

Электроразрядный CO₂-лазер с высокой пиковой мощностью излучения

В.М.Орловский, А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко

Разработан электроразрядный CO₂-лазер с пиковой мощностью излучения до 45 МВт и длительностью импульса излучения на полувысоте 50 нс. Для формирования короткого пика лазерного излучения использовался генератор с полупроводниковым прерывателем тока. Максимальная энергия лазерной генерации достигала 6.2 Дж, а КПД относительно запасенной энергии составлял 15%. При этом доля энергии в первом пике была равна 70%, а длительность импульса излучения по основанию не превышала 1 мкс.

Ключевые слова: CO₂-лазер, высокая мощность излучения, генератор с полупроводниковым прерывателем тока.

1. Введение

Для ряда научных и технологических приложений (лазерное воздействие на вещество, локация, разделения изотопов, УТС и т. д.) требуются короткие импульсы лазерного излучения на длине волны 10.6 мкм [1, 2]. Однако из-за особенностей достижения инверсии в смесях He–CO₂–N₂ [3, 4] уменьшение длительности импульса генерации электроразрядных CO₂-лазеров является сложной технической задачей, для решения которой используют электрооптические затворы или поглощение излучения в плазме искрового пробоя [5–7]. К сожалению, данный способ сокращения импульса приводит к значительному падению энергии и КПД генерации лазера.

Короткие импульсы генерации на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм можно получить при оптической накачке смесей CO₂–He высокого давления излучением HF-лазера [8], однако CO₂-лазер с оптической накачкой представляет собой очень сложное и громоздкое устройство и имеет низкую эффективность.

Для сокращения длительности импульсов излучения CO₂-лазера необходимо повышать давление рабочей смеси [9, 10], использовать смеси с водородом [11] и (или) сокращать длительность импульса возбуждения [12, 13]. Но увеличение доли молекулярного компонента и (или) давления газа при использовании генераторов с емкостными накопителями энергии затрудняет формирование объемного разряда. Это приводит к быстрому развитию искровых каналов в разрядном промежутке и снижает КПД CO₂-лазера.

Ранее нами сообщалось об улучшении характеристик CO₂-лазера при использовании для формирования объемного разряда генераторов с индуктивным накопителем энергии (ИНЭ) и полупроводниковым прерывателем тока (ППТ) на основе выпрямительных диодов типа

СДЛ [14, 15]. ИНЭ с прерывателем на основе взрывающихся проводников использовался для накачки CO₂-лазера в [16, 17], но из-за высоких потерь энергии в прерывателе параметры генерации не улучшились.

Целью настоящей работы является создание мощного электроразрядного CO₂-лазера с накачкой от генератора с ИНЭ и ППТ на основе SOS-диодов. Ранее подобный генератор был использован нами для эффективной накачки нецепных HF(DF)-лазеров, а также эксимерных и азотных лазеров [18–20].

2. Конструкция лазера и методики измерений

Электрическая схема лазера приведена на рис. 1. Генератор накачки включал в себя основной и вспомогательный контуры. Основной контур состоял из накопительной емкости $C_0 = 70$ нФ и индуктивности $L_0 = 24$ нГн. Вспомогательный контур предназначался для предварительной накачки SOS-диодов в прямом направлении и включал в себя конденсатор $C_D = 10$ нФ и индуктивность $L_D = 3.1$ мкГн. Энергия, запасаемая во вспомогательном контуре, составляла 2 Дж. В лазере использовались 10 диодов типа SOS-50-2, установленных параллельно обострительным конденсаторам. Предыонизация разрядного промежутка осуществлялась излучением искровых промежутков, равномерно расположенных с обеих сторон от анода, которые срабатывали при импульсной зарядке обострительной емкости $C_1 = 2.45$ нФ. Генератор

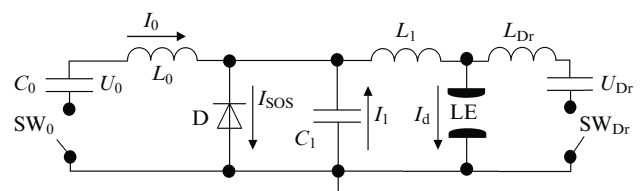


Рис. 1. Схема накачки CO₂-лазера:

LE – лазерные электроды; SW₀, SW_{Dr} – искровые разрядники; C₀ = 70 нФ – накопительная емкость; C₁ = 2.45 нФ – обострительный конденсатор; C_D = 10 нФ – емкость накачки SOS-диодов D в прямом направлении; L₀ = 24.5 нГн, L₁ = 11 нГн, L_{Dr} = 3.1 мкГн – индуктивности контуров; U₀, U_{Dr} – зарядные напряжения; I_i – токи в контурах.

