

02;03;04;07

Влияние индуктивно-плазменной УФ-предыонизации на параметры излучения ХеСІ-лазера

© А.И. Федоров

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
E-mail: fedorov@asd.iao.ru*Поступило в Редакцию 27 ноября 2006 г.
В окончательной редакции 5 февраля 2007 г.*

Приведены результаты экспериментальных исследований ХеСІ-лазера с двойным плазменным электродом, обеспечивающим автоматическую индуктивно-плазменную УФ-предыонизацию. Рассмотрены возможности повышения эффективности ХеСІ-лазера за счет выбора режима возбуждения активной среды на основе буферных газов гелия, неона и аргона в зависимости от параметров элементов двухконтурного источника накачки. Показано, что схема накачки с индуктивно-плазменным источником УФ-предыонизации эффективна лишь для быстрого режима возбуждения ХеСІ-лазера с буферным газом неоном, за счет которого можно существенно повышать энергетические параметры излучения, а соответственно эффективность лазера.

PACS: 42.55.Lt

Ранее была показана возможность эффективного использования для эксимерных лазеров высокоинтенсивных УФ-предыонизаторов в виде электродов со скользящим поверхностным разрядом — плазменных электродов [1]. Применение таких электродов позволило нам обосновать и реализовать квазистационарный режим накачки и генерации для ХеСІ-лазера [2] и получить объемные квазистационарные разряды длительностью до $1\ \mu\text{s}$ [3]. Разработанный нами двойной плазменный электрод заданного профиля обеспечивал получение лазерного излучения большой апертуры [4]. Недостатком такого электрода являлось отсутствие устойчивых диэлектрических материалов, выдерживающих длительное взаимодействие с плазмой основного разряда. Поэтому нами был предложен двойной плазменный электрод с дополнительным перфорированным электродом, ограничивающим область основного разря-

да от УФ-предыонизатора, что повышало как ресурс работы лазера [5], так и его параметры [6]. Для накачки газовых лазеров используются емкостные накопители энергии. Можно применять индуктивные накопители энергии. Их преимущества сказываются при энергиях свыше 0.25 МДж из-за массы, объема и стоимости емкостного накопителя [7]. В последнее время успешно используются для ряда задач емкостно-индуктивные накопители энергии [8]. Они основаны на том, что индуктивность разрядного контура, представляющая собой пассивный элемент емкостного накопителя и препятствующая быстрому вводу энергии из конденсаторов в нагрузку, при использовании прерывателя тока (коммутатора) становится активным элементом и работает как индуктивный накопитель. Недостатком данного способа ввода энергии в активные газовые среды является снижение эффективности системы накачки из-за необходимости использования как минимум двух коммутаторов и относительно большого времени затухания импульса тока в разрядном контуре. Авторами работы [9] был разработан ХеСл-лазер с предимпульсом, формируемым индукционным накопителем. Эффективность данного лазера была в 2 раза ниже, чем аналога с емкостным накопителем [10]. Использование дополнительной индуктивности в основном контуре накачки емкостного накопителя на основе ЛС-инвертора с искровой УФ-предыонизацией позволило авторам работы [11] существенно снизить потери энергии, вкладываемой в разряд, а соответственно повысить эффективность КгF-лазера. Ранее для питания плазменных электродов использовались емкостные накопители энергии. Данный способ УФ-предыонизации можно условно назвать емкостно-плазменным. Нами предложено использовать в качестве накопителя энергии для плазменного электрода индуктивности — индуктивно-плазменный способ УФ-предыонизации.

