

В.В. Лисенков, В.В. Осипов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ ХеF- И ХеCl-ЛАЗЕРОВ, НАКАЧИВАЕМЫХ ИМПУЛЬСОМ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Проводится численное моделирование кинетики активных сред ХеF- и ХеCl-лазеров, накачиваемых электронным пучком с длительностью импульса 20 – 100 мкс и удельной мощностью 2 – 20 кВт/см³.

Известно, что эксимерные ХеF- и ХеCl-лазеры эффективно работают при накачке достаточно короткими (десятки и сотни наносекунд) и мощными (сотни киловатт и единицы мегаватт на сантиметр в кубе) импульсами. Лишь в немногих работах длительность импульса накачки была несколько микросекунд.

Однако для ряда практических задач представляет интерес исследовать работу эксимерных лазеров при удельной мощности накачки 1 – 10 кВт/см³ и длительности импульса 10 – 100 мкс. Такой режим накачки можно осуществить только жестким ионизатором, в частности электронным пучком.

Существует целый ряд работ [4, 5, 7], где представлены достаточно подробные численные модели ХеF- и ХеCl-лазеров, накачиваемых электронным пучком. Однако длительность импульсов накачки в них также ~1 мкс.

В настоящей статье проводится численное моделирование кинетики активных сред ХеF- и ХеCl-лазеров, накачиваемых электронным пучком с длительностью импульса 20 – 100 мкс и удельной мощностью 2 – 20 кВт/см³.

Описание модели

Для рассмотрения были выбраны газовые смеси Ne, Хе, NF₃ для ХеF-лазера и Ne, Хе, HCl для ХеCl-лазера, поскольку они обеспечивают наиболее высокую эффективность данных лазеров [2, 7]. Давление в обоих случаях равнялось 3 атм.

Модель включала в себя систему балансных уравнений для компонент активной среды. Она решалась методом Розенброка третьего порядка точности [1]. Для определения констант ряда реакций с участием электронов решалось уравнение Больцмана [7].

В модели было использовано несколько десятков плазмохимических реакций, константы которых взяты из литературы [3 – 7]. Воздействие электронного пучка на газовую среду моделировалось введением частот возбуждения и ионизации [5].

Результаты расчетов

В активных средах ХеF- и ХеCl-лазеров протекает большое количество плазмохимических процессов. Однако определяющее влияние на заселение верхнего лазерного уровня оказывают лишь некоторые из них: ионизация, передача заряда ксенонсодержащим ионом, диссоциативное прилипание с образованием отрицательного иона галогена, ион-ионная рекомбинация между Хе⁺ Хе₂⁺ и F⁻ или Cl⁻, являющаяся основным механизмом образования соответственно молекул ХеF(B) или ХеCl(B), т.е. верхнего лазерного уровня. Процессы в обеих средах схожи. Различие заключается в том, что диссоциативное прилипание к HCl в отличие от NF₃ происходит не из основного, а из возбужденного состояния (HCl(v)), поэтому для эффективного образования ХеCl(b) необходимо наличие достаточного количества (HCl(v)). Требуемым на это временем объясняется задержка роста коэффициента усиления ХеCl среды по сравнению с ХеF (рис. 1).

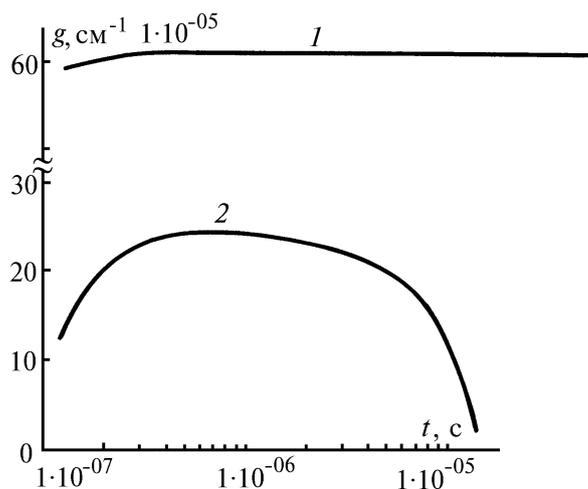


Рис. 1. Зависимости коэффициентов усиления от времени при удельной мощности накачки 5 кВт/см^3 :
1 – XeF-среда, 2 – XeCl-среда

