

УДК 537.527

Ю.И. Бычков, М.К. Макаров, С.А. Ямпольская, А.Г. Ястремский

0D МОДЕЛЬ ХеСl-ЛАЗЕРА. ПРОБЛЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗРЯДА НАКАЧКИ

Представлены результаты 0D моделирования ХеСl-лазера. Расчетная энергия излучения хорошо совпадает с экспериментальными результатами. Показано, что для смеси Ne:Хе:НСl = 1000:10:1 расходуется ~ 10 молекул НСl на образование одного кванта лазерного излучения. Предельная энергия излучения для этой смеси равна 1,6 Дж/л [НСl, мбар].

При увеличении парциального давления НСl увеличивается расход молекул НСl на один квант излучения. Так, для смеси 1000:10:2 расход молекул НСl составил 12,2 молекулы, а предельный энергоъем равен 1,2 Дж/л [НСl, мбар].

Показана возможность существенного увеличения энергоъема путем увеличения НСl в смеси и сохранения хорошей однородности накачки.

1. Введение

В настоящее время выполнен большой объем исследований по выяснению максимальных характеристик излучения ХеСl-лазера. Однако предельные энергетические характеристики ХеСl-лазера остаются неизвестными. По мере совершенствования электрической схемы питания и конструкции лазерного блока в экспериментах достигаются повышение энергии излучения и увеличение эффективности лазера. Применение схемы питания с фотоиницированием разряда позволило существенно улучшить характеристики лазера. Получена высокая эффективность 4% [1], достигнута большая удельная энергия излучения 6 Дж/л [2], реализована большая средняя мощность 500 Вт [3], в широкоапертурном лазере получена энергия 15 Дж в импульсе [4].

Рекордная удельная энергия излучения 7,6 Дж/л при эффективности 3,5% достигнута в [5], где впервые показано, что в смеси Ne:Хе:НСl = 1000:5:1,7 с повышенным содержанием НСl реализуется высокая энергия излучения.

Моделирование физических процессов в лазере является эффективным и единственным способом изучения кинетических процессов, оптимизации параметров и прогнозирования характеристик ХеСl-лазера.

Однако 0D моделирование не учитывает неоднородности накачки. Это приводит к определенным сложностям при сравнении экспериментальных данных с расчетными.

В настоящей статье приведено сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования. Рассматриваются проблема оптимизации параметров и возможные пути увеличения удельной энергии с единицы объема активной среды.

2. Модель ХеСl-лазера

Используемая модель содержит уравнения Больцмана для ФРЭ (функции распределения элект-

тронов по энергии), уравнения кинетики для электронов и тяжелых частиц, уравнения для внешней электрической цепи и уравнения для расчета потоков лазерного излучения Φ^+ и Φ^- .

Модель кинетики учитывает 33 вида частиц и более 300 реакций. Данные по константам взяты в основном из [5]. При расчете каждого конкретного случая число процессов кинетики можно было бы существенно сократить без значительной потери точности расчетов. Однако все дело в том, что основные кинетические процессы в каждом случае различны и каждый раз сокращение числа кинетических процессов требует дополнительного обоснования. Поэтому мы использовали модель кинетики, которая применима во всем диапазоне рассматриваемых начальных условий.

Уравнение Больцмана решалось методом взвешенных невязок, построенным на базе метода Галеркина [6].

В модели учитывались, кроме электронов, метастабильные и резонансные атомы неона Ne^* , Ne^{**} и $He - He^*$, He^{**} , He^{***} а также атомарные Ne^+ , He^+ и молекулярные Ne_2^+ , He_2^+ , $NeHe^+$, $НСl^+$ ионы. Так как константа диссоциативного прилипания электронов к молекулам НСl увеличивается с увеличением номера колебательного уровня, в модели мы учитывали основной $НСl_{v=0}$ и 3 колебательных уровня $НСl_{v=1}$, $НСl_{v=2}$ и $НСl_{v=3}$. Использование $НСl_{v=4}$ не дает существенного выигрыша в точности расчетов.

