

А.И. Федоров

ЭКСИМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИСКРОВОЙ ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ

На основании экспериментальных исследований автора и анализа основных работ других исследователей показана возможность получения квазистационарного режима возбуждения и генерации в эксимерных лазерах с автоматической искровой предыонизацией в обострительном или накопительном контуре. При этом длительность режима возбуждения в n раз короче при УФ-предыонизации в обострительном контуре, что обусловлено временем ее существования. И как следствие квазистационарного режима возбуждения в Ne-смесьях с трехконтурными схемами накачки получен режим «многотильтупной генерации» для ХеСl-лазера, т.е. показана возможность управления длительностью и формой импульса генерации за счет выбора параметров источника питания.

1. Введение

В настоящее время эксимерные электроразрядные лазеры работают как в быстром, так и в квазистационарном режимах возбуждения, т.е. обеспечиваются короткие или длинные импульсы генерации. Особенности данных режимов возбуждения впервые нами были исследованы на примере молекулы ХеСl* [1]. Было показано, что на квазистационарный режим возбуждения в основном влияет длительность объемной стадии разряда, которая зависит от интенсивности, однородности и пространственного расположения источника УФ-предыонизации. Квазистационарный режим возбуждения успешно реализуется в двух- или трехконтурных схемах накачки [1, 2]. Нами было обнаружено, что длительность квазистационарного режима возбуждения существенно зависит от включения источника УФ-предыонизации в накопительный или обострительный контур. Кроме того, в зависимости от соотношения емкости накопителя (C_n) и обострителя ($C_{об}$) и включения УФ-предыонизации может реализоваться быстрый или квазистационарный режим возбуждения и генерации.

Целью данной статьи были экспериментальные исследования и анализ основных работ других авторов, обеспечивающие эффективный квазистационарный режим возбуждения с автоматической искровой предыонизацией в обострительном или накопительном контуре.

2. Режимы возбуждения с искровой предыонизацией в обострительном контуре

Нами впервые для эксимерных лазеров была применена трехконтурная схема накачки с искровой предыонизацией в обострительном контуре через сетчатый электрод [2, 3], в которой наблюдались квазистационарные объемные разряды длительностью 200–400 нс в зависимости от буферных газов Аг или Не. И как следствие этого, впервые была показана эффективная генерация на молекуле ХеСl* с Аг с длительностью генерации 170 нс.

На рис. 1,а приведена эквивалентная схема накачки с искровой предыонизацией в обострительном контуре. В зависимости от параметров элементов схемы может быть реализован один из двух режимов возбуждения. При $C_n = C_{об}$, $L_{об} = \min$ и $L_{ст} \approx 0$ (где $L_{об}$ – индуктивность контура обострителя; $L_{ст}$ – стабилизирующая индуктивность) обеспечивается быстрый режим возбуждения с максимальным коэффициентом полезного действия η лазера. При этом ток разряда практически равен току обострительного контура, т.е. $I_p \approx I_{об}$. Поэтому основные усилия многих исследователей были направлены на получение максимальных энергий излучения и η лазера. Так, для КгF-лазера был получен $\eta = 4\%$ [4], а для ХеСl-лазера $\eta = 2,3\%$ [5].

Нас же интересовал квазистационарный режим возбуждения, обеспечивающий длинные импульсы генерации, но при относительно меньших η лазеров. В этом случае должны выполняться следующие условия: $C_n \gg C_{об}$, $L_{об}$ и $L_{ст}$ – оптимальные параметры для $I_p = I_{об} + I_n$. Были проведены исследования устойчивости объемного разряда от параметров схемы накачки и газовых компонент Аг(Не):Хе:ССl₄. Основное влияние на объемный квазистационарный разряд оказывала величина концентрации ССl₄. При ССl₄ = 0,2 Торр длительность объемного раз-

ряда достигала в He-смесях 400 нс [1, 2]. Авторы [6] в малом активном объеме 2 см³ исследовали характеристики излучения в смесях (Ne)Xe:HCl = 10:1 до давлений 20 атм от концентрации HCl с X-предыонизацией и $L_{ст} = 300$ нГ. При давлениях до 8 атм и концентрации HCl = 4 Торр наблюдалась квазистационарная генерация до 350 нс, а при давлениях до 11 атм и концентрации HCl = 5,5 Торр регистрировали многоимпульсную модуляцию спонтанного излучения порядка 350 нс. Авторы [7], используя трехконтурную схему накачки и стабилизирующую индуктивность $L_{ст} = 50$ нГ, получили импульсы генерации 230 нс с энергией излучения 0,15 Дж. Без $L_{ст}$ длительность импульсов излучения равнялась лишь 60 нс.

