

П. МИЙДЛА, Э. ТАММЕ, А. ШЕРМАН

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА В СМЕСИ HCl/He/Ne

(Представил В. Хижняков)

## 1. Введение

В настоящее время эксимерные лазеры привлекают к себе повышенное внимание как источники ультрафиолетового излучения с высокими удельными характеристиками. Понятен поэтому интерес, проявляемый как к элементарным процессам, происходящим в их рабочих смесях, так и к численному моделированию этих систем. Вторая область исследований нацелена на оптимизацию и направленное изменение рабочих характеристик лазеров. Чисто экспериментально решить эту проблему крайне трудно из-за большого числа параметров, определяющих лазерный выход.

Обычно для сравнения модельных оценок с экспериментом используют временной ход напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и мощности генерации (см., напр. [1]). С началом работ по абсорбционному зондированию газового разряда в рабочей смеси ХеСl-лазера [2] появилась возможность более полного и непосредственного сравнения модельного расчета и эксперимента — дополнительно по временному поведению концентраций различных компонент газовой смеси. Такое всестороннее сравнение позволяет разумно скорректировать модель (подчеркнем, что константы ряда реакций, происходящих в разряде, определены с весьма низкой точностью), что делает прогнозирование более достоверным.

В данной работе развивается кинетическая модель газового разряда в смеси HCl/He/Ne, позволяющая по экспериментально определенной зависимости напряжения на разрядном промежутке от времени определить временное поведение концентраций компонент плазмы. Модель содержит систему кинетических уравнений для 13 компонент и уравнение Больцмана, определяющее функцию распределения электронов по энергиям. Приводятся результаты демонстрационного расчета для рабочей смеси ХеСl-лазера типа ЭЛИ (совместная разработка Института физики АН ЭССР и Специального конструкторского бюро АН ЭССР, HCl/He/Ne = 1/8/500, общее давление — 2 атм)<sup>1</sup>. Сравнение модельного расчета с экспериментом по абсорбционному зондированию будет проведено в следующей работе.

## 2. Описание модели

Модель описывает временное поведение 13 компонент (He, He\*, He<sup>+</sup>, Ne, Ne\*, Ne<sup>+</sup>, HCl, HCl(*v*), Cl<sup>-</sup>, *e*, ХеСl\*, Хе<sub>2</sub><sup>+</sup>, Хе<sub>2</sub><sup>\*</sup>) посредством ре-

<sup>1</sup> В расчете использована зависимость напряжения на разрядном промежутке от времени, полученная в [31].

шения системы 10 кинетических уравнений, учитывающих 3 закона сохранения — заряда и ядер He и Xe. Кинетические уравнения образуют с математической точки зрения т. н. жесткую систему обыкновенных дифференциальных уравнений, интегрирование которой требует использования специальных численных методов. Для решения данной задачи применялась стандартная подпрограмма DIFSUB, реализующая метод Гира [3]. Учитываемые реакции, их скоростные константы и литературные источники приведены в таблице.

