молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  обусловлено связанно-свободными переходами и характеризуется большими по сравнению с молекулами  $\text{ArCl}^*$  радиационными временами жизни — порядка  $100 - 200 \text{ ns}$  и выше [1–3]. Интенсивность континуума значительно превышает эмиссию газовой смеси  $\text{Ar} - \text{N}_2$  оптимального состава. Это излучение впервые наблюдалось в работе [4] при возбуждении плотной газовой смеси  $\text{Ar} - \text{Cl}_2$  пучком протонов и было интерпретировано как излучение молекулы  $\text{Cl}_2^*$ . Позднее в работах [3,5] оно было отнесено как принадлежащее молекуле  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ .

В настоящее время имеющаяся в литературе информация по излучательным характеристикам эксимерной молекулы  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  весьма ограничена. Теоретические работы [2,6,7] были связаны с проведением *ab initio* расчетов энергетических характеристик многих двухатомных и трехатомных эксимерных молекул инертных газов, включая  $\text{Ar}$ , однако информация для молекулы  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  недостаточно полна. Имеющиеся экспериментальные данные представлены в работах [1,3–5], в которых рассмотрены излучательные характеристики этой молекулы в смесях  $\text{Ar} + \text{Cl}_2$ .

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по излучательным характеристикам молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$ , образующихся в плотных газовых смесях  $\text{Ar} + \text{CCl}_4$  различного состава при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов с энергией  $220 \text{ keV}$ . Были измерены радиационные времена высвечивания континуума эксимерной молекулы  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  ( $\lambda_{\text{max}} = 245 \text{ nm}$ , переход  $4^2\text{G} - 1^2\text{G}$ ), определены константы тушения континуума компонентами газовой смеси ( $\text{Ar}$ ,  $\text{CCl}_4$ ) и предложена модель плазмохимических процессов образования эксимерных молекул  $\text{Ar}_2\text{Cl}^*$  при накачке заряженными частицами высокой энергии, согласующаяся с экспериментальными данными.

### Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились с использованием установки, ранее подробно описанной в работе [8]. Возбуждение газовых смесей  $\text{Ar} + \text{CCl}_4$  производилось импульсным пучком быстрых электронов ускорителя РАДАН-220. Энергия электронов пучка  $\sim 220 \text{ keV}$ , длительность импульса  $\sim 5 \text{ ns}$ . Газовые смеси различного состава приготавливались непосредственно в кювете, где производилось возбуждение электронным пучком. Использовались смеси различного состава с содержанием компонент  $100 - 800 \text{ Torr}$  чистого  $\text{Ar}$  и ( $0.005 - 5 \text{ Torr}$ )  $\text{CCl}_4$ . Тщательная очистка  $\text{Ar}$  от молекулярных примесей проводилась непосредственно в кювете перед напуском галогеносодержащей примеси ( $\text{CCl}_4$ ) путем непрерывной прокачки газа через фильтр, содержащий разогретую до  $700^\circ\text{C}$  титановую губку. Эта

процедура является крайне важной, так как наличие в смеси даже малых количеств молекулярных газов может вызвать сильное тушение эксимерной люминесценции. Полный цикл очистки газа обычно продолжался 8–10 min, после чего содержание остаточных молекулярных газов в очищаемом газе обычно не превышало  $10^{-4}\%$ .