Как уже упоминалось, основным механизмом накачки эксимерных лазеров является ионно-ионная рекомбинация. Поэтому состав рабочей смеси должен обеспечивать максимальную активизацию этого механизма. Одним из необходимых условий его осуществления является передача заряда ксенонсодержащим ионам. Ясно, что для увеличения скорости этого процесса необходимо повышать концентрацию ксенона, однако его избыток увеличивает как скорость дезактивации верхнего лазерного уровня, так и концентрацию иона Xe_2^+ , являющегося поглотителем лазерного излучения. Следовательно, существует оптимальная концентрация ксенона, при которой коэффициент усиления g имеет наибольшее значение. Зависимость оптимальной концентрации ксенона от удельной мощности накачки представлена на рис. 2.

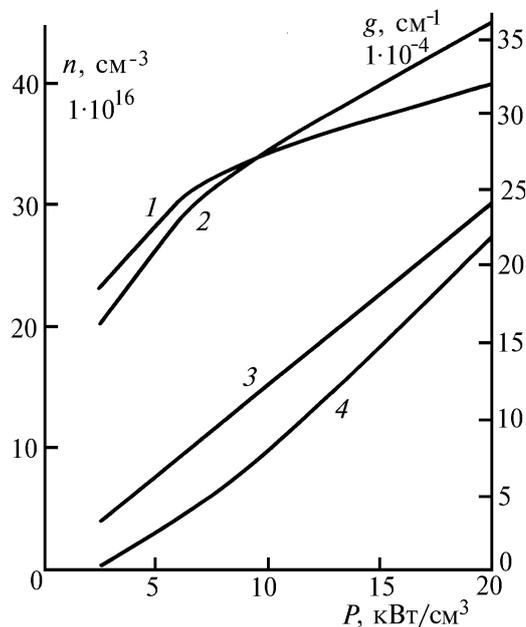


Рис. 2. Зависимости оптимальной концентрации ксенона (1, 2) и коэффициента усиления активной среды (3, 4) от удельной мощности накачки: 1, 3 – XeF-среда; 2, 4 – XeCl-среда

Рост оптимальной концентрации ксенона с ростом мощности накачки объясняется необходимостью увеличить скорость передачи заряда к ксенонсодержащим ионам. Концентрация донора галогена должна быть такой, чтобы обеспечить скорость образования ионов F^- и Cl^- ,
1576

примерно равную скорости передачи заряда ксенонсодержащим ионам. Эта концентрация составляет примерно 1/5 от концентрации ксенона.

Наличие отрицательных ионов является необходимым условием образования молекул ХеF(b) или ХеCl(b). Ион Cl⁻ в отличие от F⁻ является сильным поглотителем рабочего излучения. Именно поглощением на Cl⁻ объясняется более низкий коэффициент усиления ХеCl среды при одинаковой удельной мощности накачки. Однако с ее увеличением разница в коэффициентах усиления становится меньше (см. рис. 2).

Важным фактором, влияющим на характеристики активной среды, является деградация рабочей смеси. Разложение донора галогена – это необходимое условие образования эксимерной молекулы. Поэтому работа эксимерного лазера возможна лишь при наличии достаточного количества донора галогена. Однако в течение импульса происходит постоянное уменьшение его концентрации. Следовательно, необходимо выяснить степень этого уменьшения и то, как оно скажется на характеристиках активной среды. На рис. 3 приведены зависимости концентрации NF₃ и HCl, а также F₂- и Cl₂-продуктов разложения доноров галогена, являющихся поглотителями рабочего излучения.

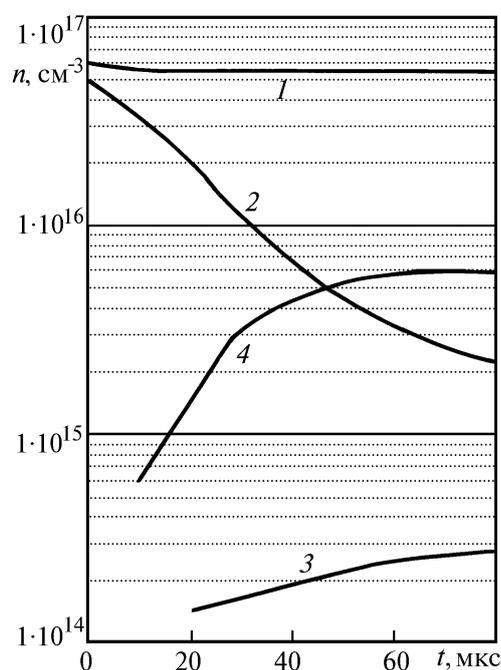
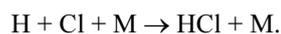