№	Реакция	Скорость	Литература
1	$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^* + e$	$k_1$	[4-6]
2	$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$	$k_2$	[7]
3	$e + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + e$	$k_3$	[8]
4	$e + \text{He} \rightarrow \text{He}^+ + 2e$	$k_4$	[9, 10]
5	$e + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$	$k_5$	[11]
6	$e + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + 2e$	$k_6$	[9]
7	$e + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe} + e$	$k_7$	
8	$e + \text{He}^* \rightarrow \text{He} + e$	$k_8$	
9	$e + \text{HCl} \rightarrow \text{HCl}(v) + e$	$k_9 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[12]
10	$e + \text{HCl} \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$k_{10} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ ,,}$	[12]
11	$e + \text{HCl}(v) \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$k_{11} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ ,,}$	[13]
12	$\text{Xe}^* + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{Xe} + e$	$k_{12} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ ,,}$	[14]
13	$\text{Xe}^* + \text{HCl}(v) \rightarrow \text{Xe} + \text{H} + \text{Cl}$	$k_{13} = 5,6 \cdot 10^{-10} \text{ ,,}$	см. текст
14	$\text{Xe}^* + \text{HCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{H} + \text{Cl}$	$k_{14} = 5,6 \cdot 10^{-10} \text{ ,,}$	[15]
15	$\text{Xe}^+ + \text{Xe} + \text{He} \rightarrow \text{Xe}_2^+ + \text{He}$	$k_{15} = 1,1 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[16]
16	$\text{Xe}_2^+ + e \rightarrow \text{Xe}^* + \text{Xe}$	$k_{16} = 1,4 \cdot 10^{-6} (T_e/300)^{-0,5} \text{ см}^3/\text{с}$	[16]
17	$\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe}$	$k_{17} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ ,,}$	[17, 18], см. текст
18	$\text{He}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{He} + \text{Xe}^+ + e$	$k_{18} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ ,,}$	см. текст
19	$\text{Xe}^* + 2\text{Xe} \rightarrow \text{Xe}_2^* + \text{Xe}$	$k_{19} = 4 \cdot 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[16]
20	$\text{Xe}^* + \text{Xe} + \text{He} \rightarrow \text{Xe}_2^* + \text{He}$	$k_{20} = 1,4 \cdot 10^{-32} \text{ ,,}$	[16]
21	$\text{Xe}_2^* \rightarrow 2\text{Xe} + hv'$	$k_{21} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1} \text{ ,,}$	[14]
22	$\text{Xe}^+ + 2\text{Xe} \rightarrow \text{Xe}_2^+ + \text{Xe}$	$k_{22} = 2 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[16]
23	$\text{Xe}_2^* + \text{Xe}_2^* \rightarrow \text{Xe}_2^+ + 2\text{Xe} + e$	$k_{23} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[19]
24	$\text{Xe}_2^* + e \rightarrow 2\text{Xe} + e$	$k_{24} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ ,,}$	[19]
25	$\text{Xe}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^*$	$k_{25} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ ,,}$	[17, 18], см. текст
26	$\text{Xe}^* + \text{HCl}(v) \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{H}$	$k_{26} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ ,,}$	[20]
27	$\text{XeCl}^* + \text{HCl}(v) \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{HCl}$	$k_{27} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ ,,}$	см. текст
28	$\text{XeCl}^* + \text{He} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{He}$	$k_{28} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ ,,}$	,,
29	$\text{XeCl}^* + \text{Xe} \rightarrow 2\text{Xe} + \text{Cl}$	$k_{29} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ ,,}$	[14]
30	$\text{XeCl}^* + \text{HCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{HCl}$	$k_{30} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ ,,}$	[14]
31	$\text{XeCl}^* + e \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + e$	$k_{31} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ,,}$	[19]
32	$\text{XeCl}^* \rightarrow \text{XeCl}(X) + hv$	$k_{32} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$	[21]
33	$\text{Xe}^+ + e + e \rightarrow \text{Xe}^* + e$	$k_{33} = 7 \cdot 10^{-20} (T_e/300)^{-4,5} \text{ см}^6/\text{с}$	см. текст
34	$\text{He}^+ + e + e \rightarrow \text{He}^* + e$	$k_{34} = 7 \cdot 10^{-20} (T_e/300)^{-4,5} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]

$T_e$  — средняя по распределению энергия электронов, К.

Символами  $\text{Xe}^*$  и  $\text{He}^*$  обозначены нижние метастабильные состояния Xe и He ( $^3P_2$ ,  $^3P_0$  и  $^3S_1$ ,  $^1S_0$  соответственно). При вычислении констант реакций возбуждения атомов в метастабильные состояния электронным ударом (реакции 1, 3 в таблице) и девозбуждения (реакции 7, 8) используются суммарные по обоим состояниям сечения реакций с учетом каскадных процессов. Эти же сечения используются в уравнении Больцмана (см. ниже). Символом  $\text{HCl}(v)$  обозначено первое колебательно возбужденное состояние HCl. Более высокие колебательные состояния не принимаются во внимание, поскольку, согласно результатам [13], они дают малый вклад в лазерную кинетику. Константы реакций 13, 27, 33 приняты равными константам реакций 14, 30 и 34 соответственно. В связи с реакциями 33 и 34 ударно-радиационной рекомбинации