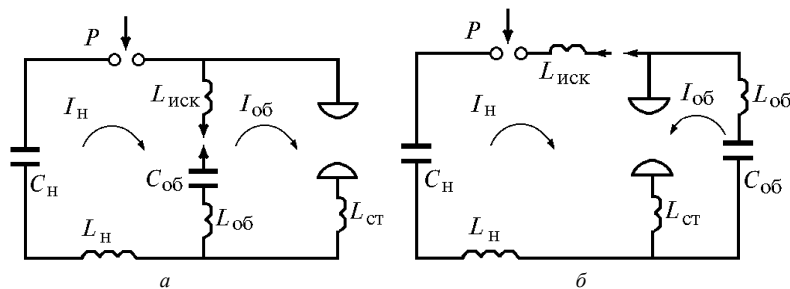


Рис. 1. Эквивалентные схемы накачки с искровой автоматической предыонизацией в обострительном (а) и накопительном (б) контурах для быстрого ($I_p \approx I_{об}$) и квазистационарного ($I_p \approx I_{об} + I_n$) режимов возбуждения

Для детального исследования трехконтурной схемы накачки была разработана лазерная система с активным объемом $V = D \times H \times L = 1,5 \times 0,5 \times 30$ см³ (где D – межэлектродный промежуток, H – ширина и L – длина электродов) для смесей Ar(Ne):Xe:HCl с точными цепями измерения напряжения (в контурах, на плазме) и разрядных токов. В качестве резонатора использовали диэлектрические зеркала с коэффициентами отражения 98 и 33 % [8]. Нами было обнаружено, что в данной схеме реализуются три режима возбуждения: быстрый, квазистационарный и «многоимпульсной генерации». Рассмотрим принципы модуляции генерации, механизм передачи энергии в разряд, распределение потерь энергии в системе питания и способы управления временным профилем импульса генерации.

Для решения поставленной задачи были необходимы: 1) достаточно точная регистрация токов и напряжений в элементах схемы питания и разряде (с возможностью численной обработки осциллограмм); 2) создание расчетной модели сложных многоконтурных схем питания лазеров, позволяющих вычислить осциллограммы токов и напряжений во всех точках схемы, совпадающих с экспериментальными с точностью порядка 10–15 %. Расчет осциллограмм всех токов и напряжений производился методом Рунге–Кутты (на ЭВМ) для систем от четырех и более дифференциальных уравнений первого порядка.

Уравнения для трехконтурной схемы накачки с искровой предыонизацией можно записать следующим образом:

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

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

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

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

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

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

где $C_1 = C_n$, $C_2 = C_{об}$, C_3 – емкости искровых промежутков; $U_{иск}$, U_k , $U_{пл}$ – напряжение пробоя искр, коммутатора и на плазме соответственно.

В процессе расчета (по достижении напряжения пробоя искр, а затем и основного разряда) в него включались дополнительные уравнения (4), (5), далее (6) и т.д. Выбор вариантов расчетных моделей для газоразрядных промежутков показал, что наилучшие совпадения с экспериментальными осциллограммами дают модели с постоянно падающим напряжением, не зависящим от тока в промежутке, для искр и для основного разряда. В модель коммутатора (тиратрон), как оказалось, необходимо добавить активное сопротивление 0,15 Ом. Напряжения горения и импульсного пробоя промежутков в лазере, а также значение индуктивностей для расчетной модели брались из пробных экспериментов. Расхождение расчетных осциллограмм с реальными не превышало 15 %, кроме осциллограмм напряжения на плазме основного разряда, которое плавно спадало в течение разряда.

Эксперименты показали, что режим «многоимпульсной генерации» наблюдался лишь с буферными газами Ar(Ne), в малых межэлектродных ($D \leq 1,5$ см) промежутках при повышенной индуктивности тоководов. Анализ разрядных осциллограмм позволил сделать вывод, что модуляция генерации вызвана соответствующей модуляцией тока объемного разряда. Генерация прекращалась при смене полярности тока разряда.

