

# ХеСl-лазер с управляемой формой импульса излучения

А.И.Федоров

*Исследованы параметры накачки трехконтурной системы возбуждения газоразрядного эксимерного ХеСl-лазера на смеси Ne–Хе–НСl. Разработана расчетная модель для определения параметров многоконтурных систем возбуждения. Создана установка с трехконтурной системой возбуждения и автоматической УФ предыонизацией, обеспечивающая получение режима многоимпульсной генерации импульсов излучения с длительностью 65 нс, энергией 26 мДж при КПД лазера 1%. Показано, что в исследуемой системе возбуждения в смесях Хе:НСl = 20:1 с буферным газом неонем возможна генерация как коротких импульсов излучения длительностью 7 нс, так и относительно длинных импульсов длительностью 65 нс в режиме многоимпульсной генерации.*

**Ключевые слова:** эксимерный ХеСl-лазер, энергия излучения, УФ предыонизация, КПД, буферный газ.

## 1. Введение

Управление длительностью и амплитудой импульсов излучения эксимерных лазеров является актуальной задачей для многих приложений. Длительность импульсов УФ излучения электроразрядных эксимерных лазеров, накачиваемых быстрым разрядом, может составлять 10–50 нс [1]. Использование квазистационарного режима накачки обеспечивает генерацию импульсов излучения длительностью более 100 нс [1–5]. Известно, что для большинства электроразрядных эксимерных лазеров длительность импульсов излучения составляет ~20 нс [4, 6]. В одном лазере проблематично получение и коротких (длительностью порядка единиц наносекунд), и длинных (порядка сотен наносекунд) импульсов. Для генерации импульсов малой длительности использовались лазеры на красителях с удвоением частоты [7], активная [1, 8] или пассивная [9] синхронизация мод эксимерных лазеров, насыщающийся фильтр на основе раствора красителя [10] или плазменный затвор [11]. Перечисленные способы формирования коротких импульсов УФ излучения требуют применения достаточно сложных оптических систем, что усложняет использование этих способов для ряда практических применений. В работе [12] нами была показана возможность увеличения длительности импульсов излучения газоразрядных лазеров в двухконтурных схемах питания за счет использования квазистационарного режима накачки, стабилизированного УФ излучением от дополнительного источника предыонизации.

Цель настоящей работы – создание макета импульсно-периодического ХеСl-лазера с трехконтурной системой возбуждения, включающей в себя искровую УФ предыонизацию, и с цепями точной регистрации импульсов тока и напряжения в разрядных контурах и плазме раз-

рядного промежутка, а также выбор расчетной модели для многоконтурной системы возбуждения, позволяющей рассчитывать осциллограммы импульсов тока и напряжения в контурах накачки, длительность и форму импульсов излучения для различных составов рабочих смесей лазера.

## 2. Экспериментальная установка, аппаратура и методы измерений

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения, тока и излучения в наносекундном диапазоне длительностей. Ранее в работе [13] исследовались особенности измерения тока и напряжения в разрядных контурах эксимерных лазеров с помощью токовых шунтов и делителей напряжения из резистивных элементов. Амплитудно-временные погрешности, вносимые этими элементами в параметры измерений, зависели от приложенного к ним напряжения, наличия в них заметной индуктивной составляющей и от емкостного влияния экранирования элементов. Поэтому были специально разработаны малоиндуктивные шунты из высокоомной фольги и скорректированы конструкции экранов для делителей напряжения. Все эти элементы, а также элементы трактов передачи и ослабления сигналов были проверены в рабочих сильноточных и высоковольтных режимах на простых испытательных схемах. Для измерения энергии излучения использовался калориметр ИМО-2Н, форма импульса излучения регистрировалась коаксиальным фотоэлементом ФЭК-22СПУ. Амплитудно-временные характеристики измерялись осциллографами С8-14.

Эквивалентная электрическая схема лазера с цепями точной регистрации напряжения и тока в контурах и разрядном промежутке приведена на рис. 1. Она состояла из трех емкостных контуров возбуждения, в которых  $C_1$  – накопительная емкость,  $C_2$  – обострительная емкость и  $C_3$  – емкость контура автоматической искровой УФ предыонизации. Основная задача данной работы заключалась в определении оптимальных параметров контуров

А.И.Федоров. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: fedorov@asd.iao.ru

Поступила в редакцию 16 мая 2008 г., после доработки – 24 ноября 2008 г.