отметим, что, как утверждается в [22], скорость этих реакций мало чувствительна к виду однозарядного иона. Как показывают оценки, лишь реакции рекомбинации атомарных ионов этого типа могут быть существенными в сравнительно коротких разрядах (длительностью  $\leq 100$  нс), рассматриваемых в данной статье, в особенности в тех временных интервалах, в которых напряжение на разрядном промежутке мало и  $T_e \approx 300$  К. Константы реакций 18 и 28 приняты равными константам соответствующих реакций с Ne [13, 14]. Константы реакций 17, 25 трехчастичной рекомбинации вычислены для рассматриваемой концентрации Ne на основе теории [17] с использованием поляризуемости атома Ne из [18]. Символом  $\text{XeCl}^*$  обозначена смесь *B*- и *C*-состояний эксимера  $\text{XeCl}^*$ , имеющая эффективное радиационное время жизни 40 нс (см. [21] и ссылки там; реакция 32). По имеющимся данным [21], характерные времена колебательной релаксации в *B*- и *C*-состояниях, *B*-*C*-смешивания и диссоциации в *X*-состоянии в рассматриваемых смесях значительно меньше характерного времени разряда (5—10 нс). Поэтому мы считали, что указанные процессы происходят мгновенно. В модели не учитываются компоненты  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{He}_2^*$  и  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$ , поскольку их концентрация и влияние на кинетику, по нашим оценкам, пренебрежимо малы для рассматриваемых коротких разрядов. Трехатомный эксимер  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  может играть существенную роль в поглощении лазерного излучения  $\lambda = 308$  нм в более длинных разрядах. Мы пренебрегаем разогревом газовой смеси, полагая температуру тяжелых компонент равной 300 К. Константы реакций, приведенные в таблице, отвечают этой температуре.

Преионизация моделируется стационарным источником электронов и ионов  $\text{Xe}^+$ , включающимся в момент возникновения напряжения на электродах. Его производительность, оцененная нами по свечению  $\text{XeCl}^*$ , лежит в пределах  $q = 10^{16} - 10^{18}$  электронов (ионов)/см<sup>3</sup>с.

Функция распределения электронов по энергиям в рассматриваемом газовом разряде может существенно отличаться от больцмановской (см., напр., [23]). Поэтому для определения скоростных коэффициентов  $k_1 - k_8$  и температуры электронов  $T_e$ , фигурирующей в коэффициентах  $k_{16}$ ,  $k_{33}$ ,  $k_{34}$ , необходимо в ходе работы программы время от времени обращаться к подпрограмме решения уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям. При составлении этой подпрограммы мы воспользовались разностным методом, предложенным в [24] (см. также [25]) для решения стационарного уравнения Больцмана (отметим, что время релаксации функции распределения электронов в рассматриваемой газовой смеси значительно меньше характерного времени разряда [23]). Использувавшееся нами разностное уравнение несколько отличается от приведенного в [24]. Проведенные изменения позволяют сократить ошибку дискретизации. Уравнение имеет вид:

$$(A_l - B_l)f(u_{l-1}) = (A_l + A_{l+1})f(u_l) - (A_{l+1} + B_{l+2})f(u_{l+1}) - S_l,$$

$$A_l = \frac{E^2}{3(\Delta u)^2} \cdot \frac{u_l - \Delta u/2}{Q_{1m}(u_l - \Delta u/2)} + \frac{2mkT}{e} \left( \frac{u_l - \Delta u/2}{\Delta u} \right)^2 Q_{2m}(u_l - \Delta u/2),$$

$$B_l = \frac{m}{\Delta u} u_{l-1}^2 Q_{2m}(u_{l-1}).$$
(1)

Здесь  $f(u)$  — нормированная на единицу ( $\int_0^\infty u^{1/2} f(u) du = 1$ ) функция распределения электронов по энергиям  $u$ , выраженным в эВ;  $f(u_l)$  — ее значение при  $u_l = l\Delta u$  ( $f(u)$  определяется в интервале 0—50 эВ,  $f(u) = 0$  при  $u \geq 50$ );  $\Delta u$  — постоянная по интервалу длина шага (чтобы