Известно, что Ne и Хе не обеспечивают равновесное распределение молекул ХеСl по колебательным уровням, а также по состояниям ХеСl(B) и ХеСl(C). Поэтому в модели мы учитывали ХеСl(B) и ХеСl(C) состояния. В состоянии ХеСl(B₀) выделялся уровень $v = 0$. Все остальные уровни $v > 0$ представлялись в виде одного уровня ХеСl(B)^{*}. Уровни $v = 0$ и $v = 1$ были представлены в виде одного уровня ХеСl(C₀), все остальные в виде другого ХеСl(C)^{*} уровня. Состояния ХеСl(B)^{*} и ХеСl(C)^{*} образуются в

результате колебательной релаксации XeCl^{**} в соотношении 0,77 и 0,23%.

Проведенный нами анализ показал, что в области используемых в данной работе внешних условий 0D модель резонатора приводит к заметным ошибкам в энергии лазерного излучения. Поэтому мы использовали одномерную модель [7], в которой лазерное излучение в резонаторе представлено в виде двух противоположно направленных потоков лазерных фотонов Φ^+ и Φ^- .

Тестирование модели проводилось путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментов [8] и показало хорошее совпадение во всем диапазоне граничных условий.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Экспериментальные результаты, взятые для сравнения с расчетными, были получены М.К. Макаровым на известной установке DENEВ, на которой выполнялся большой объем исследований по оптимизации разряда накачки.

Электрическая схема работала в режиме фотоиницирования разряда рентгеновским излучением и состояла из конденсатора $C = 123$ нФ, индуктивности $L = 18,5$ нГ и плазмы разряда. Конденсатор заряжался импульсно за время более 500 нс до напряжения U_0 . Разряд инициировался рентгеновским излучением с дозой $1,5 \cdot 10^{-3}$ рентген. Расстояние между электродами составляло 5,3 см, ширина разряда 3 и длина 40 см. Объем активной среды, таким образом, составлял 0,636 л.

На рис. 1 представлены экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) зависимости удельной энергии от параметра E_0/P (где $E_0 = U_0/d$) при различных давлениях газовой смеси. На рис. 2 показаны зависимости эффективности генерации (отношение энергии излучения к энергии, запасенной в конденсаторе) от параметра E_0/P . Состав газовой смеси $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl} = 1000:8:0,8$.

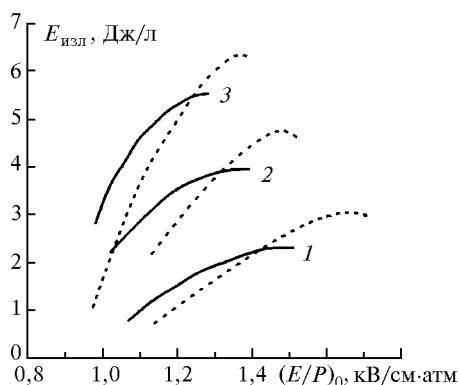


Рис. 1. Зависимости энергии лазерного излучения от параметра E_0/P при разных давлениях. Сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет. Соотношения компонентов смеси $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl} = 1000:8:0,8$. Полное давление смеси для зависимостей 1, 2, 3 составляло 3, 4 и 5 атм

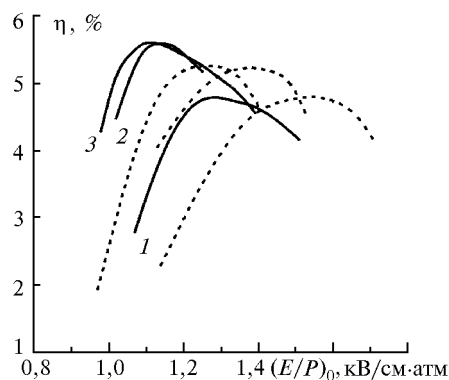
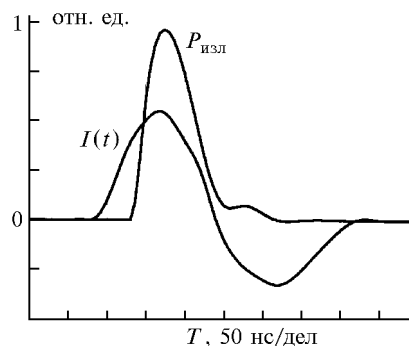


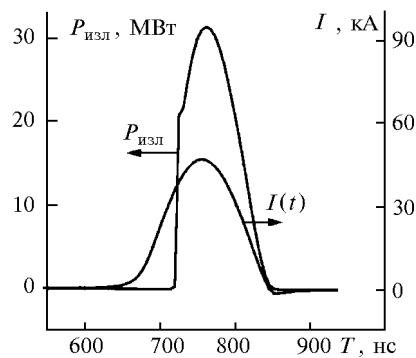
Рис. 2. Зависимости эффективности лазера относительно энергии, запасенной в конденсаторе, от параметра E_0/P . Условия соответствуют рис. 1

Из сравнения экспериментальных и расчетных результатов (см. рис. 1) следует, что в области малых E_0/P энергия излучения, полученная экспериментально, оказывается больше расчетной. В области больших E_0/P расчетная энергия больше полученной экспериментально.

