

05

## Излучательные характеристики молекул $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$ при накачке пучком быстрых электронов газовых смесей $\text{Xe}-\text{CCl}_4$ и $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$ с низким содержанием $\text{CCl}_4$

© А.И. Миськевич

Национальный исследовательский ядерный университет  
„Московский инженерно-физический институт“ (НИЯУ МИФИ),  
115409 Москва, Россия

e-mail: miskev@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.2018 г.

В окончательной редакции 03.07.2018 г.

Принято к публикации 30.11.2018 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований спонтанного и вынужденного излучения триплексных молекул  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  при возбуждении газовых смесей  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  с низким содержанием  $\text{CCl}_4$  импульсным пучком быстрых электронов. Энергия электронов — 150 keV, длительность и амплитуда импульса тока накачки — 5 ns и 5 A соответственно. Показано, что излучение эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}$  в диапазоне длин волн 430–650 nm состоит из 13 узких колебательных полос с длинами волн в максимуме 399, 413, 431, 451, 472, 492, 510.3, 534.9, 540.9, 551.7, 564.4, 581.6, 603 nm и полушириной  $\Delta\lambda \sim 14$  nm каждая. При указанных условиях накачки при энергозкладах в газ  $\sim 200$  W/cm<sup>3</sup> на оси кюветы длиной 50 mm при накачке электронным пучком в диапазоне длин волн 450–550 nm реализуется режим слабого усиления спонтанного излучения. При накачке плотной газовой смеси  ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции при энергозкладе в газ  $\sim 5$  mJ/cm<sup>3</sup> в резонаторе с отражением зеркал  $\sim 99.4\%$  (глухое) и 98.5% (выходное зеркало) в кювете длиной 100 cm наблюдалось 60-кратное усиление спонтанного излучения  $4^2\text{T}-1^2\text{T}$ -полосы эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  на длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 486$  nm.

DOI: 10.21883/OS.2019.04.47517.189-18

### Введение

Трехатомные (триплексные) эксимерные молекулы моногалогенидов инертных газов ( $\text{R}_2\text{X}^*$ ) представляются перспективными кандидатами для получения эффективной лазерной генерации в сине-зеленой области спектра с возможностью перестройки длины волны излучения в интервале шириной до 100 nm [1–3]. Широкополосное излучение молекул  $\text{R}_2\text{X}^*$  обусловлено связанно-свободными переходами молекул и характеризуется большими (по сравнению с двухатомными молекулами  $\text{RX}^*$ ) радиационными временами жизни — порядка 100–200 ns [4,5]. Структура триплексных молекул  $\text{R}_2\text{X}^*$  рассматривалась в работах [6–8]. Было обнаружено, что широкий континуум, испускаемый в сине-зеленой области спектра молекулами  $\text{R}_2\text{X}^*$ , состоит из нескольких более узких полос. В частности, для молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  это узкие полосы с максимумами на длинах волн при 472, 488, 495, 514 и 541 nm, связанные с переходами  $2^2B_2 \rightarrow 1^2A_1$ ,  $2^2B_2 \rightarrow 1^2B_2$ ,  $4^2\text{T} \rightarrow 1^2\text{T}$ ,  $4^2\text{T} \rightarrow 2^2\text{T}$ ,  $4^2\text{T} \rightarrow 3^2\text{T}$  молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  [8]. На этих длинах волн было получено положительное усиление и генерация лазерного излучения в  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  высокого давления при накачке пучком электронов высокой энергии [2,3].

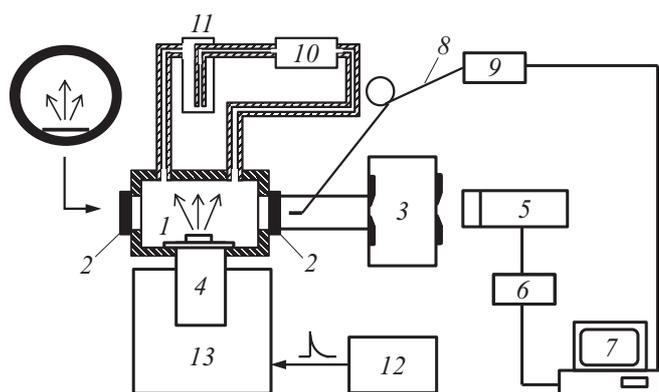
Следует заметить, что эффективность возбуждения широкополосного континуума молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  сильно зависит от содержания галогеносодержащего донора  $\text{CCl}_4$  и достигает максимальных значений при парциаль-

ном давлении  $\text{CCl}_4 \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Torr в смеси с чистым  $\text{Xe}$  высокого давления (1–2.5 atm) [9]. Проведенные ранее генерационные эксперименты с газовой смесью  $\text{Ar} + \text{Xe} + \text{CCl}_4$  [2,3] были выполнены при высоком содержании  $\text{CCl}_4$  в смеси, не отвечающем этим оптимальным условиям накачки.