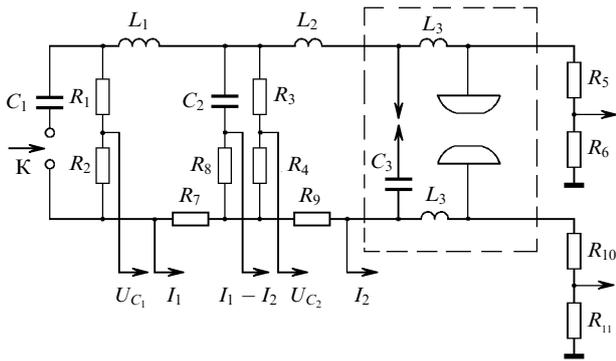


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема лазера с цепями точной регистрации напряжений и токов в разрядных контурах:  $C_1$  – накопительная емкость;  $C_2$  – обострительная емкость;  $C_3$  – емкость контура УФ предыонизации;  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  – индуктивности контуров накачки;  $I_1$ ,  $I_2$  – разрядные токи; К – коммутатор.

возбуждения, обеспечивающих, с одной стороны, эффективную передачу энергии из конденсатора  $C_1$  накопительного контура в обострительный конденсатор  $C_2$  и конденсатор  $C_3$  контура искровой УФ предыонизации, а с другой – определение влияния этих параметров на длительность импульсов излучения. В разрядной камере расстояние между основными электродами изменялось от 1 до 2 см. Длина активной части электродов равнялась 20 см. Ширина разряда определялась по световому пятну его излучения и составляла 0.5 см. Автоматическая УФ предыонизация осуществлялась вдоль одного из электродов за счет двух рядов искровых промежутков по 10–15 искр в каждом. Емкость  $C_1$  набиралась из конденсаторов КВИ-3 с суммарной емкостью до 12 нФ, емкость  $C_2$  – из конденсаторов КВИ-3 или КВИ-1 с суммарной емкостью от 0.6 до 4 нФ, а емкость контура  $C_3$  – из конденсаторов КВИ-1 с суммарной емкостью до 0.6 нФ. В качестве коммутатора К использовался тиратрон ТГИ-1000/25 с насыщающимся дросселем. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме, поэтому имел повышенные индуктивности тоководов ( $L_2 = 20 - 40$  нГн) в лазерную камеру. Зеркалами резонатора служили диэлектрические зеркала с коэффициентами отражения 98 % и 33 %.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Компьютерный расчет осциллограмм всех токов и напряжений проводился методом Рунге – Кутты для системы дифференциальных уравнений первого порядка. Уравнения для трехконтурной схемы накачки можно записать в следующем виде:

$$\frac{dU_{C_1}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_1, \quad (1)$$

$$\frac{dU_{C_2}}{dt} = \frac{1}{C_2} (I_1 - I_2), \quad (2)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{L_1} (U_{C_1} - U_{C_2} - U_c), \quad (3)$$

$$\frac{dU_{C_3}}{dt} = \frac{1}{C_3} (I_2 - I_3), \quad (4)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{L_2} (U_{C_2} - U_{C_3} - U_{UV}), \quad (5)$$

$$\frac{dI_3}{dt} = \frac{1}{L_3} (U_{C_3} + U_{UV} - U_d), \quad (6)$$

где  $U_{UV}$ ,  $U_c$ ,  $U_d$  – напряжения пробоя искры и коммутатора, а также напряжение на основном промежутке соответственно. Вначале проводился расчет уравнений (1)–(3), а затем (по достижении напряжения пробоя искры, а потом и плазмы основного разряда) дополнительно рассчитывались уравнения (4), (5), (6) и т. д. Выбор вариантов расчетных моделей для газоразрядных промежутков показал, что наилучшие совпадения с реальными осциллограммами дают модели для искры и основного разряда с постоянно уменьшающимся напряжением, не зависящим от тока в промежутке. Оказалось, что в модель коммутатора (тиратрона) необходимо добавить активное сопротивление 0.15 Ом. Для расчета напряжения горения и импульсного пробоя искровых промежутков, а также индуктивности брались из пробных экспериментов. Методика расчета подробно приведена в работе [13]. Расхождение расчетных осциллограмм (кроме осциллограмм напряжения на плазме основного разряда) с экспериментальными не превышало 15 %.