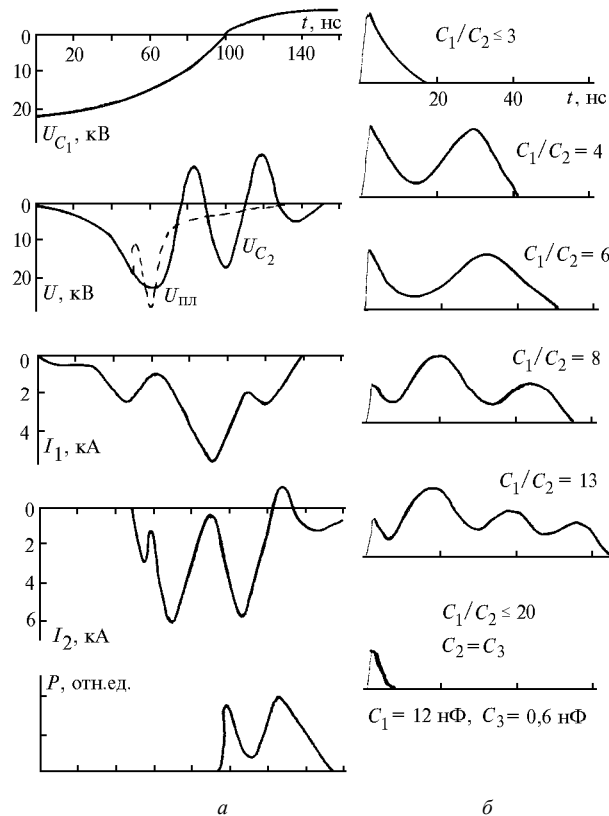


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (U_{C_1} ; U_{C_2} и $U_{пл}$), разрядного тока (I_1 ; I_2) и излучения в смесях (Ne)Xe:HCl = 20:1 (1,5 Торр) и $P = 3,5$ атм; $U_0 = 25$ кВ для трехконтурной схемы накачки

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы напряжений и токов (а) для одного из вариантов схемы с параметрами: $C_1 = 12$ нФ, $C_2 = 2,5$ нФ, $C_3 = 0,6$ нФ для смеси (Ne)Xe:HCl = 20:1 (1,5 Торр) при $P = 3,5$ атм, и импульсы излучения для $C_3 = var$ (б). Модуляция тока разряда объясняется многократной дозированной пересылкой через обострительный конденсатор (C_2) части энергии от накопителя (C_1) в разряд, которая возможна лишь при определенных соотношениях между емкостями конденсаторов и индуктивностями контуров схемы. Процесс этот происходит следующим образом: заряженный от накопителя обострительный конденсатор разряжается на основной разряд. Напряжение на нем меняет полярность, что вызывает его к дополнительной подзарядке от накопителя. Если индуктивности (L_2 , L_3) достаточно высоки, чтобы ток разряда, снижаясь, не достигал нуля, то после подзарядки обостри-

тельная емкость снова разряжается на продолжающий существовать объемный разряд, вызывая дополнительный импульс тока, и т.д. – до полной разрядки накопителя.

На рис. 2,б приведены типичные импульсы генерации для изменяющейся обострительной емкости. При соотношениях $C_1/C_2 \leq 3$ реализуется быстрый режим возбуждения с длительностью генерации менее 20 нс. Для $C_1/C_2 = 4$ наблюдается квазистационарный режим возбуждения, которому соответствуют два максимума импульса генерации. При этом η_r по вложенной энергии в газ равен 1,7 %, а практический $\eta = 0,9\%$. Потери энергии (в джоулях) в элементах схемы распределялись следующим образом: $W_{C_1} = 2,5$, $W_k = 0,55$, $W_{иск} = 0,15$, $W_{изл} = 0,023$, и энергия, оставшаяся в элементах схемы на момент окончания объемной стадии разряда, $W_{сх} = 0,45$ Дж. С ростом отношения C_1/C_2 увеличивалась длительность импульса генерации до 60 нс, т.е. реализовывался режим «многоимпульсной генерации». При $C_1/C_2 \leq 20$ наблюдались короткие импульсы генерации порядка 10 нс. В этом случае емкость обострителя равнялась емкости контура искровой предыонизации ($C_2 = C_3$) и схема работала как двухконтурная, в которой накопительная емкость не играла существенной роли. Следовательно, режим «многоимпульсной генерации» позволяет получать требуемые формы импульсов генерации, которые могут быть заранее рассчитаны. Данный режим наиболее благоприятен для работы эксимерных лазеров в импульсно-периодическом режиме.