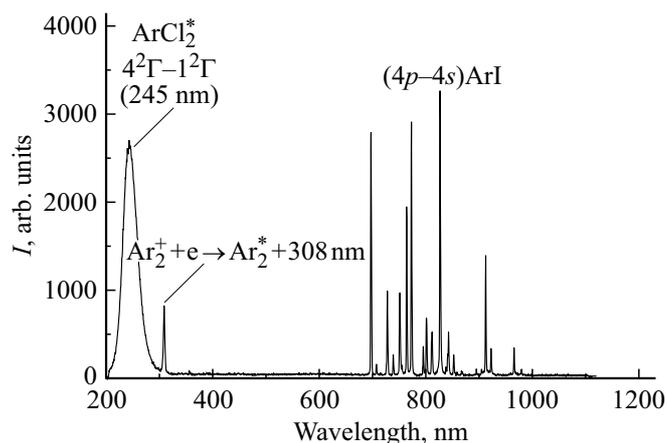
Для приготовления смесей с малым содержанием  $CCl_4$  использовался двухступенчатый метод, когда в кювету добавляется не чистый газ  $CCl_4$ , а смесь  $Ar + CCl_4$  с высоким содержанием  $CCl_4$  из отдельного мерного объема. Отношение этого объема к суммарному объему кюветы и подводящих коммуникаций было равно 1:100, что позволяло получать концентрации  $CCl_4$  в газовой смеси  $\sim 0.1\%$  и ниже с высокой точностью. Смешивание газов из мерного и основного объемов осуществлялось циркуляционным насосом при отключенном титановом фильтре после завершения процедуры очистки основного газа  $Ar$ .

Спектральные измерения люминесценции газовой смеси  $Ar + CCl_4$  производились в диапазоне длин волн 200–1200 nm с использованием спектрометра MAYA2000Pro с ПЗС-матрицей. Спектрометр MAYA2000Pro регистрирует с разрешением 0.5 nm интегральный во времени спектр светового излучения (минимальное время интеграции составляет 6 ms) за все время действия импульса накачки и последующего распада плазмы. Временные измерения континуума эксимерной молекулы  $Ar_2Cl^*$  на длине волны 245 nm выполнялись с помощью ФЭУ-100 и монохроматора МДР-23, используемого в качестве перестраиваемого фильтра для выделения исследуемого участка спектра шириной 4 nm. Фотоумножитель ФЭУ-100 работал в токовом режиме на нагрузку 50  $\Omega$ , запись сигнала производилась цифровым осциллографом TektronixTDS 1012.

## Результаты измерений и обсуждение

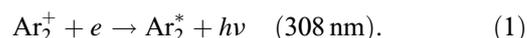
Трехатомная молекула  $Ar_2Cl^*$  излучает широкий континуум в диапазоне длин волн 220–300 nm с максимумом при 245 nm. Согласно [1], это излучение обусловлено переходами между сильно связанным ионным верхним состоянием молекулы  $Ar_2Cl^*$ , образованным из ионов  $Ar_2^+$  и  $Cl^-$ , и нижним разлетным состоянием, образованным молекулой  $Ar_2^*$  и атомом  $Cl$  в основном состоянии.

На рис. 1 показан интегральный во времени спектр люминесценции газовой смеси  $Ar-CCl_4$  при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов с энергией 220 keV длительностью 5 ns. В области длин волн 200–1200 nm спектр состоит из полосы эксимерной молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245$  nm) в ультрафиолетовом диапазоне, линейчатого излучения при 308 nm и группы 4p–4s-линий  $ArI$  в длинноволновой области ( $\lambda > 650$  nm). Происхождение излучения с длиной волны 308 nm связано с реакцией рекомбинации молекуляр-



**Рис. 1.** Аппаратурный спектр люминесценции газовой смеси  $Ar-CCl_4$  при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов ( $E_e = 220$  keV,  $T = 5$  ns). Состав смеси:  $Ar$  — 768 Torr,  $CCl_4$  — 0.015 Torr.

ного иона  $Ar_2^+$ :



В приведенном спектре отсутствует  $B-X$ -полоса двухатомной эксимерной молекулы  $ArCl^*$  ( $\lambda_{max} = 175$  nm), поскольку это излучение лежит вне диапазона измеряемых длин волн спектрометром MAYA2000Pro и поэтому в приведенном на рис. 1 спектре не наблюдается. Полуширина  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  полосы эксимерной молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245$  nm) равна  $\Delta\lambda = 30$  nm (рис. 1).