вычислить коэффициенты  $k_1-k_8$  с относительной погрешностью 5%, в нашей программе используются длины шага от 1/4 до 1/40 эВ);  $E$  — напряженность поля в разрядном промежутке;  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона;  $T$  — температура газа ( $=300$  К);  $Q_{1m}(u) = N_{\text{He}}Q_{m,\text{He}}(u) + N_{\text{Xe}}Q_{m,\text{Xe}}(u)$ ,  $Q_{2m}(u) = N_{\text{He}}Q_{m,\text{He}}(u)/M_{\text{He}} + N_{\text{Xe}}Q_{m,\text{Xe}}(u)/M_{\text{Xe}}$ ,  $N_{\text{He}}$ ,  $N_{\text{Xe}}$ ,  $M_{\text{He}}$ ,  $M_{\text{Xe}}$  — концентрации и массы атомов соответствующих компонент;  $Q_{m,\text{He}}$ ,  $Q_{m,\text{Xe}}$  — сечения упругих столкновений электронов с He и Xe (взяты из [26] и [27] соответственно);

$$S_i = \sum_{j=1}^6 [j] [(u_l+u_j)f(u_l+u_j)Q_j(u_l+u_j) - u_l f(u_l)Q_j(u_l)] + \\ + \frac{1}{g_{\text{Xe}}} u_l f(u_l - u_1) Q_1(u_l) [\text{Xe}^*] - \frac{1}{g_{\text{Xe}}} (u_l+u_1)f(u_l)Q_1(u_l+u_1) [\text{Xe}^*] + \\ + \frac{1}{g_{\text{He}}} u_l f(u_l - u_3) Q_3(u_l) [\text{He}^*] - \frac{1}{g_{\text{He}}} (u_l+u_3)f(u_l)Q_3(u_l+u_3) [\text{He}^*]; \quad (2)$$

$u_j$  — пороговые энергии реакций 1–6;  $[j]$  — концентрации Xe при  $j=1, 2$ , He при  $j=3, 4$ ,  $\text{Xe}^*$  при  $j=5$ ,  $\text{He}^*$  при  $j=6$ ;  $Q_j$  — сечения соответствующих реакций (литературные источники, по которым определялись эти сечения, приведены в таблице);  $g_{\text{Xe}}$  и  $g_{\text{He}}$  — кратности вырождения состояний  $\text{Xe}^*$  и  $\text{He}^*$ . В (2) использован принцип детального равновесия, согласно которому сечения сверхупругих процессов  $Q_{-i}$  (реакции 7, 8) связаны с сечениями неупругих процессов  $Q_i$  (1, 3) соотношением [28]

$$Q_{-i}(u) = \frac{1}{g} \frac{u+u_i}{u} Q_i(u+u_i);$$

$g$  — кратность вырождения возбужденного состояния;  $u_i$  — порог прямого процесса.

Из вида уравнений (1), (2) следует, что в уравнении Больцмана учитываются процессы упругих, неупругих и сверхупругих столкновений электронов с атомами Xe и He в основном и возбужденном состояниях. Мы пренебрегаем влиянием на функцию распределения электронов электрон-электронных столкновений, диссоциативного прилипания и ударно-радиационной рекомбинации. Два последних упрощения основываются на результатах [29]; возможность пренебрежения электрон-электронными столкновениями требует дополнительной проверки. Поле в разрядном промежутке предполагается однородным.

Сечения  $Q_j(u)$ ,  $Q_{m,\text{He}}(u)$  и  $Q_{m,\text{Xe}}(u)$  вводились в память ЭВМ в виде массивов, содержащих значения сечений на определенном множестве точек  $u$ . При необходимости получить значение сечения в промежутке между базисными точками использовалась линейная интерполяция (точки выбирались таким образом, чтобы интерполяция вносила минимальную ошибку).