В работе рассмотрены возможности повышения эффективности ХеСл-лазера за счет применения индуктивно-плазменного источника УФ-предыонизации. В экспериментах использовалась двухконтурная схема накачки с автоматической двойной индуктивно-плазменной УФ-предыонизацией, ограниченной перфорированным анодом [5]. На рис. 1 приведена эквивалентная электрическая схема накачки основного рабочего промежутка и двойного индуктивно-плазменного УФ-предыонизатора. Поперечный разряд возбуждения осуществлялся в активном объеме $3 \times 3 \times 60 \text{ см}^3$. Емкость накопительного контура накачки (C_1) набиралась из конденсаторов К15-10 или К75-48 суммарной емкостью 100 нФ. Емкость обострительного контура накачки

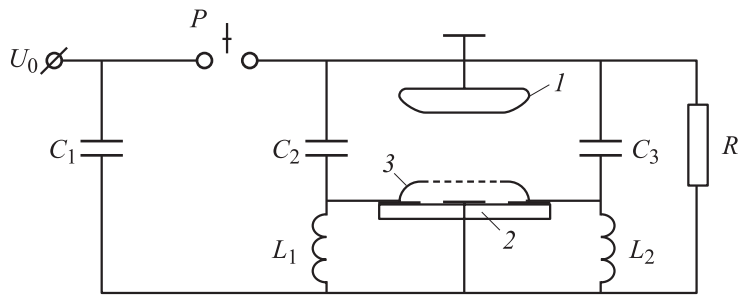


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема накачки с двойным индуктивно-плазменным источником УФ-предыонизации: 1 — катод, 2 — двойной плазменный электрод, 3 — перфорированный анод, $C_1 = 100$ нФ, $C_2 = C_3 = 12\text{--}24$ нФ, $L_1 = L_2 = 110$ нН, P — коммутатор, R — зарядное сопротивление.

($C_2 = C_3$) набиралась из конденсаторов К15-4 суммарной емкостью от 24 до 48 нФ. В качестве коммутатора использовался промышленный разрядник РУ-65. Питание двойного плазменного УФ-предыонизатора осуществлялось автоматически за счет падения напряжения на дополнительных индуктивностях ($L_1 = L_2$) при зарядке обострительной емкости C_2 и C_3 . Индуктивности элементов схемы накачки соответствовали: коммутатора — 60 нН; цепи накопительной емкости — 55 нН; токовводов в лазерную камеру — 1.5 нН и разряда — 9 нН. Для регистрации осциллограмм напряжения на промежутке, разрядного тока накопительного контура накачки, разрядного тока на промежутке и импульсов излучения использовались делители напряжения, токовые шунты, коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22СПУ и осциллограф С8-14. Энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2Н. Были проведены точные измерения и расчет потерь энергии на всех элементах схемы накачки. Для обработки экспериментальных данных использовались стандартные аналитические решения дифференциальных уравнений разрядного контура. Подробное описание расчетов, аппаратуры и методики измерений приведены в работе [12].

На рис. 2 приведены зависимости энергии излучения от суммарного давления смесей (a) и концентрации HCl (b) с буферными газами He, Ne и Ar от величины обострительной емкости при зарядном напряжении (U_0), равном 30 кВ. Было установлено, что оптимальное соотношение компонент газовых смесей соответствует Хе:НCl = 10:1.