В настоящей работе рассматриваются характеристики спонтанного и вынужденного излучения молекул  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  для газовых смесей  $\text{Xe} + \text{CCl}_4$  с низким содержанием молекул донора  $\text{CCl}_4$ , возбуждаемых импульсным электронным пучком быстрых электронов и продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на установке, показанной на рис. 1. Газовая смесь оптимального состава ( $\text{Xe} - 500-1500$  Torr,  $\text{CCl}_4 - 0.038-0.05$  Torr) напускалась в кювету (1) из нержавеющей стали размером 80 × 100 mm. На боковой поверхности кюветы на фланце была установлена трубка ИМА-150Э (4) с взрывоэмиссионным катодом, формирующая импульсный пучок быстрых электронов с энергией 150 keV и длительностью на полувысоте  $\sim 5$  ns. Общее число быстрых электронов накачки в одиночном импульсе составляло  $\sim 2 \cdot 10^{12}$  electrons/pulse. Форма электронного импульса накачки записана с помощью плоского



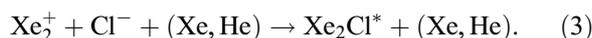
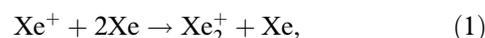
**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки для измерения спектрально-кинетических характеристик люминесценции эксимерных газовых сред при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 keV (ускоритель Арина-2): 1 — камера, 2 — кварцевое окно, 3 — монохроматор МДР-23, 4 — ускоритель электронов „Арина-2“, 5 — фотоумножитель ФЭУ-106 (ФЭУ-62), 6 — цифровой осциллограф Rigol DS 5022, 7 — компьютер IBM PC, 8 — волоконный световод, 9 — спектрометр MAYA-2000Pro, 10 — циркуляционный насос, 11 — титановый фильтр, 12 — блок запуска ускорителя и синхронизации, 13 — высоковольтный блок питания ускорителя.

зонда. На торцах кюветы (1) были установлены 2 зеркала (2) с многослойными диэлектрическими покрытиями, имеющие высокий коэффициент отражения ( $\rho_1 \sim 98\text{--}99\%$ ,  $\rho_2 \sim 97\text{--}99\%$ ) в диапазоне длин волн 450–600 nm, или кварцевые окна. При соответствующей юстировке эти зеркала могли образовать оптический резонатор. Кварцевые окна использовались при измерениях характеристик спонтанного излучения газовой смеси  $\text{Xe} + \text{CCl}_4$ . Спектральный состав излучения, выходящего из кюветы, регистрировался с помощью волоконного световода (8) спектрометром MAYA-2000Pro (9) с ПЗС-матрицей. Запись временных сигналов производилась на цифровой осциллограф Rigol DS 5022 (6) с помощью ФЭУ-106 или ФЭУ-62 (5), установленного на выходной щели спектрометра МДР-23 (3). Спектрометр MAYA-2000Pro и цифровой осциллограф были подключены к компьютеру (7). При проведении экспериментов особое внимание уделялось чистоте используемых газов. Для этого перед окончательным приготовлением газовой смеси (т.е. перед напуском  $\text{CCl}_4$ ) производилась очистка  $\text{Xe}$  непосредственно в кювете путем многократной прокачки с помощью циркуляционного насоса (10) через разогретую до 700°C титановую губку (11).

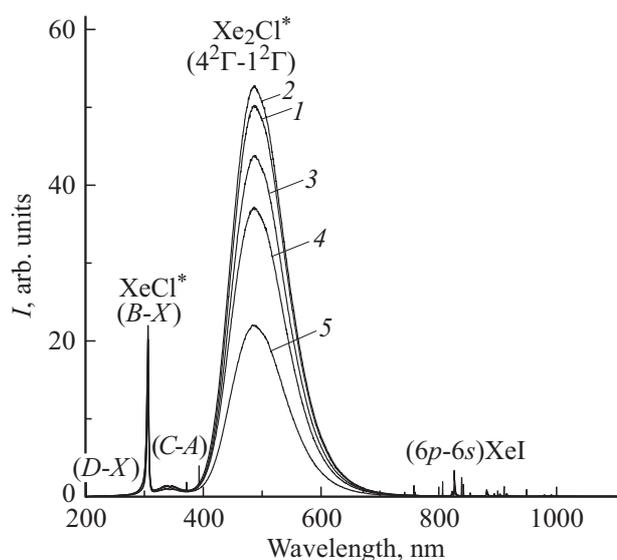
## Полученные результаты

Спектры спонтанного излучения эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  для газовой смеси  $\text{Xe} + \text{CCl}_4$  при различных содержаниях донора  $\text{CCl}_4$  при давлении  $\text{Xe}$  в смеси