На рис. 3,а показаны экспериментальные, а на рис. 3,б расчетные осциллограммы тока разряда и мощности излучения. Осциллограммы соответствуют $E_0/P = 1,12$ кВ/см·атм для давления смеси 5 атм. Для этих условий $E_{\text{изл}}^{\text{эксп}} = 4,7$ Дж/л, а $E_{\text{изл}}^{\text{расч}} = 3,7$ Дж/л. Разница оказывается существенной.



а



б

Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока и мощности лазерного излучения для $E_0/P = 1,12$ кВ/см·атм: а – экспериментальные, б – расчетные

Для расчетных осциллограмм является характерным протекание тока только в первом полупериоде. Кроме того, в разряде использовалось только 60% молекул HCl от их начального количества.

Для экспериментальных осциллограмм характерна большая амплитуда тока во втором полупериоде. Большой ток во втором полупериоде может быть только в том случае, если в первом полупериоде произойдет почти полное выгорание молекул HCl.

Эти данные позволяют нам сделать вывод о том, что в эксперименте, в центральной части газового объема, вероятно по всей длине электродов, произошло полное выгорание HCl. И это полное выгорание HCl в части объема оказалось больше, чем частичное выгорание HCl в полном объеме в случае расчета. Это и определило то, что экспериментально полученная энергия оказалась больше, чем расчетная. Такой вывод подтверждается тем, что следы разряда на всей длине электродов в центральной части расположены более плотно, чем на краях.

Принцип неустойчивости разряда состоит в том, что плазма стягивается в область с большей концентрацией электронов и разряд гаснет в областях с меньшей концентрацией электронов. В рассматриваемом примере на спаде тока происходило сравнительно плавное стягивание плазмы от краев электродов к центру. Если наше заключение верное, то данная ситуация является примером того, что даже в неустойчивом режиме имеется возможность достижения высокой энергии излучения.

4. Зависимость энергии излучения и эффективности лазера от парциального давления HCl

На рис. 4 и 5 представлены расчетные зависимости энергии излучения и КПД от начального напряжения U_0 при разном парциальном давлении HCl. Полное давление смеси составляло 5 атм. Для зависимости 1 состав смеси был 1000:10:1, а для зависимостей 2 и 3 HCl был увеличен соответственно в 1,5 и 2 раза. Остальные параметры были прежними.

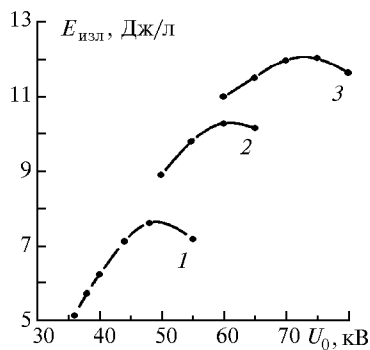


Рис. 4. Расчетные зависимости энергии излучения от параметра E_0/P при разных давлениях. Полное давление смеси для зависимостей 1, 2 и 3 составляло 3, 4 и 5 атм

С увеличением содержания в смеси HCl увеличивается $E_{изл}$. При этом максимальные энергии излучения в каждой смеси достигаются при выгорании ~90% молекул HCl от начального их содержания. При увеличении содержания HCl в два раза энергия излучения увеличивается в 1,5 раза, а эффективность уменьшается с 5 до 4%.

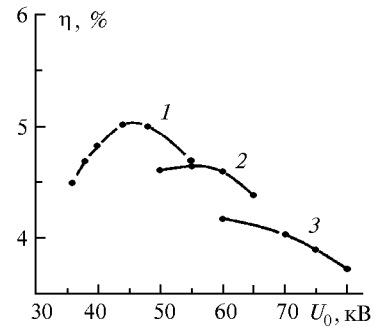


Рис. 5. Расчетные зависимости эффективности лазера от параметра E_0/P при разных давлениях. Данные соответствуют рис. 4

В табл. 1 показана последовательность реакций преобразования молекул HCl в кванты лазерного излучения. Цифры в строке означают число частиц данного сорта, которые расходуются на образование одного кванта выходного лазерного излучения. Цифры над стрелками показывают число частиц, теряемых в этой реакции. Данные табл. 1 соответствуют максимальным значениям энергии излучения для кривых, показанных на рис. 5.