Находя (с помощью итерационной схемы, близкой к описанной в [24]) функцию распределения электронов, можем обычным образом определить константы реакций 1–8. Проверка показала, однако, что к подпрограмме решения уравнения Больцмана (1), требующей значительных затрат времени, можно обращаться лишь в те моменты, когда хотя бы одна из концентраций метастабилей  $[\text{Xe}^*]$ ,  $[\text{He}^*] \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Если же эти концентрации меньше  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , величины констант, подвижности и температуры электронов в пределах требуемой точности совпадают со своими значениями при  $[\text{Xe}^*] = [\text{He}^*] = 0$ . Последние можно затабулировать в памяти ЭВМ и использовать во время счета при

выполнении условий  $[Xe^*], [He^*] < 10^{14} \text{ см}^{-3}$  не обращаясь к подпрограмме решения уравнения Больцмана. В нашем случае этот прием сократил время счета примерно вдвое. На рис. 1 показаны зависимости констант реакций 1—4 от  $E/N$  ( $N$  — полная концентрация атомов и молекул), вычисленные с помощью подпрограммы решения уравнения Больцмана при  $[Xe^*] = [He^*] = 0$ .

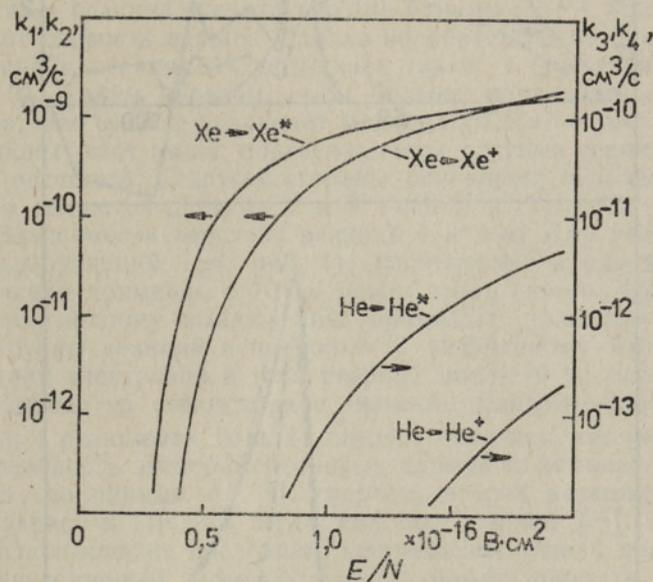


Рис. 1. Зависимости констант реакций 1—4 от  $E/N$ , вычисленные при  $[Xe^*] = [He^*] = 0$ .

Таким образом, алгоритм вычисления временного поведения концентраций компонент выглядит следующим образом. По введенной в память ЭВМ зависимости  $E(t)$  (она также задается в виде массива с линейной интерполяцией между базисными точками) определяется напряженность поля в разрядном промежутке в данный момент. Затем, в зависимости от достигнутых концентраций  $Xe^*$  и  $He^*$  программа обращается либо к затабулированным зависимостям  $k_i(E/N)$ ,  $i = 1, \dots, 8$ ,  $T_e = (E/N)$ ,  $j/[e](E/N)$  ( $j$  — плотность тока разряда,  $[e]$  — концентрация электронов), либо к подпрограмме решения уравнения Больцмана, определяющей те же величины. С помощью полученных величин  $k_i$  производится один или несколько (при использовании подпрограммы, в зависимости от величины задаваемого управляющего параметра) шагов решения системы кинетических уравнений. Для нового значения времени определяется значение  $E$  и цикл повторяется.

### 3. Результаты и обсуждение

Поведение во времени концентраций некоторых компонент, плотности тока разряда  $j$  и температуры электронов показано на рис. 2. На этом же рисунке приведена использовавшаяся при расчете экспериментально определенная зависимость напряженности поля в разрядном промежутке от времени. Производительность источника предионизации при-