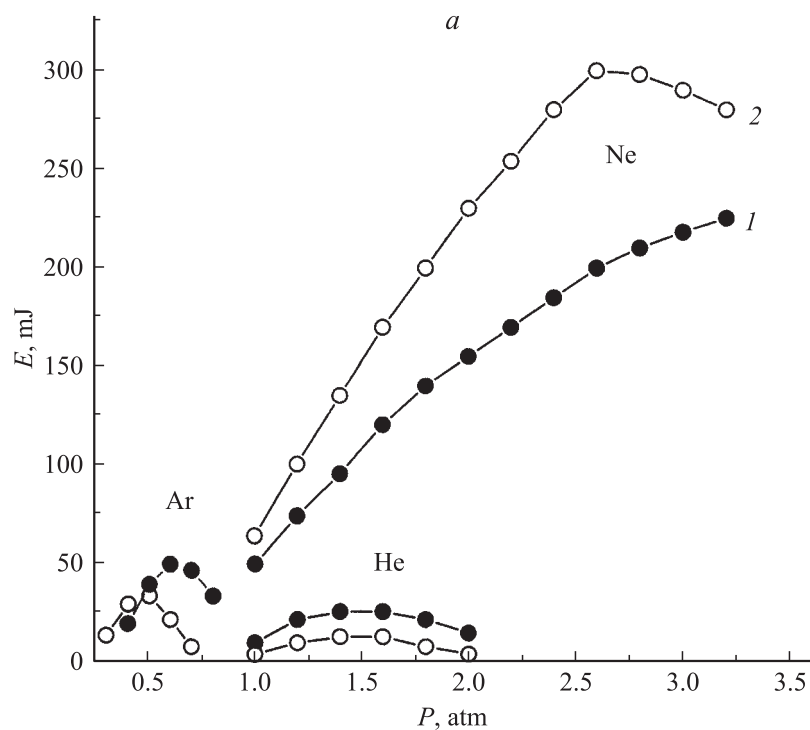


Рис. 2. *a* — зависимости энергии излучения от суммарного давления смеси Хе:НСl=10:1 с буферными газами Не, Не, Аг при оптимальных концентрациях НСl=0.8; 2; 3 Торг, соответственно и $C_2 + C_3$: 1 — 24 нФ, 2 — 48 нФ при $U_0 = 30$ кВ; *b* — зависимости энергии излучения для смеси Хе:НСl=10:1 от концентрации НСl для рабочего давления Не=1.5 атм, Не=2.5, Аг=0.6 атм при $C_2 + C_3 = 24$ нФ (Не, Аг) и 48 нФ (Не).

Кроме того, каждому исследуемому буферному газу соответствовала своя оптимальная концентрация НСl. Для гелия она равнялась 0.8 Торг, для неона — 2 и для аргона — 3 Торг. При низких давлениях газовых смесей до 0.5 атм максимальная энергия наблюдалась с аргоном, возрастая с увеличением обстреливаемой емкости. Аналогичные результаты были получены с неоном при высоких рабочих давлениях. С аргоном оптимальная энергия излучения 50 мД получена с минимальной об-

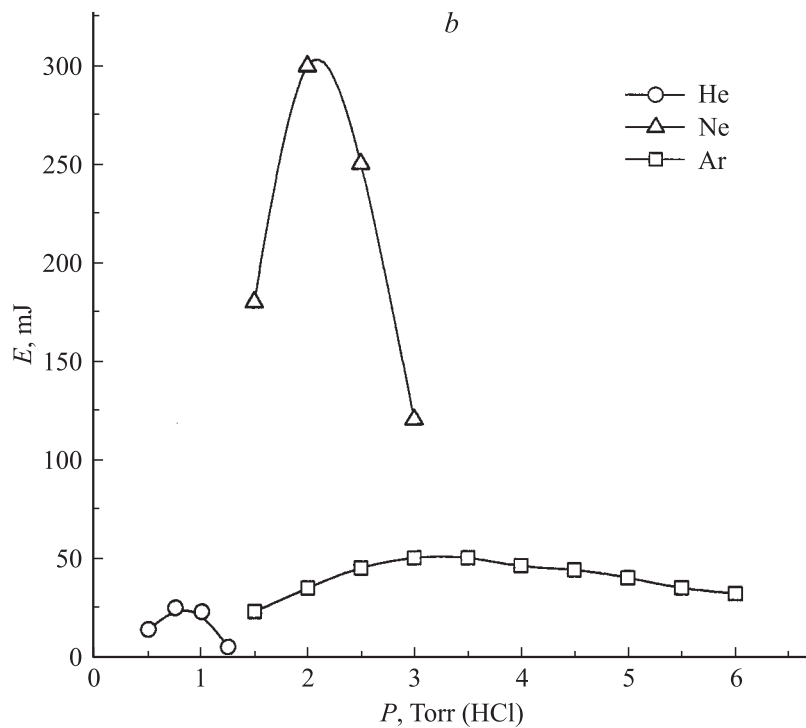


Рис. 2 (продолжение).