Таблица 1

Смесь	Реакции	
	HCl → Cl- → XeCl* → $h\nu_{рез}$ → $h\nu_{изл}$	
1000:10:1	4,83 9,1 → 4,3	0,3 → 4,0 → 2,2 → 1
1000:10:1,5	5,75 10,1 → 4,4	0,4 → 4,0 → 2,4 → 1
1000:10:2	7,2 12,2 → 5,0	0,4 → 4,5 → 2,7 → 1

Из табл. 1 видно, что с увеличением концентрации HCl заметно увеличиваются потери молекул HCl и число квантов излучения, находящихся в резонаторе, поэтому полное число молекул, необходимое на образование одного кванта излучения, также увеличивается.

Так, при увеличении парциального давления HCl в смеси в 2 раза, в 1,3 раза увеличивается число молекул HCl, необходимых для образования одного кванта лазерного излучения. Поэтому двукратное увеличение концентрации HCl в смеси ведет примерно к полукратному увеличению энергии излучения.

В табл. 2 представлены зависимости энергии излучения $E_{изл}$ от парциального давления HCl в смеси. В четвертой колонке представлена $E_{изл}^1$ – удельная

энергия излучения, приведенная к 1 мбар парциального давления HCl. Значение $E_{изл}^1$ уменьшается при увеличении парциального давления HCl.

Таблица 2

Эксперимент	Смесь Ne:Xe:HCl	HCl ⁰ , мбар	$E_{изл}^0$, Дж/л	$E_{изл}^1$, Дж/л [HCl, мбар]	кпд, %
	1000:8:0,8	4	5,6	1,4	5,1
Расчет	1000:8:0,8	4	6,4	1,6	5,0
	1000:10:1	5	7,7	1,54	5,0
	1000:10:1,5	7,5	10,3	1,37	4,6
	1000:10:2	10	12,1	1,2	3,9

Такое уменьшение связано с увеличением числа молекул HCl, затрачиваемых на создание одного кванта лазерного излучения согласно табл. 1. Параметр $E_{изл}^1$ является удобным показателем степени использования HCl в конкретном режиме накачки.

В расчетах при изменении содержания HCl в смеси добротность резонатора оставалась неизменной, поэтому оптимизация резонатора позволит снизить потери квантов излучения в резонаторе.

Данные табл. 1 представляют интегральные значения за время импульса накачки, при этом в максимуме тока требуется меньшее число молекул HCl на один квант излучения, а на стадиях роста и спада тока это число возрастает. Соответствующий выбор формы импульса тока позволит в некоторых пределах увеличить эффективность использования молекул HCl.

Представленный расчет показывает, что кинетические процессы создания инверсии и извлечения энергии излучения из резонатора допускают возможность увеличения концентрации HCl, по крайней мере в несколько раз, по сравнению со стандартной смесью 1000:10:1.

Однако увеличение HCl неизбежно ведет к снижению устойчивости разряда и может ухудшать однородность накачки. Для реализации предельных возможностей газовой смеси с повышенным содержанием HCl необходимы более совершенные способы формирования разряда. Работа [5] является примером того, что в смеси Ne:Xe:HCl = 1000:5:1,7 с повышенным содержанием HCl экспериментально получена рекордная энергия 7,6 Дж/л при полном давлении 6 атм. При этом приведенная энергия, равная ~ 0,75 Дж/л [HCl, мбар], оказывается малой. Данная смесь позволяет достигнуть большей энергии излучения.

5. Обсуждение результатов

Из табл. 2 следует, что экспериментально полученная энергия $E_{изл} = 5,6$ Дж/л всего лишь на 15% отличается от расчетной. Можно считать, что предельные возможности смеси 1000:8:0,8 почти полностью реализованы в данном эксперименте. Очевидно, что реализация предельных возможностей, залож-

женных в смеси 1000:10:1, – это вопрос некоторой модернизации экспериментальной установки.