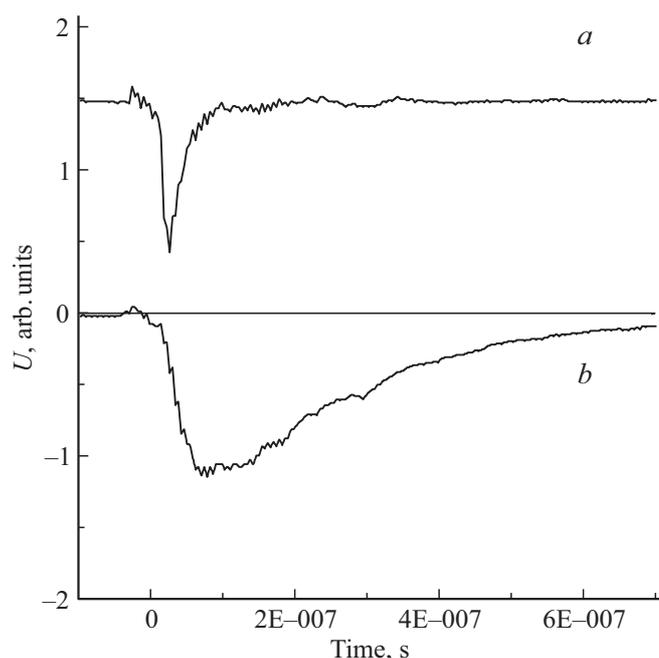
1900 Torr приведены на рис. 2. Спектры записаны при замене зеркал кварцевыми окнами. Спектры люминесценции состоят из яркого континуума в сине-зеленой области спектра (430–650 nm) с максимумом при 486 nm, связанного с переходами  $4^2\Gamma\text{--}1^2\Gamma$  молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$ , полосами (B–X), (C–A) и (D–X) молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda_{\text{max}} = 308, 345$  и 236 nm), слабых по сравнению с излучением эксимерных молекул атомарных линий  $6p\text{--}6s$   $\text{XeI}$ . Оптимальное парциальное давление донора в смеси составляло около 50 mTorr ( $\sim 1.8 \cdot 10^{15}$  mol/cm<sup>3</sup>). Столь низкое значение оптимальной концентрации  $\text{CCl}_4$  в смеси связано со свойствами плазмы, создаваемой заряженными частицами высокой энергии в плотных газах — а именно, ее трековой структурой и многоступенчатым характером образования молекул  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  при ион-ионной рекомбинации молекулярных ионов  $\text{Xe}_2^+$  и  $\text{CCl}_4^-$  в смесях высокого давления:



Плазмохимические процессы (1)–(3) протекают непосредственно в треке частицы. Поэтому концентрация донора  $\text{CCl}_4$  должна быть сравнима с концентрацией электронов в треке. Превышение парциального давления  $\text{CCl}_4$  в смеси выше 100 mTorr из-за отсутствия свободных электронов в треке не приводит к увеличению числа отрицательных ионов  $\text{Cl}^-$ , но вызывает сильное столкновительное тушение эксимерных молекул (рис. 2, кривые 3–5) за счет процесса

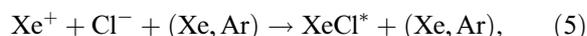


**Рис. 2.** Спектр спонтанного излучения газовой смеси  $\text{Xe}\text{--}\text{CCl}_4$  высокого давления при возбуждении пучком быстрых электронов с энергией 150 keV. Состав смеси:  $\text{Xe}$  — 1900 Torr;  $\text{CCl}_4$  — 36 (1), 50 (2), 100 (3), 200 (4), 400 mTorr (5).



**Рис. 3.** Временные осциллограммы импульсов излучения на длинах волн 308 (а) и 486 nm (b). Состав смеси: Хе — 1900 Torr, CCl<sub>4</sub> — 50 mTorr, возбуждение смеси производилось импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 keV и длительностью 5 ns.

Временные осциллограммы импульсов люминесценции на длинах волн 308 и 486 nm приведены на рис. 3, а, b. Следует отметить существенные отличия формы осциллограмм рис. 3, а от рис. 3, b: излучение молекул Хе<sub>2</sub>Cl\* происходит с задержкой относительно импульса накачки на 100–120 ns, в то время как молекулы ХеCl\* излучают с нулевой задержкой почти одновременно с импульсом электронов накачки. Это отражает характер действующих механизмов образования эксимерных молекул ХеCl\* и Хе<sub>2</sub>Cl\*: для молекул ХеCl\* основными реакциями являются (2) и реакция



в то время как для Хе<sub>2</sub>Cl\* — реакции (1), (2) и (3).

Время высвечивания молекулярной полосы (4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г) Хе<sub>2</sub>Cl\* (λ = 486 nm) при давлении Хе + CCl<sub>4</sub> газовой смеси 1900 Torr составляет 225 ns (рис. 3, b). С учетом столновительного тушения молекулами CCl<sub>4</sub> (и в меньшей степени атомами Хе) это соответствует измеренному в работе [10] радиационному времени жизни 245 ns полосы (4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г) Хе<sub>2</sub>Cl\*.

Более подробно действующие плазмохимические процессы образования молекул Хе<sub>2</sub>Cl\* рассматриваются в работе [9,10].