острильной емкостью при давлении 0.6 atm. На работу плазменного электрода затрачивалось 2 J от энергии, запасаемой в накопительной емкости. Для гелия область рабочих давлений изменялась от 1 до 2 atm. Оптимальная энергия излучения 25 mJ получена при давлении 1.5 atm. Увеличение обстрильной емкости приводило к снижению энергии излучения независимо от рабочего давления. С неоном была получена максимальная энергия излучения 300 mJ при давлении 2.5 atm и оптимальной концентрации HCl = 2 Torr. Для неона наблюдался линейный рост энергии излучения с ростом давления. Отличительной особенностью является то, что с увеличением обстрильной емкости возрастала энергия излучения, а соответственно энергия, затрачиваемая

на УФ-предыонизацию, с 2 до 3 J, что составляло порядка 7% от энергии, запасаемой в накопительной емкости. Эксперименты показали, что при индуктивно-плазменной УФ-предыонизации в разряд вкладывалось энергии не более 40% от энергии, запасаемой в накопительной емкости. Увеличение обострительной емкости в 2 раза позволило повысить на 50% энергию, затрачиваемую на УФ-предыонизатор, и на 40% энергию, вкладываемую в разряд, а соответственно повысить на 40% энергию излучения. Такое поведение параметров излучения связано как с напряжением пробоя характерных для эксимерных смесей [13], так и влиянием типа и интенсивности УФ-предыонизатора на параметры плазмы за счет фотоионизационных процессов [14]. Можно предположить, что возрастающая роль фотоионизационных процессов, влияющих на кинетику образования рабочих молекул, была наиболее эффективна с буферным газом неоном. На рис. 2, *b* наглядно показано влияние выбора буферного газа на энергетику лазера. Отметим особенность, характерную для аргоновых смесей, что энергия излучения линейно растет при увеличении концентрации HCl до 3 Torr, а с дальнейшим ростом концентрации слабо зависит от нее. Нетрадиционные зависимости параметров излучения XeCl-лазера связаны с характером работы схемы накачки с индуктивно-плазменным источником УФ-предыонизации.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы напряжения на промежутке (U), разрядного тока накопительного контура накачки (I_s), разрядного тока на промежутке (I_d) и импульсы генерации для буферного газа неона в зависимости от величины обострительной емкости. Эти осциллограммы получены при максимальной выходной энергии излучения. Эксперименты показали, что характерный вид осциллограмм слабо зависит от используемого буферного газа, несмотря на то, что оптимальные давления для смесей различны. Для аргона оно составляло 0.6 atm, для гелия — 1.5 и для неона — 2.5 atm. Для всех буферных газов напряжение на промежутке спадало достаточно быстро после его зажигания, а затем меняло свою полярность. Это свидетельствовало о низком сопротивлении разряда, а соответственно о высокой степени ионизации газовых смесей за счет высокоинтенсивного УФ-предыонизатора. На осциллограммах не наблюдалось квазистационарной стадии разряда. Лазер работал в режиме быстрой накачки. Ширина объемного разряда изменялась от 1.6 до 2 см в зависимости от сорта буферного газа. При этом ширина лазерного излучения для гелия равнялась 1 см, для неона и аргона — 1.6 см.