Таблица 1

Характеристики ХеСl-лазеров с различными режимами возбуждения и искровой предыонизацией в обострительном контуре

N п/п	Схема накачки	Буферный газ	ρ , %	V , л	$Q_{изл}$, Дж	Q , $\frac{Дж}{л \cdot атм}$	$\tau_{л/2}$, нс	$\tau_{осн}$, нс	η , %	Год	Лит-ра
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$C_1/C_2/C_3 + УФ$	Ar, He	10	0,3	0,02	0,06	40	170	–	1977	[3]*
2	$C_1/C_2/C_3 + УФ$	Ar, He	10	0,3	$\tau_p = 200$ нс (Ar) $\tau_p = 400$ нс (He)				–	1978	[2]*
3	$C_{II}/C_{06} + УФ$	–	–	1	0,5	–	30	–	0,27	1979	[9]
4**	$C_{II}/C_{06} + УФ$	KrF	–	0,2	1	2,8	–	–	0,50	1979	[10]
5	Бл(C) $C_{06} + УФ/R_{ст}$	He	90	0,06	0,015	–	80	120	–	1980	[11]
6	$C_1/C_2/C_3 + УФ$	Ar									
	$C_{II}/C_{06} + УФ$	He	10–40	0,1–0,3	0,3	0,4	40	170	0,7	1982	[1]*
		Ne									
7**	$C_{II}/C_{06} + УФ$	KrF	–	–	–	–	–	–	4	1986	[4]
8	$C_{II}/C_{06} + УФ$	Ne	10	0,08	0,34	1,6	80	120	2	1987	[12]
9	$C_{II}/C_{06} + УФ/L_{ст}$	Ne	40	0,08	0,09	0,4	80	160	0,85	1987	[13]
10	$C_{II}/C_{06} + УФ/L_{ст}$	Ne	–	–	0,3	–	23	60	2,3	1988	[5]
11	$C_1/C_2 + L_{ст}/C_3 + УФ$	Ne	10	–	0,2	–	150	230	0,7	1989	[7]
12	$C_1/C_2/C_3 + УФ$	Ne	33	0,015	0,02	0,4	15	60	0,9	1990	[8]*
13	$C_1/C_2/C_3 + УФ$	Ne	20–50	0,04	0,09	0,06	5	100	–	1990	[14]

* Работы автора.

** Параметры KrF-лазера.

В табл. 1 приведены основные работы и максимальные параметры излучения ХеСl-лазеров с различными режимами возбуждения с искровой предыонизацией в обострительном контуре. Максимальная на настоящее время удельная энергия излучения достигнута для KrF-лазера [10]: $Q_{уд} = 2,8$ Дж·л⁻¹·атм⁻¹, а $\eta = 4\%$ [4], для ХеСl-лазера $Q_{уд} = 1,6$ Дж·л⁻¹·атм⁻¹ [12] и $\eta = 2,3\%$ [5]. Максимальная длительность генерации в квазистационарном режиме возбуждения достигала 230 нс [7]. Ограничение длительности излучения в схемах с предыонизацией в обострительном контуре обусловлено временем ее развития, которое жестко связано с длительностью объемной стадии разряда в промежутке. Для подтверждения нашего вывода были проведены исследования аналогичных схем возбуждения с искровой предыонизацией в нако-

пительном контуре, когда длительность предыонизации в основном определяется лишь величиной емкости накопителя.

3. Режимы возбуждения с искровой предыонизацией в накопительном контуре

На рис. 1,б приведена эквивалентная схема накачки с искровой автоматической предыонизацией в накопительном контуре, обеспечивающей как быстрый, так и квазистационарный режим возбуждения в зависимости от параметров разрядных контуров. Данная схема накачки наиболее благоприятна для квазистационарного режима возбуждения ($I_p = I_{об} + I_n$). Согласно предложенному нами впервые квазистационарному режиму возбуждения предварительный высоковольтный импульс накачки, обеспечивающийся обострительной емкостью, формирует лишь объемный самостоятельный разряд в промежутке, а длительное его поддержание обеспечивает низкое напряжение накопительного контура, т.е. ток разряда (I_n), в котором находится УФ-предыонизация [15]. В этом случае длительность предыонизации определяется временем развития тока накопительного контура.