Рис. 3. Зависимости концентраций некоторых галогенсодержащих компонент от времени: 1 – NF₃, 2 – HCl, 3 – F₂, 4 – Cl₂

Видно, что ХеF-среда существенно меньше подвержена деградации, чем ХеCl. Это связано с тем, что реакция соединения



имеет на порядок более высокую константу, чем реакция



Ход кривой 1 на рис. 1 показывает, что разложение NF₃ не влияет на коэффициент усиления ХеF-среды. Это объясняется невысокой степенью разложения NF₃ и малой концентрацией образовавшегося F₂, имеющего к тому же не очень большое сечение поглощения рабочего излучения. Коэффициент усиления ХеCl-среды, наоборот, сильно зависит от разложения HCl (кривая 2 рис. 1). Его уменьшение связано в основном с образованием Cl₂ – сильного поглотителя рабочего излучения. Уменьшение скорости образования ХеCl(B) вследствие разложения HCl сказывается не так сильно. На рис. 4 приведена зависимость длительности импульса уси-

ления, т. е. времени, в течение которого коэффициент усиления больше нуля, от мощности накачки. Вопреки ожиданию длительность импульса усиления не увеличивается при уменьшении мощности накачки, хотя процесс разложения HCl при этом замедляется. Это обусловлено увеличением роли поглощения на Cl⁻.

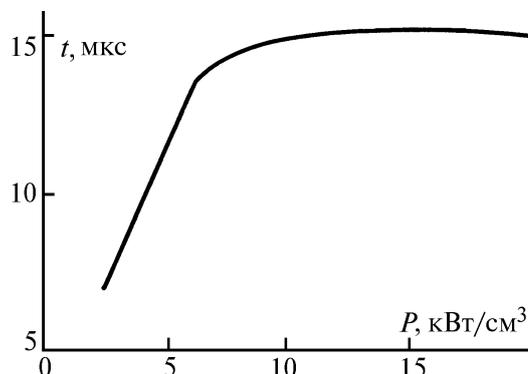


Рис. 4. Зависимость длительности импульса усиления XeCl-среды от удельной мощности накачки

Заключение

Исследованы активные среды эксимерных лазеров. Проводились оптимизация состава смеси и сравнение коэффициента усиления этих сред при различных удельных мощностях накачки (2 – 20 кВт/см³). Исследовался также процесс деградации рабочей смеси и его влияние на характеристики обеих сред.

Показано, что при малых удельных мощностях накачки XeF-среда обладает более высоким коэффициентом усиления и значительно меньше подвержена деградации, чем XeCl-среда. Однако при увеличении мощности накачки разница между коэффициентами усиления обеих сред уменьшается.

1. Ракитский Ю. В. и др. Численные методы решения жестких систем. М: Наука, 1979. 208 с.
2. Champagne L. F., Harris N. W. // *Appl. Phys. Letts.* 1977. V.31. N8. P.531–535.
3. Смирнов Б. М. // *УФН.* 1983. Т.139. Вып. 1. С. 53–81.
4. Nishida N. // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 56. N 3. P. 680–690.
5. Бойченко А. М. // *Труды ИОФАН.* 1989. Т. 21. С. 44–116.
6. Flannery M. P., Yang T. P. // *Appl. Phys. Letts.* 1978. V. 35. N 5. P. 327–329.
7. Johanson T. H. et. al. // *J. Appl. Phys.* 1989. V. 66. N 12. P. 5707–5725.

Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург

Поступила в редакцию
15 апреля 1995 г.

V. V. Lisenkov, V. V. Osipov. Theoretical Study of Plasmochemical Processes in Active Media of XeF and XeCl Lasers.

This work is devoted to the numerical modeling of plasmochemical processes in active media of electron beam pumped XeF and XeCl lasers. Pumping power and pulse lengths were from 2 to 20 kW/cm³ and from 20 to 100 μs, correspondingly. It was found that the gain of XeF media was greater than the gain of XeCl media due to the large absorption of Cl⁻ ions. The dissociation of halogen donor in XeF media was less then in XeCl media.