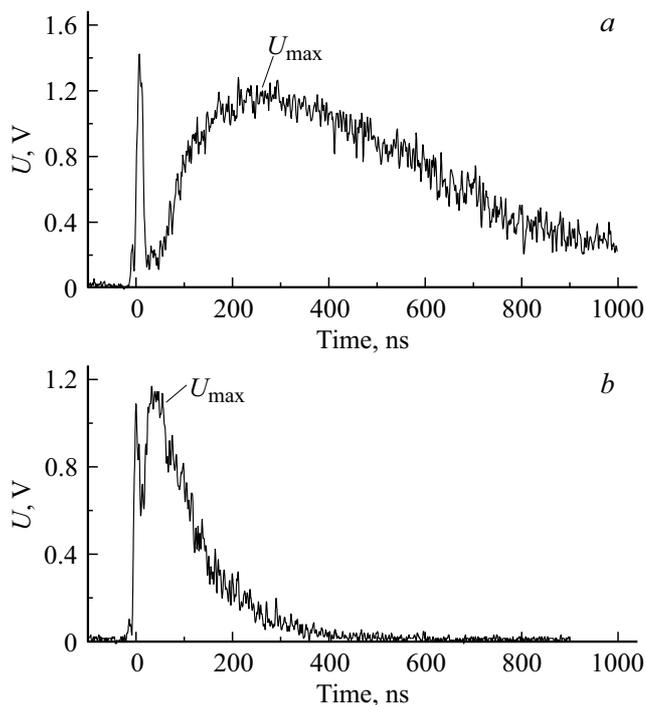
С увеличением концентрации  $CCl_4$  в спектре излучения газовой смеси  $Ar-CCl_4$  уменьшается интенсивность всех атомарных 4p–4s-линий  $ArI$ . Это объясняется снижением концентрации электронов в газовой среде из-за увеличения скорости прилипания электронов к молекулам  $CCl_4$  при увеличении парциального давления  $CCl_4$  и в связи с этим снижением скорости диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $Ar_2^+$ .

При давлении  $Ar$  800 Torr оптимальное парциальное давление  $CCl_4$  в смеси, соответствующее максимальному световыходу полосы  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  молекулы  $Ar_2Cl^*$ , равно 0.15 Torr. В табл. 1 приведены энергетические характеристики основных компонент плазмы  $Ar + CCl_4$ , связанные с образованием эксимерных молекул  $ArCl^*$  и  $Ar_2Cl^*$ .

Измерения временных характеристик люминесценции молекул  $Ar_2Cl^*$  проводились для смесей, содержащих 0.005–10.0 Torr  $CCl_4$  и 200–835 Torr  $Ar$ , и были выполнены на длине волны 245 nm, соответствующей максимальным значениям интенсивности  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -полосы молекулы  $Ar_2Cl$ . На рис. 2 приведены измеренные кривые высвечивания на длине волны 245 nm для газовых смесей с содержанием 0.005 Torr  $CCl_4$  (рис. 2, a) и 0.5 Torr  $CCl_4$  (рис. 2, b) при давлении аргона 800 Torr. Первый узкий пик на осциллограмме (длительностью 5 ns) соответствует импульсу электронов накачки электронного

**Таблица 1.** Энергетические характеристики компонента плазмы (Ar–CCl<sub>4</sub>), связанные с образованием эксимерных молекул ArCl\* и Ar<sub>2</sub>Cl\*