Впервые данную схему накачки в режиме быстрого возбуждения использовали авторы [16] для молекул KrF, XeF и ArF. Длительность генерации достигала 20 нс. Искровая предыонизация осуществлялась через сетчатый электрод. Нами была разработана аналогичная схема накачки с активным объемом $V = 2,4 \times 0,5 \times 80 \text{ см}^3$, но искровые источники предыонизации замыкались на один из электродов [17]. В первых экспериментах в качестве источника накачки применялся генератор Аркадьева–Маркса (ГИН) с ударной емкостью 10 нФ. Обострительная емкость соответствовала 10 нФ. Данная схема работала в режиме быстрого разряда. Индуктивность накопительного контура составляла 50 нГ, а обострительного – не более 2 нГ. В смесях Ne:Xe:HCl была получена энергия излучения 127 мДж, $\eta = 0,5\%$ и $\tau_r = 20 \text{ нс}$.

При замене ГИНа на распределенную накопительную емкость $C_n = 60 \text{ нФ}$ [15] нами впервые наблюдался квазистационарный режим разряда длительностью до 200 нс. Однако длительность генерации хотя и увеличилась в 2 раза, но достигла лишь 40 нс. Было сделано предположение, что на квазистационарный режим возбуждения влияют плотность разрядного тока и выбор буферного газа. Так, использование Ne позволило авторам [18, 19] увеличить энергию излучения в 1,5–2 раза для быстрого режима возбуждения. Авторы [18] предположили, что с Ne эффективно протекает пенинговская ионизация Xe. В результате этого растет концентрация возбужденных молекул XeCl^* по ионному каналу:



На наш взгляд, это наиболее убедительное объяснение кинетики образования возбужденных молекул при активном участии Ne, особенно для квазистационарного режима возбуждения и генерации, что подтверждается экспериментальными данными. Аналогичная ситуация прослеживается для буферного газа Ar. При использовании Ne энергия излучения была в 2 раза выше, чем при использовании He, хотя длительность генерации была одинаковой. При этом плотность разрядного тока равнялась 0,8 и 1 $\text{кА}\cdot\text{см}^2$ соответственно. Отсутствие квазистационарной генерации объяснялось лишь высокими плотностями разрядного тока.

В новую лазерную систему с активным объемом $V = 2,4 \times H \times 80 \text{ см}^3$ (где ширина электродов изменялась от 0,5 до 2 см), $C_n = 60 \text{ нФ}$, $C_{об} = 10 \text{ нФ}$ и в накопительный контур были введены дополнительные стабилизирующие индуктивности. В данном случае предыонизация могла осуществляться как с одной, так и с обеих сторон одного из электродов [20, 21]. В Ne-смесях впервые был реализован квазистационарный режим возбуждения и генерации длительностью более 170 нс, с энергией 0,5 Дж и $\eta = 1,6\%$ при концентрации HCl = 3 Торр. Оказалось, что оптимальная ширина электродов соответствовала 1 см при плотностях разрядного тока в Ne $J = 200 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$, а для He $J = 350 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$. Квазистационарный режим генерации наблюдался лишь

с Ne. Для Ne реализовывался быстрый режим с длительностью не более 50 нс [21]. При увеличении обострительной емкости ($C_{об} = 20$ нФ) возрастали разрядный ток и энергия, вкладываемая в быстрой стадии разряда, поэтому наблюдался лишь быстрый режим возбуждения, независимо от вида буферного газа, с длительностью генерации не более 70 нс.

Для улучшения предыонизации лазерного промежутка нами была разработана аналогичная двухконтурная схема накачки с симметричной искровой предыонизацией по поверхности диэлектрика через сетчатый электрод с активным объемом $V = 3 \times 1,5 \times 35$ см³ и $C_n = 75$ нФ, $C_{об} = 10$ нФ. В данной схеме исследовался квазистационарный режим возбуждения с буферными газами Ar, Ne и He.

На рис. 3 приведены зависимости энергии излучения в смесях (Ar, Ne, He)Xe:HCl = 10:1 (3 Торр) от давления при $U_0 = 38$ кВ. Максимальные параметры излучения были получены с Ne, что, видимо, связано как с особенностью работы предыонизации в виде промежутка из искровых источников и сетчатого электрода, обеспечивающего формирование дополнительного пучка быстрых электронов в основном разряде [22], так и высокими плотностями тока разряда. Металлический анод подсвечивался равномерно по всей ширине 1,5 см, а на сетчатом электроде ширина разряда соответствовала 0,8 см. Однако ширина лазерного излучения равнялась 1 см независимо от буферного газа. Так, на рис. 4 приведены типичные осциллограммы напряжения на плазме, тока накопительного контура и импульсов генерации для Ar, Ne и He при $P = 1$ атм и $U_0 = 30$ кВ. Самое низкое напряжение пробоя и время его задержки наблюдали с Ne, а квазистационарная стадия разряда достигала 200 нс. Поэтому с ростом давления растет линейно энергия излучения (см. рис. 3). Длительность импульсов генерации достигала 100 нс, что соответствовало квазистационарному режиму возбуждения и генерации. Максимальный ток накопительного и обострительного контуров соответствовал Ne. При этом плотность разрядного тока для всех буферных газов равнялась $1-2$ кА·см⁻², что ограничивало длительность генерации и соответственно выходную энергию излучения. Так, для Ar длительность излучения достигала лишь 50 нс, а для Ne не более 35 нс. Следовательно, в двухконтурных схемах накачки при $C_n \gg C_{об}$ с искровой предыонизацией в накопительном контуре и плотностях тока разряда $J \leq 200$ А·см⁻² в Ne-смесях реализуется режим квазистационарного возбуждения и генерации.