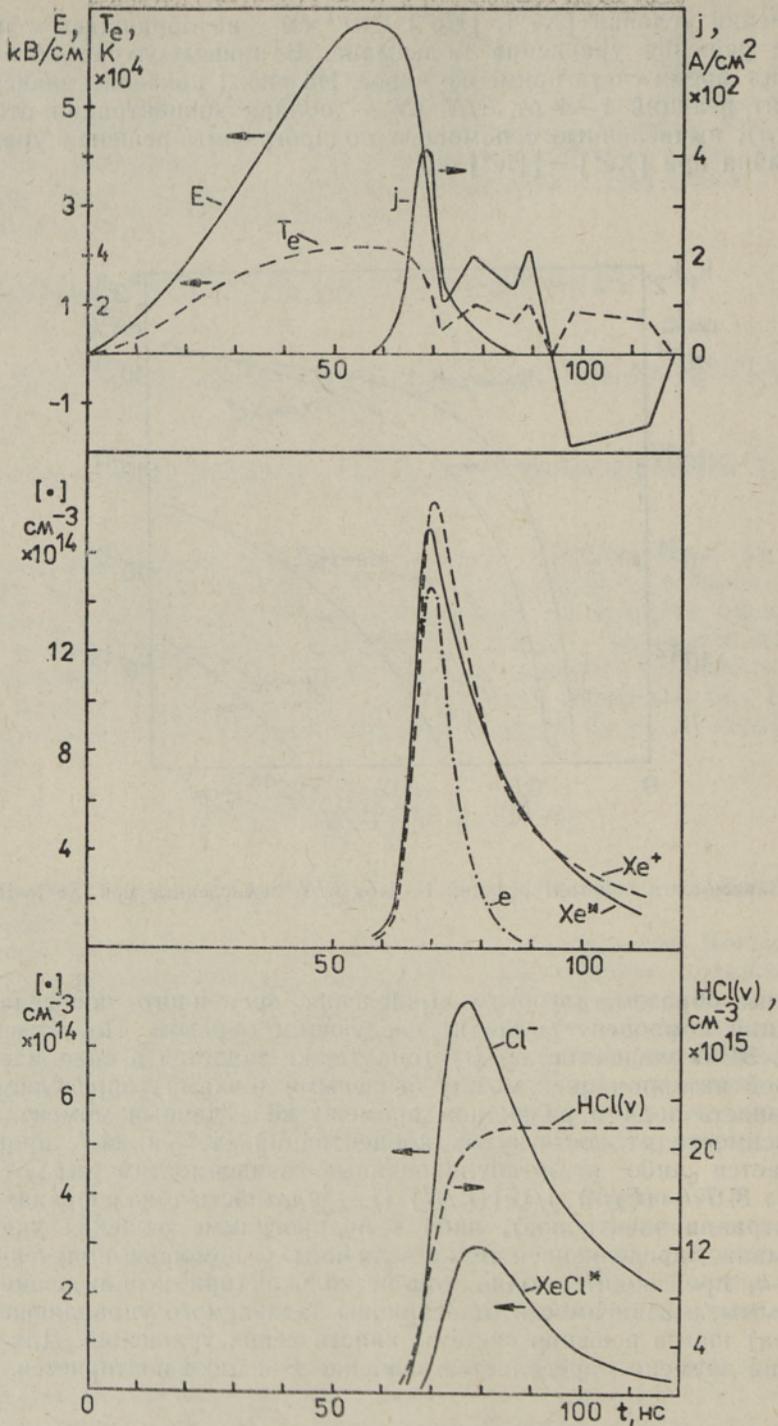


Рис. 2. Результаты демонстрационного расчета. Поведение во времени концентраций некоторых компонент, плотности тока разряда  $j$  и температуры электронов  $T_e$ . Используемая в расчете зависимость напряженности поля в разрядном промежутке от времени показана на верхней части рисунка.  $\text{HCl}/\text{Xe}/\text{He} = 1/8/500$ ,  $p = 2$  атм, производительность источника предионизации  $q = 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

нята равной  $10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Время счета (CPU) на ЭВМ ЕС-1060 2 мин 20 сек.

Прежде всего обращает на себя внимание сравнительно малая длительность тока разряда — он существует практически лишь в интервале от 60 до 80 нс. Как следует из рисунка, это связано с быстрым падением концентрации электронов в разряде после 70 нс. Последнее обусловлено двумя причинами. Основным каналом гибели электронов являются реакции 10 и 11 диссоциативного прилипания, причем скорость второй из этих реакций значительно (по данным [12, 13], на два порядка) превосходит скорость первой. Однако колебательно возбужденный HCl, участвующий в реакции 11, возникает также с участием электронов (реакция 9). Таким образом, чем больше начальная концентрация электронов, тем больше возникает молекул HCl( $v$ ) и тем быстрее гибнут электроны (этот вывод подтверждается другими сериями проведенных нами расчетов). С другой стороны, основными каналами рождения электронов являются реакции 2 и 5 прямой и ступенчатой ионизации ксенона. Зависимости констант реакций 1 и 2 от  $E/N$  имеют характер ступенчатых функций (см. рис. 1). Напряжение в разрядном промежутке начиная примерно с 70 нс лежит ниже порога, что приводит к практически полному выключению процессов рождения электронов. Эти две группы реакций и приводят к полученному быстрому спаду концентрации электронов и тока разряда после 70 нс, что проявляется также в выходе на стационарное значение концентрации HCl( $v$ ).