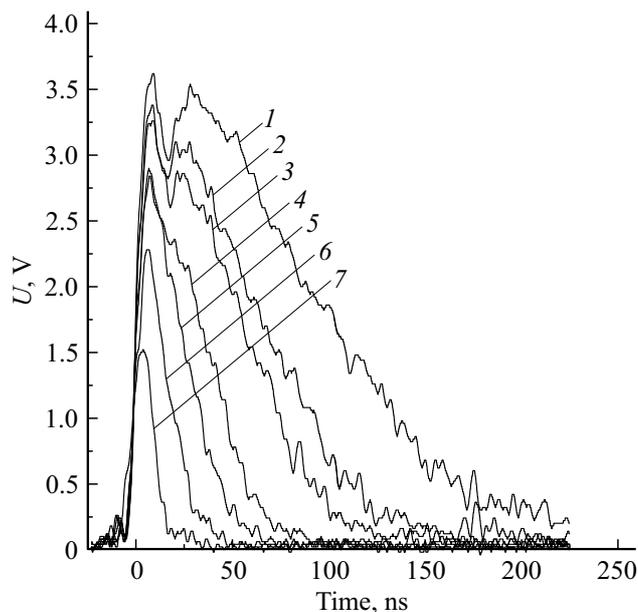
Компонента плазмы	Параметр	Энергия, eV	Источник
Ar <sup>+</sup>	Потенциал ионизации	15.759 ( <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> <sup>0</sup> )	[9]
		15.93 ( <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> <sup>0</sup> )	[9]
Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Потенциал образования Глубина потенциальной ямы	14.71	[10]
		1.23	[10]
Ar* (3p <sup>5</sup> 4s)	Энергетический уровень	11.83 ( <sup>1</sup> P <sub>1</sub> )	[9]
		11.72 ( <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )	
		11.62 ( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )	
		11.55 ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )	
Ar <sub>2</sub> *	Глубина потенциальной ямы	0.74 ( <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )	
		0.68 ( <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )	
		2.4 · 10 <sup>-2</sup> ( <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )	
Cl–CCl <sub>3</sub> C–Cl	Энергия разрыва связи	2.9–2.916	[10,11]
		2.8	[10]
CCl <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Сечение прилипания электрона (E <sub>e</sub> = 0.05 eV)	(1.2–1.4) · 10 <sup>14</sup> cm <sup>2</sup>	[12]
CCl <sub>3</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup>	Энергия сродства к электрону	> 2.10 ± 0.35 3.82	[10]

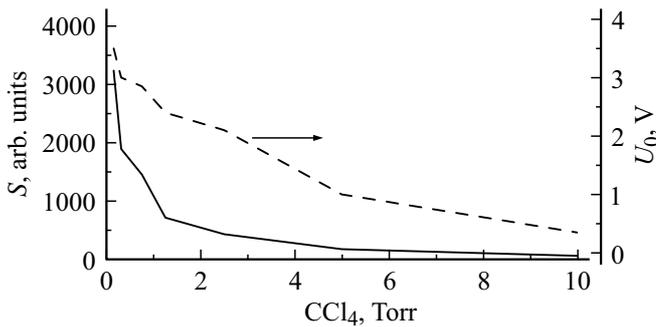
**Рис. 2.** Временные осциллограммы: Ar — 782 Torr, CCl<sub>4</sub> — 0.005 Torr (a); Ar — 800 Torr, CCl<sub>4</sub> — 0.5 Torr (b).

ускорителя РАДАН-220, а второй, широкий пик с амплитудой  $U_0$  — излучению эксимерной молекулы Ar<sub>2</sub>Cl\*. Заселение верхнего уровня 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г полосы молекулы Ar<sub>2</sub>Cl\* происходит постепенно в течение временного интервала ~ 70 ns при высоких концентрациях CCl<sub>4</sub> и

увеличивается до 200–250 ns при низких. Такие времена задержки коррелируют с временем образования молекулярного иона Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> и процессом ион-ионной рекомбинации ионов Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>.

На рис. 3 приведены временные осциллограммы импульсов люминесценции для газовых смесей с содержанием CCl<sub>4</sub> в смеси от 0.15 до 10 Torr. На рис. 4 пока-

**Рис. 3.** Временные осциллограммы импульсов люминесценции газовой смеси Ar–CCl<sub>4</sub> на длине волны 245 nm. Состав смеси: Ar — 800 Torr, CCl<sub>4</sub> — 0.155 (1), 0.31 (2), 0.75 (3), 1.25 (4), 2.5 (5), 5.0 (6), 10 Torr (7).



**Рис. 4.** Относительный световыход  $S$  излучения полосы  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) и амплитуда световой вспышки  $U_0$  в зависимости от парциального давления  $CCl_4$  в смеси. Давление  $Ar$  — 800 Torr.