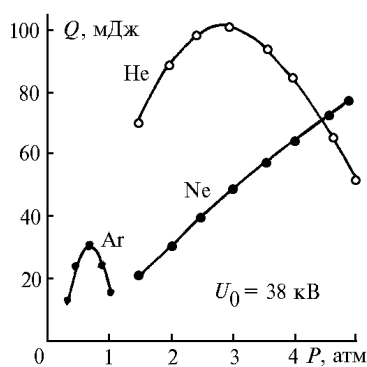


Рис. 3. Зависимости энергии излучения в смесях (Ar, Ne, He) Xe:HCl = 10:1 (3 Торр) от давления для сетчато-искровой предыонизации

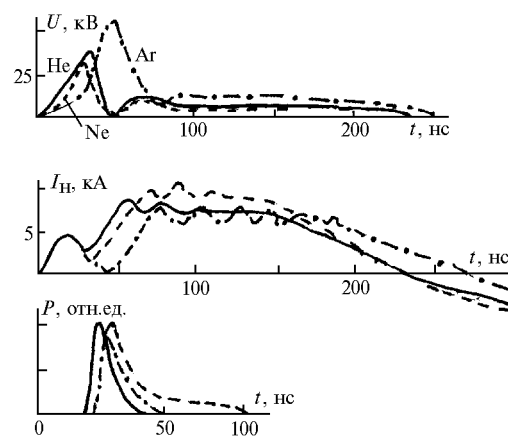


Рис. 4. Типичные осциллограммы напряжения на плазме, тока накопителя и излучения для сетчато-искровой предыонизации с буферными газами Ar, Ne и He

Результаты анализа основных работ по XeCl-лазерам с быстрым и квазистационарным режимами возбуждения сведены в табл. 2 независимо от типа двухконтурных схем накачки с искровой предыонизацией в накопительном контуре.

Максимально-оптимальные характеристики излучения для XeCl-лазера были получены авторами [23]: $Q_{изл} = 1$ Дж, $\tau_r = 275$ нс и $\eta = 2,2$ %. Максимальная удельная энергия ≤ 1 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ [20, 24], а $\eta = 2,9$ % [24]. Длительность генерации достигала 600 нс с $Q_{изл} = 0,1$ Дж и $\eta = 0,02$ % [25]. Особо отметим расчетно-теоретическую работу [26], в которой авторы считают возможным получение $Q_{уд} = 11$ Дж·л⁻¹·атм⁻¹ и $\eta = 5,5$ %. Видимо, данные характеристики возможны, если учитывать уже достигнутые $\eta_{KrF} = 3,9$ % и $\eta_{ArF} = 2,1$ % [27].

Максимальные параметры ХеСl-лазеров с быстрым и квазистационарным режимами возбуждения и искровой предьонизацией в накопительном контуре