Исходя из данных рис. 2 и 3 можно определить сечение вынужденного испускания молекул Хе<sub>2</sub>Cl\* в смеси

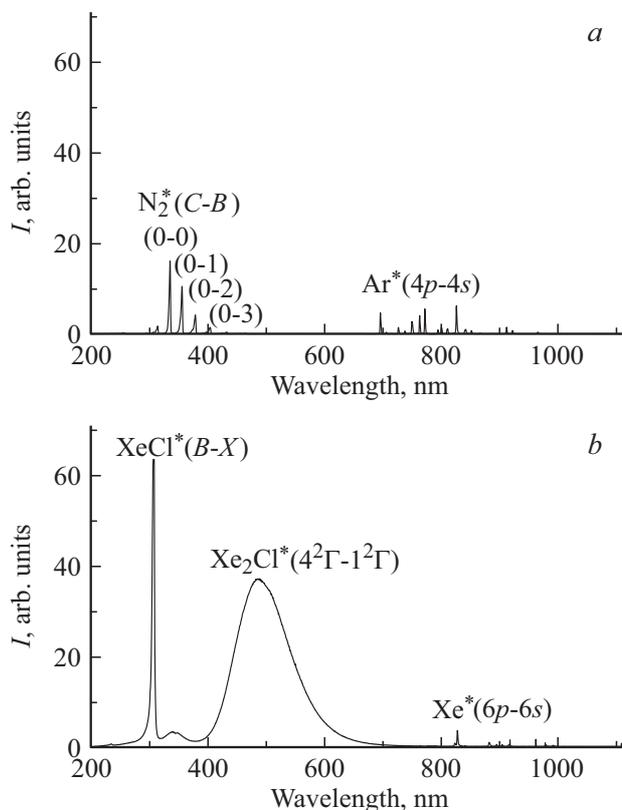
Хе + CCl<sub>4</sub> оптимального состава:

$$\sigma = (\ln 2/\pi)^{0.5} \lambda_{\max}^4 / (4\pi c t \Delta\lambda) \quad (6)$$

Здесь  $t = 245$  ns — радиационное время жизни молекулярной полосы (4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г) молекулы Хе<sub>2</sub>Cl\* [9], λ<sub>max</sub> = 486 nm — пиковое значение длины волны излучения, Δλ = 108 nm — ширина полосы на полувысоте,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s — скорость света. Подстановка численных значений дает величину  $\sigma = 2.64 \cdot 10^{-18}$  cm<sup>2</sup> и плотность энергии насыщения  $Q_s = hv/\sigma = 0.154$  J/cm<sup>2</sup>.

Добавки гелия к „жидкой“ газовой смеси Хе + CCl<sub>4</sub> (P<sub>Хе</sub> = 1520 Torr, P<sub>CCl<sub>4</sub></sub> = 0.036 Torr) в количестве до 380 Torr не вызывают тушения молекулярной полосы (4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г) Хе<sub>2</sub>Cl\*, не изменяют время высвечивания и, наоборот, даже способствуют увеличению световыхода в этой полосе, что можно объяснить увеличением энерговыклада в газовую среду при добавке гелия.

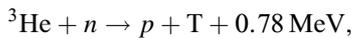
Для оценки величины световыхода в полосе (4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г) молекулы Хе<sub>2</sub>Cl\* были проведены измерения люминесценции газовых смесей (Ar + N<sub>2</sub>) и (Хе + CCl<sub>4</sub>) оптимального состава при одинаковых условиях накачки и регистрации. Результаты представлены на рис. 4. Оказалось, что число фотонов, излучаемых



**Рис. 4.** Спектры люминесценции (Ar + N<sub>2</sub>) (а) и (Хе + CCl<sub>4</sub>) (b) газовых смесей оптимального состава при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 keV и длительностью 5 ns. Состав смеси: Ar — 1140 Torr, N<sub>2</sub> — 21 Torr (а); Хе — 760 Torr, CCl<sub>4</sub> — 50 mTorr (b).

эксимерной молекулой Xe<sub>2</sub>Cl\* в полосе 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г (Δλ = 400–600 nm), почти в 80 раз превышает число фотонов, излучаемых молекулой N<sub>2</sub> на переходе (μ = 0, ν' = 0) полосы C<sup>3</sup>Π<sub>u</sub>–B<sup>3</sup>Π<sub>g</sub> (λ<sub>max</sub> = 337.1 nm).