заны амплитуда световой вспышки  $U_0$  и относительный световыход  $S$  полосы молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) в зависимости от парциального давления  $CCl_4$  в смеси. Световыход  $S$  определялся как площадь временной осциллограммы за вычетом площади пика импульса накачки ускорителя. Видно, что световыход полосы молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) снижается при увеличении концентрации  $CCl_4$ , в то время как амплитуда  $U_0$  световой вспышки меняется не так сильно — при изменении парциального давления  $CCl_4$  в смеси от 0.005 до 10.0 Torr  $U_0$  изменяется от 3.5 V (0.005 Torr) до 0.4 V (10 Torr). Это указывает на то, что тушение эксимерной люминесценции происходит на стадии послесвечения, а не на стадии образования эксимерной молекулы. Фактически амплитуда  $U_0$  характеризует количество образовавшихся возбужденных молекул  $Ar_2Cl^*$ , которое в данном случае слабо зависит от концентрации  $CCl_4$  в смеси. При определенных условиях накачки эти возбужденные молекулы  $Ar_2Cl^*$  могут быть эффективно использованы в режиме генерации до момента их тушения молекулами  $CCl_4$  в средах с большим содержанием донора галогена типа  $CCl_4$ .

Измерения кривых высвечивания молекулярной полосы  $Ar_2Cl^*$  для смесей  $Ar + CCl_4$  различного состава позволяют определить константы тушения этой полосы компонентами смеси. На рис. 5, 6 приведены зависимости обратного времени высвечивания  $1/t$  полосы  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  молекулы  $Ar_2Cl$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) от содержания  $CCl_4$  (рис. 5) и  $Ar$  (рис. 6) в смеси. Из этих зависимостей были определены радиационные времена высвечивания и константы тушения полосы  $Ar_2Cl^*$  молекулами  $CCl_4$  и атомами  $Ar$ . Они оказались соответственно равны:

$$t_0 = 400\text{ ns}, \quad k = 5 \cdot 10^{-10}\text{ cm}^3/\text{s} (CCl_4),$$

$$k = 4.4 \cdot 10^{-14}\text{ cm}^3/\text{s} (Ar). \quad (2)$$

Учитывая, что полуширина  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -полосы  $Ar_2Cl$   $\Delta\lambda = 30\text{ nm}$ , это позволяет определить сечение вынужденного испускания  $\sigma_c$  и плотность энергии насыще-

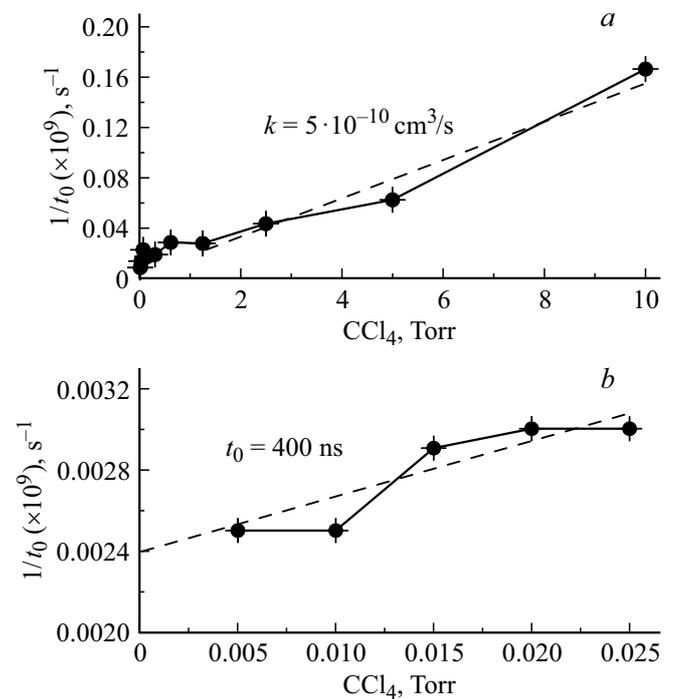
ния  $Q_s$  для этого перехода:

$$\sigma_c = \lambda^4 / 8\pi c t_0 \Delta\lambda = 3.9 \cdot 10^{-19}\text{ cm}^2, \quad (3)$$