N п/п	Схема накачки	Буферный газ	$\rho, \%$	$V, л$	$Q_{изл}, Дж$	$Q, \frac{Дж}{(л \cdot атм)}$	$\tau_{n/2}, нс$	$\tau_{осч}, нс$	$\eta, \%$	Год	Лит-ра
1**	$C_n + УФ/C_{об}$	KrF	5	0,125	0,11	0,7	7	20	1	1978	[16]
2	$C_r + УФ/C_{об}$	He	10	0,1	0,13	0,4	10	15	0,5	1980	[17]*
3	$C_n + УФ/C_{об}$	He	10–40	0,1	0,127	0,5	15	40	0,5	1981	[15]*
Квазистационарный режим разряда											
4	$C_n + УФ + L_{ст}/C_{об}$	He	10–40	0,2	0,127	0,5	15	40	0,5	1982	[1]*
Квазистационарный режим накачки											
5	$C_n + УФ/C_{об}$	Ne	10	0,12	0,28 0,68	0,6 1	20 20	80 40	2,9 1,8	1984	[24]
6	$C_n + УФ + L_{ст}/C_{об}$	Ne	10	0,18	0,5	0,75	15	170	1,6	1986	[20]*
7	$C_n + УФ/C_{об}$ теоретический расчет	Ne	–	0,12	5,5	11,6	75	100	5,5	1986	[26]
8	$C_n + УФ + L_{ст}/C_{об} + L_{ст}$	Ne He	7	0,18	0,5	0,75	15	170	1,6	1989	[21]*
9	$C_n + УФ/C_{об}$	Ne	40	1,3	0,1 0,6	– –	500 300	600 400	0,02 0,25	1989	[25]
10	2НК/МСС	–	–	0,54	1	–	200	275	2,2	1989	[23]
11**	$C_n + УФ/C_{об}$	KrF ArF	–	0,12	0,5 0,27	– –	15	30	3,9 2,1	1994	[27]

* Работы автора.

** Параметры ArF-, KrF-лазеров с максимальными параметрами; 2НК – два независимых контура накачки с отдельными источниками питания; МСС – коммутатор в виде магнитного ключа.

4. Заключение

В результате исследований объемного разряда и энергетических характеристик ХеСl-лазера с многоконтурными схемами накачки и автоматической искровой предьонизацией в накопительном или обострительном контуре для смесей Ar(Ne, He):Xe:CCl₄(HCl):

1) Впервые были получены объемные квазистационарные разряды в He-смесях до 400 нс и в Ar до 200 нс.

2) Была показана высокая эффективность ХеСl-лазера с Ar по сравнению с He при длительности импульсов генерации 170 нс.

3) В He-смесях впервые реализован квазистационарный режим возбуждения и генерации с параметрами: $Q_{изл} = 0,5$ Дж, $\tau_r = 170$ нс и $\eta = 1,6\%$, а также режим «многоимпульсной генерации» в трехконтурных схемах накачки.

4) Определено, что плотность разрядного тока является одним из основных параметров, влияющих на длительность импульса генерации в квазистационарном режиме возбуждения.

5) Выявлено, что преимущественное образование рабочих молекул ХеСl* по ионному каналу с буферными газами Ar и Ne обеспечивается лишь в квазистационарном режиме возбуждения.

6) Показано, что независимо от расположения источника предьонизации (накопительный или обострительный контур накачки) может быть реализован как быстрый, так и квазистационарный режим возбуждения. Однако длительность квазистационарного режима возбуждения в n раз короче при УФ-предьонизации в обострительном контуре, что связано с временем ее существования.

1. Федоров А. И. Экимерные лазеры на молекулах ХеСl* и ХеF*, возбуждаемые самостоятельным разрядом: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1982. 17 с.

2. Тарасенко В. Ф., Тельнов В. А., Федоров А. И. ХеСl*-лазер, возбуждаемый разрядом с интенсивной предьонизацией // Изв. вузов. Физика. 1979. N 6. С. 91–93.

3. Федоров А. И., Тарасенко В. Ф., Бычков Ю. И. Электроразрядный лазер на смеси Ar:He:CCl₄ // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 3. С. 132–135.