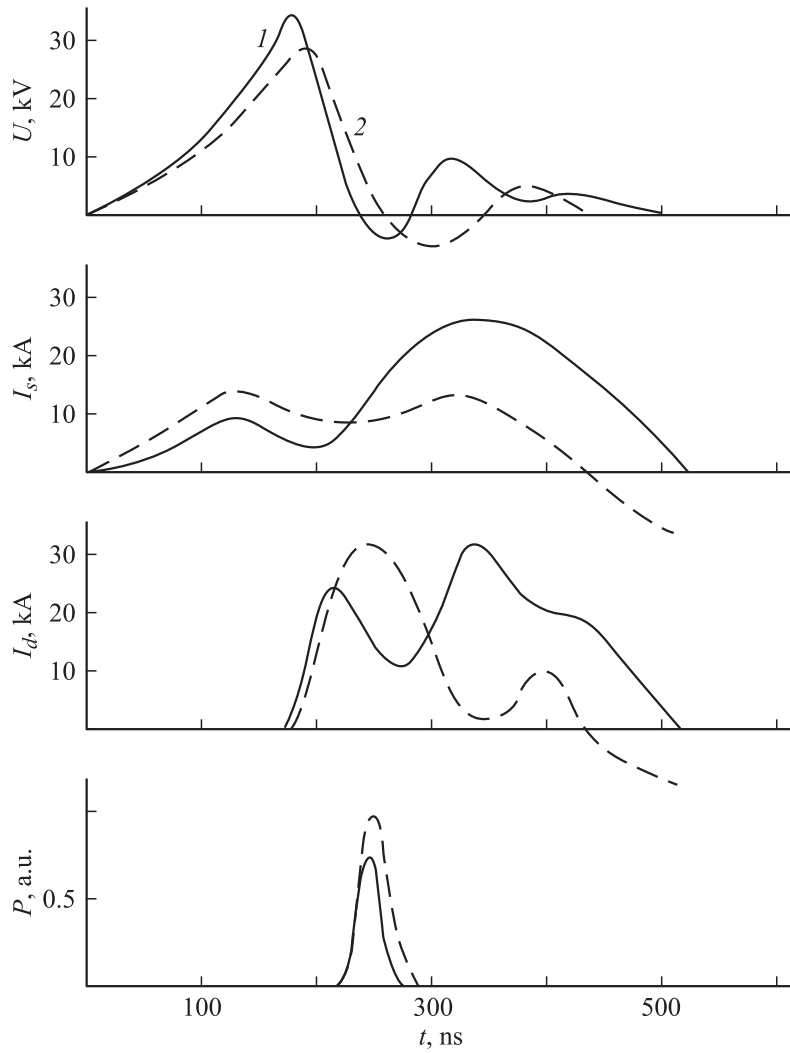


Рис. 3. Типичные осциллограммы напряжения на промежутке, разрядного тока накопительной емкости, тока разряда основного промежутка и импульсов генерации в смесях (Ne) Xe:HCl=10:1 (2 Torr) для $C_2 + C_3$: 1 — 24 nF, 2 — 48 nF при давлении 2.5 atm и $U_0 = 30$ kV.

Средняя плотность разрядного тока составляла порядка 150 A/cm^2 . Длительность импульсов излучения по основанию изменялась для гелия от 25 до 60 ns, для аргона — от 50 до 60 ns и для неона — от 50 до 70 ns в зависимости от параметров схемы накачки. Данный способ УФ-предыонизации увеличивал время нарастания напряжения на промежутке до 200 ns в отличие от теоретически обоснованного времени $\leq 50 \text{ ns}$, согласно работе [15]. В наших ранних исследованиях времена нарастания напряжения на промежутке в эксимерных средах не превышали 100 ns для емкостно-плазменных источников УФ-предыонизации [2]. Увеличение обострительной емкости в 2 раза приводило к увеличению интенсивности УФ-предыонизатора в 1.5 раза, что снижало величину пробивного напряжения и увеличивало время его нарастания. Однако в этом случае большая часть энергии вкладывалась в первый полупериод разряда, согласно осциллограммам разрядного тока. Это приводило к увеличению длительности импульса излучения, а соответственно к росту энергии излучения. Таким образом, индуктивно-плазменная УФ-предыонизация обеспечивала лишь быстрый режим накачки, соответствующий схемам питания с „усилением поля“, в которых образование эксимерных молекул наиболее эффективно на стадии формирования разряда [16]. Нами были определены энергетические вклады в разряд, плазменный УФ-предыонизатор и остаточная энергия на элементах схемы питания на момент спада напряжения на промежутке до нуля, когда заканчивался эффективный ввод энергии в плазму разряда. Потери энергии были незначительны на коммутаторе и индуктивно-плазменном УФ-предыонизаторе. Основная часть энергии оставалась в накопительной емкости. Следовательно, данный режим работы УФ-предыонизатора ограничивал скорость ввода энергии в разряд и зависел от выбора буферного газа и концентрации атомов рабочей молекулы.