Нами были проведены предварительные исследования параметров излучения ХеСl-лазера на смесях Хе и НСl с буферными газами гелием, аргон и неон. Эксперименты показали, что длительность импульсов излучения можно изменять от 7 до 65 нс за счет выбора величины обострительной емкости, размера межэлектродного промежутка и буферного газа. Режим многоимпульсной генерации наблюдался лишь при использовании в качестве буферных газов аргона и неона и при межэлектродных промежутках, меньших или равных 1.5 см. Энергия излучения лазера с буферным газом аргон при оптимальном давлении 0.6 атм была примерно в три раза меньше, чем у лазера с буферным газом неон. Это связано с тем, что искровая предыонизация для аргона менее эффективна. Ширина объемного разряда в случае гелия была в 1.5 раза меньше, чем в случае неона. При использовании гелия длительность импульсов генерации не превышала 20 нс, а энергия излучения была в два раза меньше, чем при использовании неона. Поэтому основные эксперименты проводили с буферным газом неон. Ресурс работы неоновых смесей составлял  $2 \times 10^6$  импульсов. Анализ осциллограмм напряжения и тока в разрядных контурах позволил сделать вывод о том, что модуляция генерации лазера вызвана соответствующей модуляцией тока объемного разряда. Генерация прекращалась при изменении направления тока разряда.

На рис.2 приведены осциллограммы напряжений на емкостях  $C_1$ ,  $C_2$  и на основном промежутке  $U_d$ , разрядных токов  $I_1$  и  $I_2$ , а также импульса излучения для параметров системы возбуждения  $C_1 = 12$  нФ,  $C_2 = 2.5$  нФ,  $C_3 = 0.6$  нФ и смеси Ne:Хе:НСl = 1752:20:1 при давлении 3.5 атм и зарядном напряжении 25 кВ. Модуляция тока разряда  $I_2$  объясняется многократной дозированной передачей в разряд через обострительный конденсатор  $C_2$  части энергии от накопительной емкости  $C_1$ , которая возможна лишь при определенных соотношениях между емкостями конденсаторов и индуктивностями контуров схемы накачки. Этот процесс происходил следующим образом: заряженный от накопителя обостри-

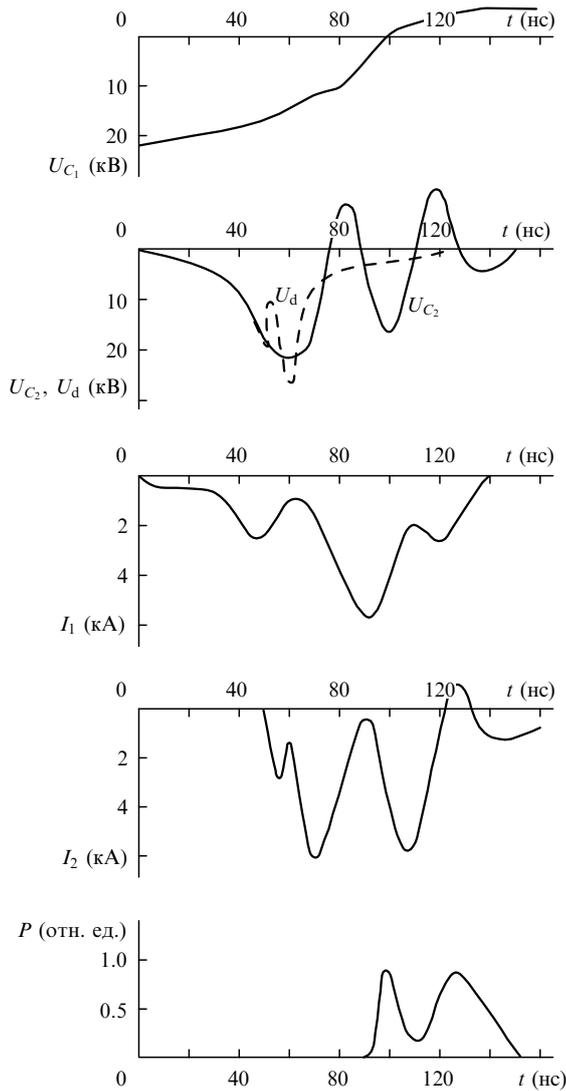


Рис.2. Осциллограммы напряжений на емкостях  $C_1$ ,  $C_2$  и на основном промежутке  $U_d$ , а также разрядных токов  $I_1$ ,  $I_2$  и импульса излучения лазера на смеси Ne:Xe:HCl = 1752:20:1 при давлении 3.5 атм, зарядном напряжении 25 кВ,  $C_1 = 12$  нФ,  $C_2 = 2.5$  нФ и  $C_3 = 0.6$  нФ.