В связи с реакциями 10 и 11 следует отметить, что имеется значительный разброс в экспериментальных данных по их скоростям. Как уже отмечалось, по данным [12, 13], скорость второй реакции превосходит скорость первой в 110 раз, тогда как, по данным [30], менее чем в 40 раз. Использование последнего соотношения между константами не изменит качественных выводов, однако, может привести к значительным количественным изменениям. В последующем, сравнивая расчеты с результатами экспериментов по абсорбционному зондированию плазмы разряда [2], мы попытаемся установить, какое из соотношений лучше описывает наблюдаемые результаты.

В условиях рассматриваемого разряда основной вклад в образование эксимеров  $\text{XeCl}^*$  дает механизм ион-ионной рекомбинации (реакция 25). Гарпунная реакция 26 вносит заметный вклад лишь в начальных и конечных стадиях разряда. Основными процессами тушения  $\text{XeCl}^*$  являются реакции 27 и 30.

Несмотря на демонстрационный характер проведенных расчетов, можно уже сейчас сделать некоторые предварительные заключения о недостатках данного разряда в газовой смеси, рассматриваемой в качестве рабочей среды XeCl-лазера. Прежде всего отметим малый временной интервал (примерно с 60 по 80 нс), в течение которого происходит передача энергии от цепи питания к газовой смеси. Это, как отмечалось выше, связано с чрезвычайно быстрым падением напряжения на разрядном промежутке в интервале между 60 и 70 нс, после которого оно уже не поднимается до величин, достаточных для ионизации ксенона. Можно, следовательно, сделать вывод о необходимости проведения оптимизации как цепи питания, так и газовой смеси лазера, что осуществимо на основе развитой модели. Отметим также, что максимум концентрации эксимеров  $\text{XeCl}^*$  почти совпадает с максимумом  $\text{Cl}^-$  — основного поглотителя лазерного излучения  $\lambda=308 \text{ нм}$ . Проведенные нами исследования показали, что варьированием величины напряжения на разрядном промежутке (без изменения вида зависимости  $E(t)$ ) и производительности источника предионизации можно значительно сместить положение одного максимума относительно другого. Это приведет к изменению формы генерируемого импульса излучения и увеличению его

длительности. Увеличение производительности источника предионизации и напряжения на разрядном промежутке дает значительный рост концентрации  $\text{XeCl}^*$ .