В.М.Орловский, А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: orlovskii@loi.hcei.tsc.ru, alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2009 г., после доработки – 19 декабря 2009 г.

мог работать и в режиме с индуктивным накоплением энергии, и как обычный LC-генератор. В последнем случае конденсатор C_D не заряжался.

Активный объем лазера V составлял 2 × 2 × 70 см. Резонатор был образован плоским медным зеркалом и плоскопараллельной пластинкой из КРС-5. В экспериментах импульсы тока в разрядных контурах, импульсы напряжения на лазерном промежутке и импульсы лазерного излучения регистрировались с помощью омических шунтов, делителя напряжения и фотоприемника ФП-01 соответственно, сигналы с которых подавались на осциллограф TDS-3034. Энергия излучения лазера измерялась калориметром ОРНІR с сенсорной головкой FL250A-EX-SH.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Основные результаты работы иллюстрируют рис.2–4. Резкий обрыв тока через полупроводниковые диоды начинается через 25 нс после начала разряда накопительной емкости (рис.2,б). В течение этого времени часть энергии E_L = L₀I²/2 (где I – амплитуда обрываемого тока) передается в ИНЭ (индуктивность L₀). Ток через диоды полностью прекращается через 75 нс, и за это время в них рассеивается энергия 6 Дж. В момент обрыва ток ИНЭ переключается на зарядку обострительных конденсаторов. В результате ИНЭ за время ~10 нс заряжает емкость C₁ до напряжения, превышающего 70 кВ, формируя высоковольтный предимпульс на лазерном промежутке. После пробоя промежутка ток, остающийся в ИНЭ, складывается с током через обострительную ем-

кость I₁, что обеспечивает быстрое нарастание тока разряда и формирование короткого мощного импульса накачки. Затем в активную среду вкладывается основная энергия, запасенная в емкости C₀.

Большое перенапряжение и быстрое нарастание тока, подобно тому, как это происходило в [9–11], позволяют формировать устойчивый объемный разряд в активных смесях CO₂-лазера при высоких давлениях рабочей смеси и большом содержании в ней молекулярного компонента. Это видно по форме импульса тока разряда (рис.2,а). Примерно через 120 нс после начала накачки начинается экспоненциальное падение тока в лазерном промежутке, а еще через ~500 нс разряд гаснет. При этом, как и в случае HF(DF)-лазеров [9], накопительная емкость может разряжаться не полностью.

Импульс излучения также содержит короткий пик с длительностью на полувысоте 40–50 нс и пиковой мощностью до 45 МВт, за которым следует хвост, длительность которого зависит от состава рабочей смеси. В смеси He:CO₂:N₂ = 3:1:1 полная длительность импульса генерации составляет ~1 мкс (рис.3, кривая 1), а в первом его пике содержится 35 % энергии излучения. При увеличении в смеси концентрации молекулярного компонента доля энергии излучения в первом пике возрастает до 70 %, а длительность генерации уменьшается до 700 нс (рис.3, кривая 2). (Отметим, что близкую форму импульс излучения лазера на смеси He:CO₂:N₂ = 3:1:1, прошедший сквозь лазерную искру, возникающую в воздухе при фокусировке излучения линзой с фокусным расстоянием 20 см.) Энергия излучения в смеси CO₂:N₂ = 5:1 снижается до 1.7 Дж.

При накачке лазера с использованием LC-генератора (рис.2,в) обострительный конденсатор C₁ заряжается только от накопительной емкости, что увеличивает время нарастания напряжения на лазерном промежутке до ~40 нс и снижает пробивное напряжение лазерного промежутка до 57 кВ; при этом амплитуда первого пика накачки уменьшается в два раза. Соответственно снижается энергия в первом пике лазерного импульса, а его длительность увеличивается. Кроме того, отключение ППТ приводит к потере устойчивости разряда. Через 250 нс после пробоя промежутка начинаются резкий рост тока и падение напряжения на лазерном промежутке, что характерно для перехода разряда в искровую стадию. С уменьшением зарядного напряжения накопительной емкости LC-генератора во всех исследованных газовых смесях контрагирование разряда наступает через 20–100 нс