Генерационные эксперименты на переходах 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г эксимерной молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\* были выполнены с использованием газовой смеси Ar–Xe + CCl<sub>4</sub> высокого давления при накачке электронным пучком и <sup>3</sup>He–Xe–CCl<sub>4</sub> — при накачке продуктами нейтронной ядерной реакции <sup>3</sup>He(n, p)<sup>3</sup>T. Для накачки лазерного элемента нейтронным импульсом использовалась экзо-термическая нейтронная ядерная реакция



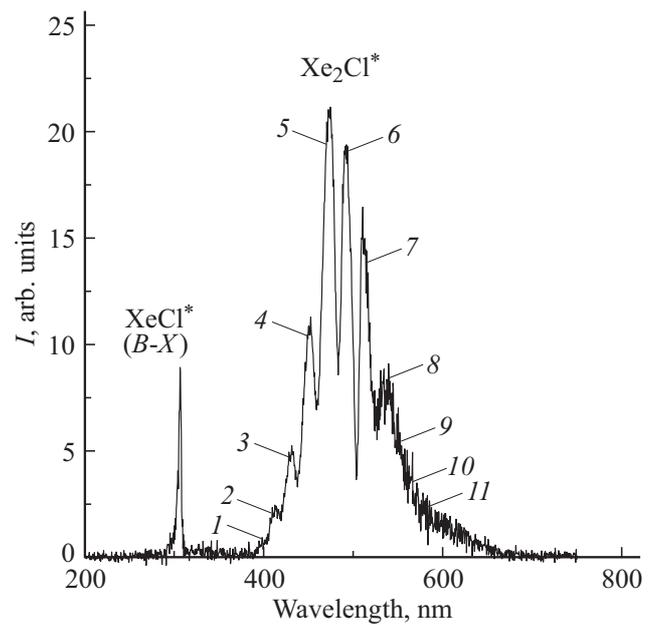
$$\sigma(E_n = 0.025 \text{ eV}) = 5.4 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2. \quad (7)$$

Сечение реакции имеет максимальную величину для тепловых нейтронов (E<sub>n</sub> = 0.025 eV) и сильно уменьшается с ростом энергии нейтронов. Энергия ядерной реакции (7), равная 0.78 MeV, распределяется между протоном (0.57 MeV) и тритоном (0.19 MeV) в виде их кинетической энергии.

В газовых смесях с низким содержанием молекул CCl<sub>4</sub> уже при небольших энергозкладах в газ наблюдается усиление излучения в полосе 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г эксимерной молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\*. Высокая эффективность образования молекул Xe<sub>2</sub>Cl\* в средах с низкой концентрацией CCl<sub>4</sub> объясняется свойствами трековой плазмы, создаваемой заряженными частицами высокой энергии. Из-за наличия в смеси электроотрицательного газа трековая плазма быстро становится безэлектронной вследствие эффективного прилипания электронов к молекулам CCl<sub>4</sub>. Поскольку плазмохимические процессы преобразования энергии в световое излучение протекают в пределах объема трека, оптимальная концентрация молекул донора CCl<sub>4</sub> не должна сильно превышать концентрацию электронов в треке, поскольку количество образовавшихся отрицательных ионов определяется имеющейся концентрацией электронов в треке. Избыток CCl<sub>4</sub> в смеси будет вызывать сильное тушение эксимерной люминесценции.

Генерационные эксперименты проводились с несколькими комплектами зеркал, различающихся коэффициентами пропускания, шириной и положением области максимального отражения. При накачке электронным пучком использовались широкополосные зеркала, имеющие коэффициент отражения 99.4 и 98.5% при 490 nm. Расстояние между зеркалами было равно 18 cm. Волоконный световод спектрометра MAYA 2000Pro размещался на оптической оси резонатора на расстоянии 200 mm от выходного зеркала. Спектрометр регистрировал излучение, проходящее через зеркало, при настроенном и расстроенном резонаторе.

Генерационные эксперименты с накачкой электронным пучком показали, что интенсивная широкая полоса

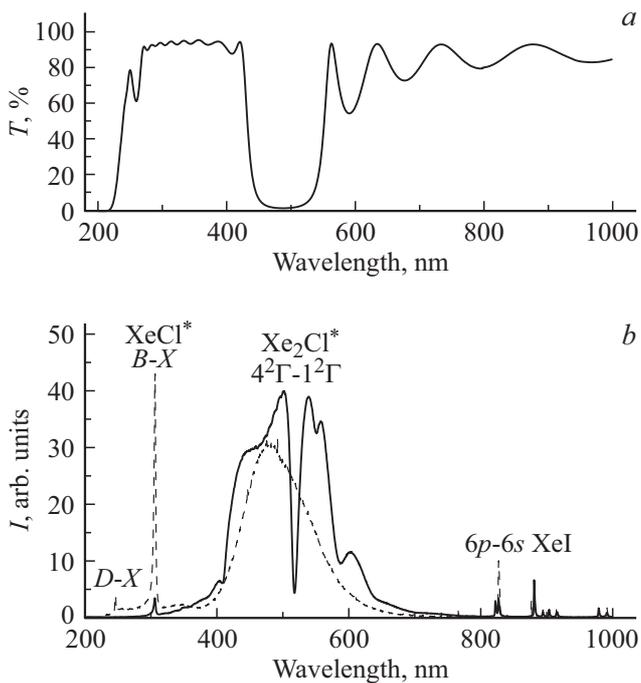


**Рис. 5.** Тонкая структура широкополосного континуума эксимерной молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\*. Представляет собой разностный спектр излучения газовой смеси Xe–CCl<sub>4</sub>, измеренный при настроенном и расстроенном резонаторах. Цифрами отмечены колебательные полосы, принадлежащие системам электронных переходов 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г и 2<sup>2</sup>B<sub>2</sub>–1<sup>2</sup>A<sub>1</sub>.