Авторы признательны В. Пеэту и А. Трещалову за полезное обсуждение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Greene, A. E., Brau, Ch. A. IEEE J. Quant. Electron., **QE-14**, № 12, 951—957 (1978).
2. Peet, V. E., Tsarenko, S. A., Sorkina, R. A., Treshchalov, A. B. 3rd Symp. Optical Spectroscopy. Abstracts of Invited Lectures and Posters. Reinhardsbryunn, GDR, 1984, 32.
3. Gear, C. W. Commun ACM, **14**, № 3, 176—179 (1971); Математическое обеспечение ЕС ЭВМ, вып. 22. Минск, 1980, 129—134.
4. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Высикайло Ф. И., Кирюхин Ю. Б., Кочетов И. В., Мамонов С. Г., Певгов В. Г., Письменный В. Д., Степанов Ю. Ю., Христофоров О. Б. Препринт ИАЭ-3080. М., 1979.
5. Коротков А. И. Тр. Моск. энергетического ин-та, № 589, 57—64 (1982).
6. Schaper, M., Scheibner, H. Beitr. Plasmaphys., **9**, 45—57 (1969).
7. Rapp, D., Englander-Golden, P. J. Chem. Phys., **43**, № 5, 1464—1479 (1965).
8. Borst, W. Z. Phys. Rev., **A9**, № 3, 1195—1200 (1974).
9. Vriens, L. Phys. Lett., **8**, № 4, 260—261 (1964).
10. Lowke, J. J., Phelps, A. V., Irwin, B. W. J. Appl. Phys., **44**, № 10, 4664—4671 (1973).
11. Ton-That, D., Flannery, M. R. Phys. Rev., **A15**, № 2, 517—526 (1977).
12. Nighan, W. L., Brown, R. T. Appl. Phys. Lett., **36**, № 7, 498—500 (1980).
13. Levin, L. A., Moody, S. E., Klosterman, E. L., Center, R. E., Ewing J. J. IEEE J. Quant. Electron., **QE-17**, № 12, 2282—2289 (1981).
14. Maeda, M., Takahashi, A., Mizunami, T., Miyazoe, Y. Jap. J. Appl. Phys., **21**, № 8, 1161—1169 (1982).
15. Kolts, J. H., Velazco, J. E., Setser, D. W. J. Chem. Phys., **71**, № 3, 1247—1263 (1979).
16. Брау Ч. В кн.: Эксимерные лазеры (ред. Ч. Роудз). М., «Мир», 1981, 118—172.
17. Flannery, M. R., Yang, T. P. Appl. Phys. Lett., **32**, № 5, 327—329 (1978).
18. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М., «Атомиздат», 1980.
19. Kannari, F., Suda, A., Obara, M., Fujioka, T. IEEE J. Quant. Electron., **QE-19**, № 10, 1587—1600 (1983).
20. Chang, R. S. F. J. Chem. Phys., **76**, № 6, 2943—2948 (1982).
21. Corkum, P. B., Taylor, R. S. IEEE J. Quant. Electron., **QE-18**, № 11, 1962—1975 (1982).
22. Бионди М. А. В кн.: Плазма в лазерах (ред. Дж. Бекефи). М., «Энергониздат», 1982, 145—176.
23. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М., «Мир», 1981.
24. Johnson, T. H., Palumbo, L. J., Hunter II., A. M. IEEE J. Quant. Electron., **QE-15**, № 5, 298—301 (1979).
25. Арасланов Ш. Ф. В кн.: Исследования по физической газовой динамике. Казань, Изд. Казанского ун-та, 1983, 80—91.
26. Frost, L. S., Phelps, A. V. Phys. Rev., **136**, № 6A, A1538—A1545 (1964).
27. Hoffmann, C. R., Skarsgard, H. M. Phys. Rev., **178**, № 1, 168—175 (1969).
28. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. М., «Наука», 1972.
29. Long, Jr., W. H. Appl. Phys. Lett., **31**, № 5, 391—394 (1977).
30. Allan, M., Wong, S. F. J. Chem. Phys., **74**, № 3, 1687—1691 (1981).
31. Лаан М. Р., Тийрик А. К. Тез. докл. II Всесоюз. совещ. по физике электрического пробоя газов. Тарту, 1984, 387—389.

Институт физики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
4/1 1985



### HCl/Xe/He GAASISEGUS TOIMUVA LAHENDUSE MODELLEERIMINE

On välja töötatud kineetiline mudel HCl/Xe/He segus toimuva gaaslahenduse kirjeldamiseks. Mudel sisaldab kineetiliste võrrandite süsteemi plasma 13 komponendi ja Boltzmanni võrrandi elektronide energeetilise jaotumise jaoks, mis võimaldavad lahenduse vahemikus antud välja tugevuse ajalise sõltuvuse alusel määrata komponentide kontsentratsiooni, lahendusvoolu ja elektronide temperatuuri ajalise käitumise. On esitatud näitliku arvutuse tulemused ELI tüüpi XeCl laseri gaasisegu jaoks.

### A KINETIC MODEL FOR THE DISCHARGE IN THE HCl/Xe/He GAS MIXTURE

The discharge in the HCl/Xe/He gas mixture is described by the system of kinetic equations for 13 plasma species and the Boltzmann equation determining the electron energy distribution function. The model determines temporal behaviour of the species concentrations, discharge current and electron temperature for a given temporal behaviour of the field intensity in the discharge. The results are presented for the gas mixture of ELI-type XeCl laser.