4. Week R.W., Donaldson M., McKee T.J. Industrial level gas optic lifetime for commercial KrF excimer laser systems // Proc. of CLEO'86. 1986. P. 144.
5. Hotta K., Arai M., Ito S. High efficiency high repetition-rate KrF excimer laser // NEC Res. and Develop. 1989. N 93. P. 1–9.
6. Zheng C.E., Lo D., Lin S.C. Performance improvement of an X-ray preionized XeCl-laser of very small discharge volume // Appl. Phys. B. 41. 1986. P. 31–37.
7. Lisin A.V., Rozhdestvensky M.A., Roitman L.D. et. al. A simple excimer laser producing long pulse at 308 nm // International J. of Optoelectronics. 1989. V. 4. N 6. P. 541–544.
8. Михайлов А.А., Тихомиров С.И., Федоров А.И. Эксимерный электроразрядный лазер с изменяемым временным профилем импульса излучения // Тез. докл. Всес. семинара «Спектроскопия активных сред газоразрядных лазеров». Таллинн, 1990. С. 1.
9. Kearsley A.J., Andrews A.J., Webb C.E. A novel preionization technique for discharge excited rare gas halide lasers // Opt. Commun. 1979. V. 31. N 2. P. 181–184.
10. Баронов В.Ю., Баронов Г.С., Борисов В.М. и др. Эксимерный импульсно-периодический лазер // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. N 4. С. 896–898.
11. Hogan D.C., Kearsley A.J., Webb C.E. A resistively stabilized XeCl-laser for discharge excited // J. Phys. D: Appl. Phys. 1980. V. 13. L 225–8. P. 166.
12. Сугии М. и др. Получение высокоэффективной генерации в режиме длинных импульсов лазера на смеси XeCl с перезарядкой емкостных накопителей при использовании схемы автоматической предыонизации и уменьшение спектральной ширины линии лазера // Рэдза Кэнкю. 1987. Т. 15. N 7. P. 541–550.
13. Sugii M., Ando M., Sasaki K. Simple long-pulse XeCl-laser with narrow-line output // IEEE J. of QE. 1987. V. QE–23. N 9. P. 1458–1460.
14. Peet V.E., Treshchlov A.B., Slivenskiy E.V. Diagnostics of a compact discharge-pumped XeCl-laser with BCl_3 halogen donor // Appl. Phys. 1991. B 52. P. 234–243.
15. Быков Ю.И., Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. Характеристики плазмы в электроразрядных эксимерных лазерах // Тез. докл. Сибирского совещания по спектроскопии. Томск, 1981. С. 18.
16. McKee T.J., Banic J., Jares A. Operating and beam characteristics, including spectral narrowing, of a TEA rare-gas halide excimer laser // IEEE J. of QE. 1979. V. Qe–15. N 5. P. 332–334.
17. Тарасенко В.Ф., Верховский В.С., Федоров А.И., Тельминов Е.Н. Электроразрядный XeCl-лазер // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. N 9. С. 2039–2041.
18. Jianwen Ch., Shufen F., Miaohong L. Efficient operation of Blumlein-discharge excited XeCl-laser // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 37. N 10. P. 883–885.
19. Watanabe S., Alcock A.J., Leopold K.E. et. al. Spatially resolved gain measurements in UV preionized homogeneous discharge XeCl and KrF lasers // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. N 1. P. 3–6.
20. Fedorov A.I., Brichkov S.A., Verkhovsky V.S. Possibilities for control of duration and shape of XeCl-laser radiation pulse excited by self-maintained discharge // Trends in Quantum Electronics. Bucharest. 1988. Rev. Roum. Phys. 1989. V. 34. N 7–9. P. 707–712.
21. Федоров А.И., Бричков С.А. XeCl-лазер с искровой предыонизацией // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 7. С. 772–775.
22. Федоров А.И., Мельченко С.В. Некоторые особенности формирования объемного самостоятельного разряда в смесях $\text{He}(\text{Ne})\text{-XeHCl}$ // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 4. С. 105–110.
23. McKee T.J., Boyd G., Znotins T.A. A high-power long pulse excimer laser // IEEE Photonics Technology Lett. 1989. V. 1. N 3. P. 59–61.
24. Miyzaki K., Toda Y., Hasama T. et. al. Efficient and compact discharge XeCl-laser with automatic UV preionization // Rev. Sci. Instrum. 1985. V. 56. N 2. P. 201–204.
25. Артемов М.Ю., Грасюк А.З., Нестеров В.М. Электроразрядный XeCl-лазер с импульсами генерации длительностью 500 нс // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. N 12. С. 2374–2378.
26. Миэко О., Минору О., Акира Н. Повышение КПД электроразрядного XeCl-лазера с переносом заряда // Рэдза Кэнкю. 1986. Т. 14. N 1. С. 25–33.
27. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю. и др. Об интенсивности накачки электроразрядных эксимерных лазеров // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. N 6. С. 533–536.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
10 июня 1997 г.

A. I. Fedorov. Excimer Electric-discharge Lasers with Automatic Spark Preionization.

Based on the author's experiments and an analysis of an available literature, a possibility is shown for obtaining the quasistationary regime of excitation and generation in excimer lasers with automatic spark preionization in peaking or storage circuit. The excitation duration therewith is n times as long as long at UV preionization in peaking circuit because of its lifetime. The «multi-pulse generation» regime is obtained in XeCl-laser in Ne mixtures with three-circuit pumping scheme as a consequence of the quasistationary excitation, i.e. the duration and the shape of the generation pulse are shown to be controllable due to choosing the parameters of the power source.