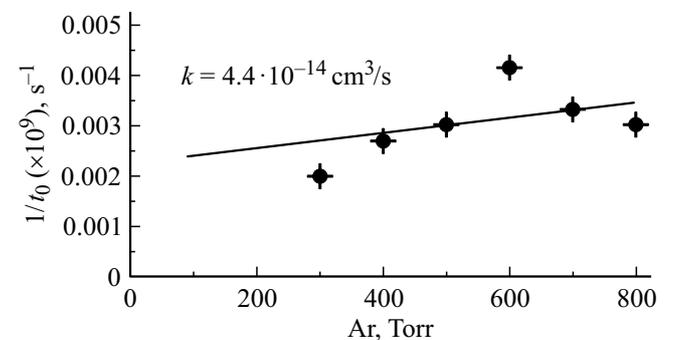
$$Q_s = hv / \sigma_c = 2.06\text{ J/cm}^2. \quad (4)$$

### Плазмохимическая модель образования эксимерных молекул $Ar_2Cl$ заряженными частицами высокой энергии

Основные кинетические процессы, приводящие к образованию эксимерных молекул  $Ar_2Cl^*$  при накачке



**Рис. 5.** Обратное время высвечивания  $1/t_0$  полосы  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) в зависимости от парциального давления  $CCl_4$  при высоких (а) и низких (б) концентрациях  $CCl_4$  в смеси. Давление  $Ar$  — 800 Torr.



**Рис. 6.** Обратное время высвечивания  $1/t_0$  полосы  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$  молекулы  $Ar_2Cl^*$  ( $\lambda_{max} = 245\text{ nm}$ ) в зависимости от парциального давления  $Ar$  в смеси. Парциальное давление  $CCl_4$  — 0.045 Torr.

**Таблица 2.** Основные плазмохимические реакции при возбуждении плотной газовой смеси Ar + CCl<sub>4</sub> электронами высокой энергии

№	Реакции	Константы скорости	Источник
1	Ar + (e <sub>f</sub> , e <sub>δ</sub> ) → Ar <sup>+</sup> + e + (e <sub>f</sub> , e <sub>δ</sub> ) Ar + (e <sub>f</sub> , e <sub>δ</sub> ) → Ar* + (e <sub>f</sub> , e <sub>δ</sub> )	w = E/N(Ar <sup>+</sup> ) = 1.7I = 26.79 eV N(Ar*) = 0.4N(Ar <sup>+</sup> ) cm <sup>-3</sup> E <sub>e</sub> = 0.31I = 4.88 eV	[13]
2	Ar <sup>+</sup> + 2Ar → Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + Ar	(1.8–3.5) · 10 <sup>-31</sup> cm <sup>6</sup> /s	[13]
3	Ar* + 2Ar → Ar <sub>2</sub> * + Ar	(2.5–8.5) · 10 <sup>-32</sup> cm <sup>6</sup> /s	[13]
4	Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e → Ar*(4p) + Ar	8.1 · 10 <sup>-5</sup> T <sub>e</sub> <sup>-0.6</sup>	[13]
5	CCl <sub>4</sub> + e → (CCl <sub>4</sub> ) <sup>-</sup> → CCl <sub>3</sub> + Cl <sup>-</sup>	σ = (1.2–1.4) · 10 <sup>-14</sup> cm <sup>2</sup> (для E <sub>e</sub> = 0.05 eV) 7 · 10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /s, (для T <sub>e</sub> = 0.25 eV)	[12] [14]
6	Ar <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup> + Ar → ArCl* + Ar		
7	Ar+2 <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup> + Ar → Ar <sub>2</sub> Cl* + Ar		
8	ArCl* → Ar + Cl + hν (175 nm)		
9	Ar <sub>2</sub> Cl* → 2Ar + Cl + hν (245 nm)	t <sub>0</sub> = 400 ns t <sub>0</sub> = 240 ± 40 ns t <sub>0</sub> = 654 ns	Настоящая работа [3] [2]
10	Ar <sub>2</sub> Cl* + CCl <sub>4</sub> → продукты	k = 5 · 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> /s	Настоящая работа
11	Ar <sub>2</sub> Cl* + Ar → продукты	k = 4.4 · 10 <sup>-14</sup> cm <sup>3</sup> /s	Настоящая работа