Представленные результаты моделирования позволяют утверждать, что проблема оптимизации XeCl-лазера, с целью увеличения энергии излучения с единицы объема активной среды, состоит в том, что необходимо увеличивать парциальное давление HCl в газовой смеси, а все остальные параметры выбирать таким образом, чтобы на образование одного кванта излучения расходовалось минимальное число молекул HCl.

Увеличивать парциальное давление HCl можно двумя путями. Один из этих путей фактически реализован, это увеличение полного давления при неизменном составе компонентов смеси. На этом пути возникают технические сложности из-за того, что лазерная камера оказывается сосудом с высоким давлением.

Второй путь – это увеличение парциального давления HCl при некотором разумном (3 ÷ 5 атм) полном давлении смеси. На этом пути необходимо прежде всего решить задачу временной и пространственной однородности активной среды.

При увеличении парциального давления HCl в смеси неизбежно ухудшается устойчивость разряда. Но если разряд неустойчивый, это не означает, что он неоднороден. Неустойчивость разряда – это его свойство, которое может проявиться в полной мере, частично либо не проявиться. Поэтому задача сводится к тому, чтобы в заведомо неустойчивом разряде получить такую его однородность, которая будет достаточной для реализации потенциальной возможности газовой смеси.

Устойчивость и однородность разряда – это самостоятельная тема, выходящая за рамки настоящей статьи.

6. Выводы

1. Показано, что полученные экспериментально энергия излучения 5,6 Дж/л и эффективность 5,1% являются фактически предельными для смеси Ne:Xe:HCl = 1000:8:0,8.

2. Показана возможность существования такого режима разряда, при котором в стадии его неустойчивого горения происходит плавное стягивание плазмы разряда по ширине от краев электродов к центру, при сохранении достаточной однородности разряда по длине электродов.

3. Из анализа результатов моделирования следует, что в газовой смеси с соотношением компонентов 1000:10:1 на создание одного кванта выходного излучения расходуется ~ 10 молекул HCl, поэтому предельная выходная энергия излучения составляет ~ 1,6 Дж/л [HCl, мбар]. Реализация такой энергии возможна, если однородность накачки будет достаточной для полного выгорания молекул HCl.

4. Принципиальная возможность дальнейшего увеличения энергии излучения состоит в том, чтобы увеличивать содержание HCl в газовой смеси и обес-

печивать однородность накачки для его полного выгорания в активном объеме.

1. *Beaupere D., Lacour B., Garnol and Pinson P.* // Proc. CLEO' 88. 1988. Tu H 6.
2. *Lacour B., Legentil M., Mizzi S., and Puech V.* // Proc. SPIE. 1990. V. 1278. P. 2.
3. *Lacour B., Brunet H., Besaucelle H., and Gagnol C.* // Proc. SPIE. 1992. V. 1810. P. 498.

4. *Бычков Ю.Н., Винник М.Л., Макаров М.К.* // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 6. С. 542–543.
5. *Riva R., Legentil M., Pasquires S. and Puech V.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 856.
6. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. 375 с.
7. *Jonson T.H., Palumbo L.J., Hunter A.M.* // IEEE J. of Quantum Electronics. 1979. V. QE15. № 5. P. 289.
8. *Botticher W., Luck H., Niesner St., and Schwabedissen A.* // J. Appl. Phys. B. 1992. V. B54. P. 295.

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 октября 1997 г.

Ju.I Bychkov, M.K. Makarov, S.A. Yampolskaya, A.G. Yastremskii. **0D Model of XeCl-Laser. Problem of Discharge Optimization.**

The present paper reports the results of zero-dimensional modeling of a XeCl-laser discharge. A good agreement between calculated and measured output energy and laser efficiency has been achieved. It has been shown, that for the typical mixture composition Ne:Xe:HCl = 1000:10:1 about 10 molecules of H \dot{N} I are necessary for generation of the laser photon. The maximum output energy density for this gases mixture is about 1,6 J// [HCl, mbar]. When increasing the pressure of H \dot{N} I, the number of H \dot{N} I molecules related to one laser photon also increases. Thus, for the gas mixture composition Ne:Xe:HCl = 1000:10:2 the corresponding value is about 12.2 and the maximum output energy density is about 1.2 J// [HCl, mbar]. The calculations predict the possibility of the essential increase of the output energy density throughout the enhancement of the H \dot{N} I portion of the gas mixture at the assumption of spatial homogeneity of the pumping discharge.