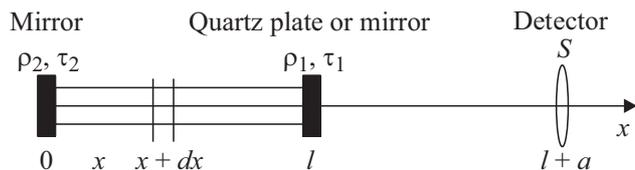
Структура широкополосного континуума (Δλ = 390–750 nm) эксимерной молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\*

Номер полосы, <i>i</i>	λ <sub>max</sub> , nm	Энергия кванта λ <sub>max</sub> , eV	ΔE = E <sub>i+1</sub> – E <sub>i</sub> , eV	Принадлежность
1	399	3.092	–	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
2	413	2.987	0.105	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
3	431	2.863	0.124	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
4	450.8	2.737	0.126	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
5	472	2.614	0.123	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
6	492	2.508	0.106	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
7	510.3	2.418	0.09	4 <sup>2</sup> Г–1 <sup>2</sup> Г
8	534.9	2.3069	–	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>
9	540.9	2.281	0.025	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>
10	551.7	2.236	0.045	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>
11	564	2.1863	0.05	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>
12	581.6	2.121	0.065	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>
13	603	2.046	0.075	2 <sup>2</sup> B <sub>2</sub> → 1 <sup>2</sup> A <sub>1</sub>

в интервале длин волн Δλ = 380–700 nm обладает сложной структурой, состоит по крайней мере из 7 колебательных полос, принадлежащих 4<sup>2</sup>Г–1<sup>2</sup>Г-переходам молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\* (рис. 5 и таблица), и содержит слабую полосу в длинноволновой части (Δλ = 500–700 nm), также состоящую из отдельных колебательных полос. Спектр



**Рис. 6.** Аппаратурные спектры спонтанного излучения газовой смеси  ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  для кюветы с оптическим резонатором (сплошная линия) и той же кюветы при замене выходного зеркала кварцевым окном (штрихи). Пропускание выходного зеркала на длине волн  $486\text{ nm}$   $T = 1.57\%$  и кварцевого окна около  $100\%$ . Спектры отнормированы по суммарной площади  $6p-6s$ -линий  $\text{XeI}$ . Возбуждение смеси производилось продуктами нейтронной ядерной реакции  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  при удельном энергокладе в газ  $5\text{ mJ/cm}^3$ . В верхней части рисунка (а) приведено пропускание выходного зеркала во всем измеряемом спектральном диапазоне.



**Рис. 7.** К расчету световых потоков, регистрируемых детектором, для кюветы с выходным кварцевым окном или узкополосным зеркалом.

(рис. 5) получен как разность генерационных спектров газовой смеси при настроенном и расстроенном резонаторе и позволяет видеть участки спектра люминесценции, где наблюдается стимулированное усиление светового сигнала. Видно, что усиление светового излучения происходит во всей широкой полосе  $\Delta\lambda = 380-700\text{ nm}$  на 8 колебательных переходах эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  (таблица) с максимальным усилением в области длин волн  $470-510\text{ nm}$ . Эквидистантное расположение полос  $1-7$  с расстоянием между ними  $\Delta E \sim 0.11\text{ eV}$  и полос  $8-13$  с расстоянием  $\Delta E \sim 0.06\text{ eV}$  указывает на их колебательный характер и принадлежность двум

разным электронным переходам эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*-4^2\Gamma-1^2\Gamma$  (полосы  $1-7$ ) и, вероятно,  $2^2B_2-1^2A_1$  (полосы  $8-13$ ).

Используя подход, описанный в работе [11], были выполнены измерения коэффициента усиления на длине волны  $486\text{ nm}$  при накачке газовой смеси  ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции при энергокладе в газ  $\sim 5\text{ mJ/cm}^3$ . Метод основан на сравнении светового излучения кюветы при настроенном резонаторе и при замене выходного зеркала кварцевым окном. В этом случае в резонаторе с отражением зеркал  $\sim 99.4\%$  (глухое) и  $98.5\%$  (выходное зеркало) в диапазоне длин волн  $480-550\text{ nm}$  наблюдалось почти 60-кратное усиление спонтанного излучения  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -полосы эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  ( $\lambda_{\text{max}} = 486\text{ nm}$ ) (рис. 6). (Пропускание выходного зеркала резонатора при  $490\text{ nm}$  составляло  $1.5\%$ , а кварцевого окна — около  $95\%$ . Записанные при этих условиях аппаратурные спектры (рис. 6) в этой области длин волн имеют сравнимые интенсивности.) Следует отметить, что настройка резонатора на длину волны  $486\text{ nm}$  оказывала влияние на интенсивность полос  $B-X$  и  $D-X$  молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda_{\text{max}} = 308$  и  $236\text{ nm}$ ), значительно уменьшая их интенсивность. Наиболее сильное ослабление наблюдалось для полосы  $B-X$  — почти в 20 раз. Приведенные спектры (рис. 6) взаимно нормированы на суммарную площадь  $6p-6s$ -линий  $\text{XeI}$ , характеризующую величину удельного энергоклада в газ при накачке газовой смеси.