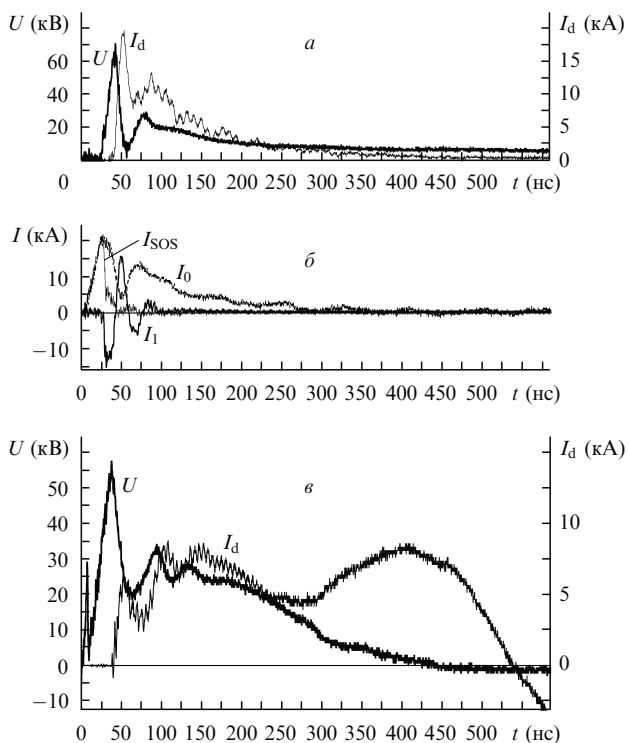


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке (U), тока в лазерном промежутке (I_d), тока через диоды (I_{SOS}), тока в цепи накопительной (I₀) и обострительной (I₁) емкостей. Накачка смеси He:CO₂:N₂ = 3:1:1 при p = 1 атм осуществлялась генератором с ППТ (а, б; I = 20 кА, E_L = 5 Дж) и LC-генератором (в). Зарядное напряжение накопительной емкости U₀ = 36 кВ.

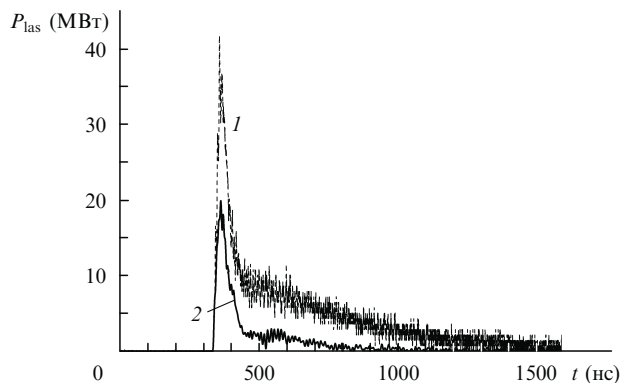


Рис.3. Осциллограммы импульсов лазерного излучения в смесях He:CO₂:N₂ = 3:1:1 при p = 1 атм (1) и CO₂:N₂ = 5:1 при p = 0.5 атм (2) с накачкой лазера генератором с ППТ; U₀ = 36 кВ.

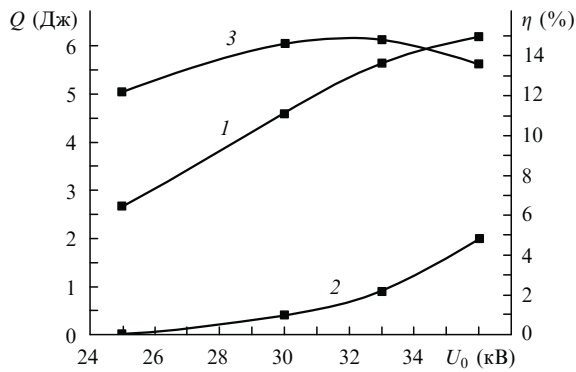


Рис.4. Зависимости энергии (1, 2) и КПД (3) генерации на молекулах CO_2 в смеси $\text{He}:\text{CO}_2:\text{N}_2 = 3:1:1$ при $p = 1$ атм от зарядного напряжения накопительной емкости, полученные при накачке генератором с ППТ (1, 3) и LC -генератором (2).

после пробоя промежутка, что приводит к резкому падению энергии лазерного излучения.

При накачке CO_2 -лазера с использованием LC -генератора заметно возрастает напряжение на лазерном промежутке в квазистационарной стадии разряда. В случае ИНЭ при максимальных U_0 примерно половина энергии вкладывается в активную среду при оптимальном значении параметра $E/p < 13 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$, где E – напряженность электрического поля [21]. В случае LC -генератора основной энерговыход происходит при $E/p \approx 20 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$. Повышение E/p и развитие неустойчивостей объемного разряда заметно снижают КПД генерации. Для условий рис.2 при $U_0 = 36 \text{ кВ}$ энергия, вложенная в активную среду, составляет 31 Дж. При использовании ИНЭ энергия генерации $Q = 6.2 \text{ Дж}$ (рис.4, кривая 1), что соответствует внутреннему КПД CO_2 -лазера $\eta_{\text{int}} = 20\%$. В случае LC -генератора $Q = 2 \text{ Дж}$, а η_{int} не превышает 7%.