Нами были сделаны расчеты зависимостей удельной энергии излучения от удельной энергии, вкладываемой в разряд для данных буферных газов. Оказалось, что средняя энергия, затрачиваемая на УФ-предыонизатор, составляла не более 15% от энергии, вкладываемой в разряд, и 7% от энергии, запасаемой в накопительной емкости. В неоновых смесях максимальной удельной энергии излучения $0.42 \text{ J/1} \cdot \text{atm}$ соответствовала оптимальная удельная энергия, вкладываемая в разряд $25 \text{ J/1} \cdot \text{atm}$, в гелиевых смесях максимальной удельной энергии излучения $0.1\text{--}50 \text{ J/1} \cdot \text{atm}$; в аргоновых смесях максимальной удельной энергии излучения $0.29\text{--}75 \text{ J/1} \cdot \text{atm}$.

На основании проведенных исследований ХеСІ-лазера можно сделать следующие выводы для разработанной схемы накачки с индуктивно-плазменным источником УФ-предыонизации:

1. Схема накачки обеспечивает быстрый режим возбуждения независимо от ее параметров и выбора буферного газа.

2. Параметры излучения критичны от концентрации НСІ в зависимости от выбора буферного газа: для гелия — 0.8 Torr, для неона — 2 Torr и для аргона — 3 Torr.

3. Максимальные параметры излучения достигаются с буферным газом неонем, которому соответствовала удельная энергия излучения $0.42 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$ при энерговыкладе $25 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$ с КПД практическим — 0.7% и газовым — 1.7%.

Список литературы

- [1] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Христофоров О.Б. // Квант. электрон. 1981. Т. 8. № 1. С. 165–167.
- [2] Бычков Ю.И., Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф. и др. // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 7. С. 1481–1483.
- [3] Бычков Ю.И., Мельченко С.В., Месяц Г.А. и др. // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 12. С. 2423–2431.
- [4] Верховский В.С., Федоров А.И. А.с. № 1477203. 1987.
- [5] Федоров А.И., Жунусов Б.А., Тихомиров С.И. А.с. № 4625964/31-25. 1988.
- [6] Борисов В.М., Молчанов Д.Н., Морозов Е.А. и др. // Квант. электрон. 1989. Т. 16. № 11. С. 2170–2172.
- [7] Маришак И.С. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978. 472 с.
- [8] Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5–36.
- [9] Бакиит Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 6. С. 506–508.
- [10] Long W.H., Plumter J., Stapperts E.A. et al. // Appl. Phys. Letts. 1983. V. 43. N 8. P. 735–737.
- [11] Ражнев А.М., Шедрин А.И., Калужная А.Г. и др. // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 10. С. 901–906.
- [12] Федоров А.И. Автореф. докт. дис. Новосибирск, 2002. 26 с.
- [13] Tayler R.S. // Appl. Phys. 1986. V. 41. P. 1–24.
- [14] Басов Н.Г., Глотов Е.П., Данилычев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 8. С. 449–453.
- [15] Levatter J.I., Lin S.C. // Appl. Phys. 1980. V. 51. N 1. P. 210–222.
- [16] Федоров А.И., Мельченко С.И. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 4. С. 105–110.