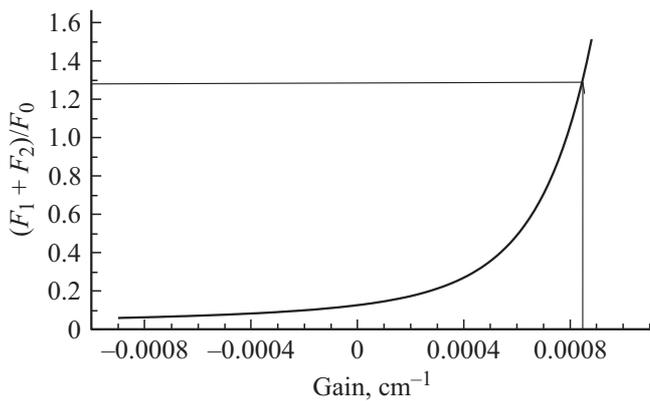
При отсутствии резонатора (кювета с одним окном и одним зеркалом) спектрометр MAYA-2000Pro регистрирует только световой поток  $F_0$ , который направлен в сторону выходного кварцевого окна кюветы (рис. 7):

$$F_0 = \int N_0/4\pi S/(l-x+a)^2 \exp[\mu(l-x)]dx + \int N_0/4\pi\rho_2 S/(l+x+a)^2 \exp[\mu(l+x)]dx. \quad (8)$$

Здесь  $N_0$  — мощность спонтанного излучения, приходящая на единицу длины кюветы;  $S$  — площадь фотоприемника;  $l$  — длина кюветы;  $a$  — расстояние от кюветы до фотоприемника;  $\mu$  — коэффициент усиления (или ослабления) светового излучения,  $\rho_2$  — коэффициент отражения заднего глухого зеркала.

При наличии резонатора вдоль оси кюветы будут распространяться в противоположных направлениях два световых потока, испытывающих многократные отражения от зеркал, и спектрометр регистрирует суммарный поток  $(F_1 + F_2)$ . Для прямого направления (с учетом телесного угла сбора света) световой поток  $F_1$  будет

$$F_1 = \tau_1 \sum \int N_0/4\pi(\rho_1\rho_2)^{i-1} S/(2il-x+a-l)^2 \times \exp(2i\mu l - \mu x - \mu l)dx, \quad (9)$$



**Рис. 8.** Сравнение результатов компьютерных расчетов величины  $(F_1 + F_2)/F_0$  с экспериментальными значениями. Расчеты проводились по формулам (7)–(9) для условий проведения эксперимента:  $l = 70$  см,  $a = 1800$  см,  $\rho_1 = 98.49\%$ ,  $\tau_1 = 1.51\%$ ,  $\rho_2 = 99.43\%$ ,  $\tau_2 = 0.57\%$ ,  $\lambda = 486$  нм при разных коэффициентах усиления активной среды:  $-0.001 \leq \mu \leq 0.001$ . На расчетной кривой отмечена точка, совпадающая с результатами измерений (рис. 6).

а для противоположного направления

$$F_2 = \tau_1 \sum \int N_0 / 4\pi (\rho_1^i \rho_2^{i-1}) S / (2il - x + a)^2 \times \exp(2i\mu l - \mu x) dx. \quad (10)$$

Здесь  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — коэффициенты пропускания и отражения переднего и заднего зеркал резонатора. В формулах (9) и (10) суммирование производится по  $i$  — номеру обхода резонатора от 1 до  $m$ , где  $m = 1/(\tau_1 + \tau_2)$  — максимально реализуемое число проходов резонатора из-за потерь на пропускание зеркал.

Отношение  $(F_1 + F_2)/F_0$  определяется только свойствами резонатора, геометрическими размерами установки и коэффициентом усиления (или ослабления) среды. На рис. 8 приведены результаты компьютерных расчетов величины  $(F_1 + F_2)/F_0$  в зависимости от величины коэффициента усиления (или ослабления)  $\mu$ . Расчеты проводились для конкретных условий проведения экспериментов при накачке продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции, а именно  $l = 70$  см,  $a = 1800$  см,  $\rho_1 = 98.49\%$ ,  $\rho_2 = 99.43\%$ ,  $\tau_1 = 1.51\%$ ,  $\tau_2 = 0.57\%$ ,  $m = 1/(\tau_1 + \tau_2) = 49$ . Сравнивая расчетные значения  $(F_1 + F_2)/F_0$  с результатами измерений отношения  $I_1/I_0$  суммарной интенсивности полосы  $\lambda = 492$  нм (рис. 8), измеренной спектрометром MAYA-2000Pro при наличии ( $I_1$ ) и при отсутствии ( $I_0$ ) резонатора, можно определить коэффициент усиления.