тельный конденсатор разряжался на основной промежуток. Напряжение на обострительном конденсаторе меняло полярность, что вызывало его дополнительную подзарядку от накопителя. Если индуктивности  $L_2$  и  $L_3$  достаточно велики для того, чтобы ток разряда при уменьшении не достигал нуля, то после подзарядки обострительная емкость снова разряжалась на продолжающийся «гореть» объемный разряд, вызывая дополнительный импульс тока. В нашем случае импульс излучения имел два максимума, что соответствовало импульсу разрядного тока основного промежутка.

На рис.3 приведены осциллограммы импульсов излучения лазера на газовой смеси Ne:Xe:HCl = 1752:20:1 (3.5 атм) при разных величинах обострительной емкости. В этом случае накопительная емкость  $C_1 = 12$  нФ и емкость УФ предъюонизации  $C_3 = 0.6$  нФ оставались постоянными. При отношении емкостей  $C_1/C_2 \leq 3$  наблюдался режим быстрой накачки с длительностью импульсов излучения по основанию  $\sim 20$  нс. При зарядном напряжении 20 кВ энергия излучения составляла 12 мДж, а практический КПД лазера был равен 0.5 %. Практиче-

ский КПД в данной работе определялся как отношение энергии излучения к энергии, запасенной в накопительной емкости системы возбуждения.

При отношении  $C_1/C_2 = 4$  появлялся второй пик излучения и общая длительность импульса генерации увеличивалась до 40 нс. Максимальная энергия излучения достигала 23 мДж, а КПД лазера равнялся 0.9 % при запасаемой в накопительной емкости энергии 2.5 Дж. В этом случае потери энергии составляли 0.55 Дж в тиратроне, 0.15 Дж в искровых промежутках и 1.35 Дж в активной среде, а оставшаяся в элементах системы возбуждения на момент окончания объемной стадии разряда энергия была равна 0.45 Дж. При изменении величины обострительной емкости потери энергии в элементах системы возбуждения существенно не менялись. При отношениях  $C_1/C_2 = 6$  и 8 энергия излучения составляла 24 мДж, а КПД лазера равнялся 0.9 %. При этом общая длительность импульсов излучения возрастала с одновременным уменьшением амплитуды первого пика излу-