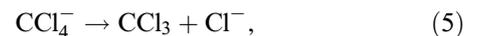
*Примечание.* e<sub>f</sub>, e<sub>δ</sub> — электроны накачки и электроны ионизационного каскада; E — энергия электронов накачки; w — энергия образования пары (Ar<sup>+</sup> + e); N(Ar<sup>+</sup>), N(Ar\*) — число ионов Ar<sup>+</sup>, возбужденных атомов Ar\* и средняя энергия вторичных электронов, образованных электроном накачки с энергией E; T<sub>e</sub> — температура электронов.

плотных газовых смесей Ar–CCl<sub>4</sub> заряженными частицами высокой энергии, приведены и пронумерованы в табл. 2. Там же указаны коэффициенты скоростей реакций по данным разных авторов.

Эксимерные молекулы Ar<sub>2</sub>Cl\* образуются в многоступенчатом процессе, включающим реакции образования отрицательных ионов Cl<sup>-</sup>, положительных ионов Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> и ион-ионную рекомбинацию ионов Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. Анализ имеющихся экспериментальных данных по ядерной накачке газовых сред показывает, что при возбуждении плотных газовых смесей типа Rg + X заряженными частицами высокой энергии (здесь Rg — инертный газ, X — галоген) основным каналом образования двухатомных и трехатомных эксимерных молекул являются реакции ион-ионной рекомбинации положительных ионов Rg<sup>+</sup> и Rg<sub>2</sub><sup>+</sup> с отрицательными ионами галогена (реакции 6, 7), а вклад других каналов образования эксимерных молекул существенно меньше.

Быстрая заряженная частица высокой энергии (в нашем случае электрон с энергией 220 keV) при прохождении через газовую среду Ar–CCl<sub>4</sub> с низким содержанием галогеносодержащей примеси передает всю свою энергию атомам аргона, образуя ионы Ar<sup>+</sup>, возбужденные атомы Ar\* и электроны ионизационного каскада (реакция 1). При высоком давлении буферного газа (~ 1 atm) вследствие тройных соударений атомарные ионы Ar<sup>+</sup> за время ~ 5 ns превращаются в молекулярные ионы Ar<sub>2</sub><sup>+</sup>, а возбужденные атомы Ar\* — в возбужден-

ные молекулы Ar<sub>2</sub>\* (реакции 2, 3). Электроны ионизационного каскада термализуются, теряя свою энергию при неупругих и упругих соударениях с атомами Ar. Согласно [13], время замедления первичных электронов совместно со вторичными электронами ионизационного каскада и установление стационарного энергетического распределения электронов в Ar при атмосферном давлении составляет 5–10 ns. Термализованные электроны активно участвуют в диссоциативной рекомбинации молекулярного иона Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> (реакция 4) и в образовании отрицательных ионов CCl<sub>4</sub><sup>-</sup> за счет прилипания к электроотрицательной примеси (реакция 5). Прилипание к молекулам CCl<sub>4</sub> сопровождается диссоциацией этих молекул с образованием отрицательно заряженных радикалов молекул CCl<sub>3</sub><sup>-</sup>, CCl<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sub>2</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> [14]. Собственно ионы CCl<sub>4</sub><sup>-</sup> не образуются вследствие того, что энергия диссоциации этого молекулярного иона,



лежит на 0.5 eV ниже основного состояния молекулы CCl<sub>4</sub>. Это позволяет электронам с нулевой энергией создавать ионы Cl<sup>-</sup>. Электроны больших энергий (~ нескольких eV) при прилипании могут сильнее разрушать молекулу CCl<sub>4</sub> и образовывать ионы CCl<sub>3</sub><sup>-</sup>, CCl<sub>2</sub><sup>-</sup>, CCl<sup>-</sup>, однако вероятность процесса сильно уменьшается с ростом энергии электронов. Суммарный вклад всех этих ионов не превышает 0.1% от числа ионов Cl<sup>-</sup> [14].