Из графика рис. 8 следует, что в плотной газовой смеси  ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  при накачке продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции при удельном энергокладе в газ  $\sim 5$  мДж/см<sup>3</sup> имеет место усиление излучения

$4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -перехода молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  ( $\lambda = 492$  нм) с коэффициентом усиления  $\mu = 8.2 \cdot 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>.

Поскольку  $\mu = \sigma \Delta N$ , то инверсная заселенность уровней  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -перехода  $\Delta N$  при этих условиях накачки будет равна

$$\Delta N = \mu / \sigma = 3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}. \quad (11)$$

Здесь  $\sigma = 2.64 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup> — сечение вынужденного испускания,  $\lambda = 4.86 \cdot 10^{-5}$  см,  $\Delta \lambda = 108$  нм. С учетом существенных различий в мощности накачки величина (11) согласуется с полученным в работе [12] значением  $\Delta N = 8 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

## Заключение

Проведенные эксперименты показали, что газовые смеси с низким содержанием донора  $\text{CCl}_4$  имеют высокую эффективность образования молекул  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$ . Световой выход газовых смесей ( $\text{Xe} + \text{CCl}_4$ ) в полосе ( $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ ) молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  почти в 80 раз превышает число фотонов, излучаемых молекулой  $\text{N}_2$  на переходе ( $\nu = 0, \nu' = 0$ ) полосы  $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$  ( $\lambda_{\text{max}} = 337.1$  нм) в смеси ( $\text{Ar} + \text{N}_2$ ) оптимального состава при одинаковых условиях накачки и регистрации. Полоса, излучаемая молекулой  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  в интервале длин волн  $\Delta \lambda = 380-700$  нм, обладает сложной структурой, состоит по крайней мере из 8 колебательных полос, принадлежащих  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -переходам молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}$ , и содержит слабую полосу в длинноволновой части ( $\Delta \lambda = 500-700$  нм). Сечение вынужденного испускания молекул  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  в смеси  $\text{Xe} + \text{CCl}_4$  с низким парциальным давлением  $\text{CCl}_4$  ( $\sim 50$  мТорр) имеет величину  $\sigma = 2.64 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup> и плотность энергии насыщения  $Q_s = h\nu/\sigma = 0.154$  Дж/см<sup>2</sup>. Добавки гелия к такой газовой смеси ( $P_{\text{Xe}} = 1520$  Торр,  $P_{\text{CCl}_4} = 0.036$  Торр) в количестве до 380 Торр не вызывают тушения молекулярной полосы ( $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ )  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  и не изменяют ее время высвечивания. При накачке газовой смеси  ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  продуктами ядерной реакции  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  при удельном энергокладе в газовую среду  $\sim 5$  мДж/см<sup>3</sup> в диапазоне длин волн 480–550 нм наблюдалось почти 60-кратное усиление спонтанного излучения  $4^2\Gamma-1^2\Gamma$ -полосы эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  ( $\lambda_{\text{max}} = 486$  нм) с коэффициентом усиления  $\mu = 8.2 \cdot 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>.

## Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Данилычев В.А., Долгих В.А., Керимов О.М., Молчанов А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 26. С. 16.
- [2] Tang K.Y., Lorents D.C., Huestis D.L. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. P. 347.
- [3] Tittel K.Y., Wilson W.L., Stickel R.E., Marowsky G., Ernst W.E. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. P. 405.
- [4] Marowsky G., Glass G.P., Tittel K.Y., Wilson W.L. // J. Chem. Phys. 1981. V. 75. N 3. P. 1153.

- [5] *Johnson T.H., Cartland H.E., Genoni T.C., Hunter A.M.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 12. P. 5707.
- [6] *Wadt W.R., Hay P.J.* // J. Chem. Phys. 1978. V. 68. P. 3850.
- [7] *Huestis D.L., Schlotter N.E.* // J. Chem. Phys. 1978. V. 69. P. 3100.
- [8] *Stevens W.J., Krauss M.* // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 3. P. 301.
- [9] *Миськевич А.И., Го Цзинь Бо.* // Квант. электрон. 2013. V. 43. С. 489. doi 10.1070/QE2013v043n05ABEH015022
- [10] *Yu Y.C., Watergaonkar S.J., Setser D.W.* // J. Chem. Phys. 1992. V. 96. P. 8914.
- [11] *Фриш С.Э.* // Спектроскопия газоразрядной плазмы. / Под ред. Фриш С.Э. Л.: Наука, 1970. С. 7.
- [12] *Tang K.Y., Lorents D.C., Huestis D.L.* // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 5. P. 347.