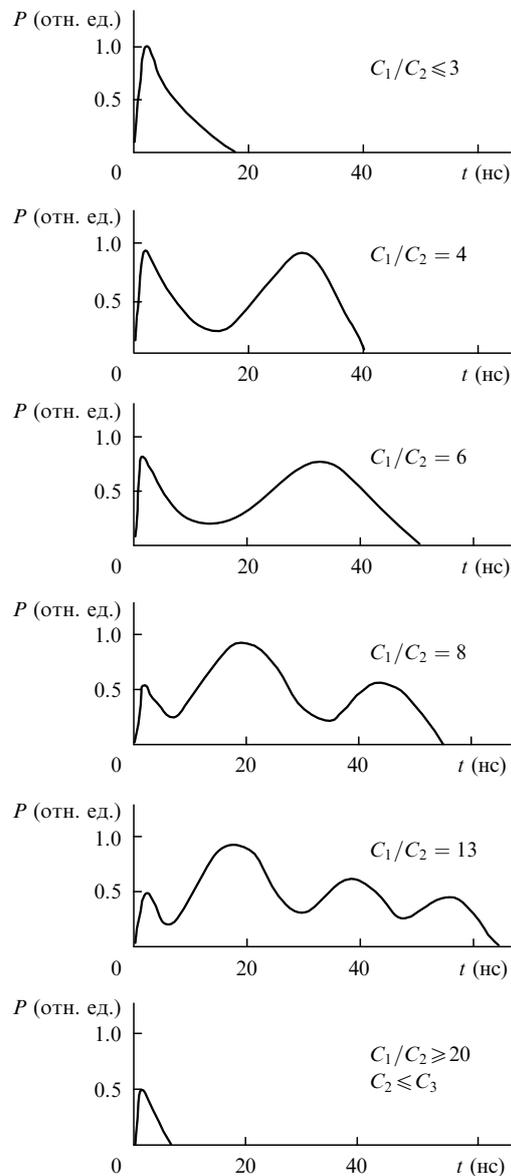


Рис.3. Осциллограммы импульсов излучения лазера на смеси Ne:Xe:HCl = 1752:20:1 при давлении 3.5 атм, зарядном напряжении 25 кВ,  $C_1 = 12$  нФ,  $C_3 = 0.6$  нФ и разных величинах обострительной емкости  $C_2$ .

чения и появлением третьего пика. Максимальная длительность импульса излучения (65 нс) наблюдалась при отношении  $C_1/C_2 = 13$ , максимальной энергии излучения 26 мДж и КПД лазера 1 %. В этом случае реализовывался оптимальный режим для получения многоимпульсной генерации. Далее с ростом отношения  $C_1/C_2$  длительности импульсов уменьшались и, следовательно, уменьшались энергия излучения и КПД лазера. При  $C_1/C_2 \geq 20$  наблюдались короткие импульсы излучения длительностью  $\sim 7$  нс с энергией 5 мДж при КПД лазера 0.2 %. В этом случае обострительная емкость не превышала емкости контура искровой предыонизации ( $C_2 \leq C_3$ ), а система возбуждения работала как двухконтурная, и накопительная емкость не играла существенной роли.

Таким образом, с ростом отношения  $C_1/C_2$  могли изменяться длительность и форма импульса излучения, а следовательно, и КПД лазера. Уменьшение обострительной емкости  $C_2$  приводило к уменьшению энергии излучения в первом пике импульса генерации и возрастанию ее в последующих пиках. Такое поведение импульсов излучения обусловлено модуляцией разрядного тока, которая осуществлялась за счет изменения лишь емкости обострительного контура возбуждения.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований разработана расчетная модель для многоконтурных систем возбуждения ХеСl-лазера. Она обеспечивала расчет осциллограмм тока и напряжения во всех точках электрической схемы возбуждения с погрешностью 10 % – 15 %. Соз-

дана установка с трехконтурной системой возбуждения и автоматической УФ предыонизацией, позволяющая получать режим многоимпульсной генерации с длительностью импульсов излучения 65 нс, энергией излучения 26 мДж при КПД лазера 1 %. Управление длительностью и формой импульсов излучения достигалось за счет модуляции тока разряда при незначительных изменениях параметров системы возбуждения. Показано, что исследуемая система возбуждения позволяет получать в смесях Хе:НСl = 20:1 с буферным газом неонем генерацию как коротких импульсов излучения длительностью 7 нс, так и относительно длинных импульсов длительностью 65 нс в режиме многоимпульсной генерации.

1. Грасюк А.З., Ефимовский С.В., Жигалкин А.К. и др. *Квантовая электроника*, **17** (1), 35 (1990).
2. Бычков Ю.И., Мельченко С.В., Месяц Г.А. и др. *Квантовая электроника*, **9** (12), 2423 (1982).
3. Taylor R.S., Leopold K.E. *J. Appl. Phys.*, **65**, 22 (1989).
4. Атежев В.В., Букреев В.С., Вартопетов С.К. и др. *Квантовая электроника*, **18** (3), 560 (1991).
5. Федоров А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **17** (2-3), 183 (2004).
6. Ражев А.М., Щедрин А.И., Каложная А.Г. и др. *Квантовая электроника*, **34** (10), 901 (2004).
7. Maeda M., Mizunami T., Stao A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 636 (1980).
8. Chistensen C.P., Braverman L.W., Steier W.H., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 424 (1976).
9. Watanabe S., Watanabe W., Endoh A. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 533 (1983).
10. Warghese T. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 684 (1983).
11. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Физика плазмы*, **13** (4), 497 (1987).
12. Федоров А.И. *Письма в ЖТФ*, **27** (24), 52 (2001).
13. Федоров А.И. *Автореф. докт. дисс.* (Новосибирск, 2002).