Эксимерные молекулы  $ArCl^*$  и  $Ar_2Cl^*$  распадаются радиационно (реакции 8,9) и испытывают столкновительное тушение при соударениях с атомами  $Ar$  и молекулами  $CCl_4$  (реакции 10,11).

## Заключение

В работе были экспериментально измерены характеристики люминесценции эксимерной молекулы  $Ar_2Cl$ , образующейся в плотной газовой смеси  $Ar-CCl_4$  при возбуждении быстрыми электронами ( $E_e = 220$  keV). Для  $4^2G-1^2G$ -перехода молекулы  $Ar_2Cl^*$  были определены длина волны ( $\lambda_{max} = 245$  nm), соответствующая максимуму интенсивности, определены радиационное время высвечивания ( $t_0 = 400$  ns) и полуширина полосы ( $\Delta\lambda = 30$  nm), а также сечение вынужденного испускания ( $3.9 \cdot 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>) и плотность энергии насыщения для этого перехода ( $2.06$  J/cm<sup>2</sup>).

Были измерены также константы тушения  $4^2G-1^2G$ -полосы  $Ar_2Cl^*$  молекулами  $CCl_4$  и атомами  $Ar$ . Они оказались соответственно равны  $5 \cdot 10^{-10}$  cm<sup>3</sup>/s ( $CCl_4$ ) и  $4.4 \cdot 10^{-14}$  cm<sup>3</sup>/s ( $Ar$ ). Было обнаружено, что тушение эксимерной люминесценции компонентами плазмы происходит на стадии послесвечения, а не на стадии образования эксимерной молекулы. В связи с этим при определенных условиях накачки молекулы  $Ar_2Cl^*$  эффективно использованы в режиме генерации до момента их тушения молекулами  $CCl_4$  в средах с большим содержанием донора галогена типа  $CCl_4$ .

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Huestis D.L., Marowsky G., Tittel F.K.* // Excimer Lasers / Ed. by Rhodes Ch.K. Springer-Verlag, 1984. P. 181–216.
- [2] *Alekseev V.A.* // J. Phys. B. 2014. V. 47. P. 105101. doi 10.1088/0953-4075/47/10/105101
- [3] *Liegel J., Spiegel H., Sauerbrey R., Langhoff H.* // J. Chem. Phys. 1983. V. 79. N 1. P. 247. doi 10.1063/1.445564
- [4] *Chen C.H., Payne M.G.* // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 4. P. 219.
- [5] *Lorents D.C., Huestis D.L., McCusker M.V., Nakano H.H., Hill R.M.* // J. Chem. Phys. 1978. V. 68. N 10. P. 4657.
- [6] *Wadt W.R., Hay P.J.* // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30. N 11. P. 573.
- [7] *Dunning T.H., Hay P.J.* // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 11. P. 649.
- [8] *Миськевич А.И., Подкопаев А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 3. С. 154–159.
- [9] *Стриганов А.Р., Светицкий Н.С.* Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 899 с.
- [10] Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
- [11] *Kolts J.H., Velazco J.E., Setser D.W.* // J. Chem. Phys. 1979. V. 71. P. 1247.
- [12] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [13] *Мельников С.П., Сизов А.Н., Снянский А.А.* Лазеры с ядерной накачкой. Саров, 2008. 439 с.
- [14] *Scheunemann H.-U., Illenberger E., Baumgartel H.* // Berichte der Bunsen gesellschaft für physikalische Chemie. 1980. P. 580.