Отметим, что при работе с ППТ уменьшение U_0 не приводило к уменьшению устойчивости объемного разряда в лазерном промежутке. При этом ток в лазерном промежутке прекращался раньше, а остаточное напряжение на промежутке возрастало. Кроме того, увеличивалась доля энергии, вкладываемой в активную среду при оптимальном значении параметра E/p , что приводило к росту внутреннего КПД лазера η_{int} до 23% – 24%.

Максимальный КПД η_0 CO_2 -лазера относительно энергии, запасенной в накопительной емкости, в данных экспериментах достигал 15% (рис.4, кривая 3) при максимальной энергии генерации 6.2 Дж. Полученный КПД несколько ниже, чем в наших предыдущих работах (17%) [14, 15]. Однако в [14, 15] требовалась дополнительная энергия на предыонизацию активного рабочего газа, а для управления прерывателем тока на основе диодов СДЛ тратилось не менее 20% энергии, запасаемой в накопительном конденсаторе. В случае SOS-диодов данная величина в два-пять раз ниже (в зависимости от U_0), поэтому КПД лазера, рассчитанный относительно полной энергии, запасаемой в генераторе накачки, при использовании SOS-диодов оказывается выше. Кроме того, в [14, 15] энергия, запасенная в накопительном конденсаторе, полностью вкладывалась в плазму объемного разряда и, следовательно, $\eta_{\text{int}} \approx \eta_0$. Отсюда следует, что применение генератора с SOS-диодами позволяет замет-

но увеличить внутренний КПД электроразрядного CO_2 -лазера.

4. Заключение

Отметим, что в работе показана возможность получения импульсов генерации электроразрядных CO_2 -лазеров с малой длительностью на полувысоте (менее 50 нс) при высоких пиковых мощности излучения (до 45 МВт) и эффективности за счет применения для формирования объемного разряда генератора с прерывателем тока на основе SOS-диодов. При этом доля энергии в первом пике достигает 70%, а длительность импульса генерации по основанию не превышает 1 мкс. Максимальная энергия лазерного излучения достигала 6.2 Дж при КПД генерации относительно запасенной в накопительной емкости энергии до $\eta_0 = 15\%$ и внутреннем КПД $\eta_{\text{int}} \approx 25\%$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Научно-образовательного центра «Квантовая химия, спектроскопия и фотоника наноматериалов».

1. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старостин А.И. *Импульсные CO_2 -лазеры и их применение для разделения изотопов* (М.: Наука, 1983).
2. Бурцев В.А., Гордейчик А.Г., Кучинский А.А., Родичкин В.А., Смирнов В.А., Томашевич В.П. *Квантовая электроника*, **15**, 1376 (1988).
3. Виттеман В. *CO_2 -лазер* (М.: Мир, 1990).
4. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington, USA: SPIE Press, 1995).
5. Gibson A.F., Kimmitt M.F., Norris B. *Appl. Phys. Lett.*, **24**, 306 (1974).
6. Kwok H.S., Yablonovich E. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 158 (1977).
7. Дембовецкий В.В., Матвеева М.В., Сурдутович Г.И., Шурупова Н.П. *Квантовая электроника*, **17**, 142 (1990).
8. Alexandrov B.S., Arsenjev A.V., Azarov M.A., Drozdov V.A., Koretsky J.P., Mashendzhinov V.I., Revich V.E., Troshchchenko G.A. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 301 (2001).
9. Баранов Г.А., Кучинский А.А. *Квантовая электроника*, **35**, 867 (2005).
10. Баранов Г.А., Кучинский А.А., Томашевич П.В. *ЖТФ*, **78**, 53 (2008).
11. Ивашенко М.В., Карапузиков А.И., Шерстов И.В. *Квантовая электроника*, **31**, 965 (2001).
12. Yanzhao Lu, Xinbing Wang, Xueling Zhang, Ju Dong. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7276**, 72760T (2009).
13. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Зенков Д.И., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. *Квантовая электроника*, **23**, 41 (1996).
14. Бакшт Е.Х., Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **24**, 57 (1998).
15. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 261 (1999).
16. Ihara S., Satoh S., Ishimine M., Yamabe C., Akiyama H. *Jap. J. Appl. Phys.*, **34**, L639 (1995).
17. Ihara S., Kamatani M., Ishimine M., Sato S., Yamabe C., Akiyama H. *Electr. Engine. Jpn*, **132**, 15 (2000).
18. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 320 (2004).
19. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А. *Квантовая электроника*, **36**, 403 (2006).
20. Панченко А.Н., Суслов А.И., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. *Квантовая электроника*, **37**, 433 (2007).
21. Лобанов А.Н., Сучков А.Ф. *Квантовая электроника*, **1**, 1527 (1974).