

УДК 535.33,537.525.7

УФ ИНДУКЦИОННЫЙ АЗОТНЫЙ ЛАЗЕР С ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТЬЮ 600 кВт

© 2020 г. А. М. Ражев^{1, *}, Д. С. Чуркин^{1, 2}, Р. А. Ткаченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: razhev@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Впервые при накачке азота импульсным индукционным разрядом получена энергия генерации 4.5 мДж при длительности импульсов на полувысоте 7 ± 1 нс с импульсной мощностью более 600 кВт. Лазерная генерация была получена в форме кольца диаметром около 20 мм и шириной порядка 2 мм на длинах волн 337.1 и 357.7 нм.

DOI: 10.31857/S036767652007025X

ВВЕДЕНИЕ

УФ азотный лазер на сегодняшний день остается одним из наиболее востребованных источников мощного короткоимпульсного УФ излучения, имеет большое количество научных и практических применений [1–7]. Данный лазер отличается относительной простотой конструкции, надежностью работы и химической инертностью активной среды, что позволяет создавать относительно дешевые и долговечные излучатели. В настоящее время наибольшее практическое применение получили УФ азотные лазеры с накачкой продольным и объемным поперечным разрядом [8, 9]. Энергия генерации таких лазеров может варьироваться от долей мДж, до десятков мДж и более [10]. Типичная длительность импульсов генерации достигает нескольких нс на полувысоте.

Азотный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах, поэтому для его эффективной накачки требуется максимальная скорость введения энергии в активную среду. Следовательно, система возбуждения должна иметь минимальную индуктивность, соответствующие требования при этом предъявляются и к скорости срабатывания высоковольтного коммутатора. В своих исследованиях мы показали возможность использования импульсного индукционного разряда как альтернативного метода накачки активной среды азотного лазера. Были созданы УФ азотные лазеры с накачкой продольным индукционным разрядом трансформаторного типа и

цилиндрическим индукционным разрядом [11, 12]. В этих экспериментах УФ лазерная генерация на переходах $C \rightarrow B 2^+$ системы полос азота была получена при использовании различных систем возбуждения, имеющих разную скорость работы. Под скоростью работы в данном случае подразумевается частота осцилляций напряжения в разрядном контуре. Чем она выше и чем, следовательно, меньше период колебаний, тем выше скорость работы схемы. Наиболее простой и стабильной в этих экспериментах была система возбуждения, выполненная по схеме типа Блюмляйна [13]. Однако в качестве высоковольтного коммутатора в ней использовался один коммутатор — тиратрон, имеющий достаточно большие габаритные размеры. Кроме того, тиратрон имеет предел по максимальному току, в целом ограничивая возможности системы возбуждения. Для снижения индуктивности разрядного контура были разработаны схемы, аналогичные хорошо известным типа С-С перезарядка, в которых в качестве коммутатора в разрядном контуре использовался малоиндуктивный газонаполненный разрядник [11, 14]. Такая схема позволяла уменьшить полную индуктивность разрядного контура и увеличить ток в контуре. Однако дальнейшее увеличение мощности накачки ограничивалось тем, что в схеме использовался одиночный разрядник. Поэтому в данной работе с целью устранения отмеченных недостатков была разработана высоковольтная схема на основе рельсового разрядника.

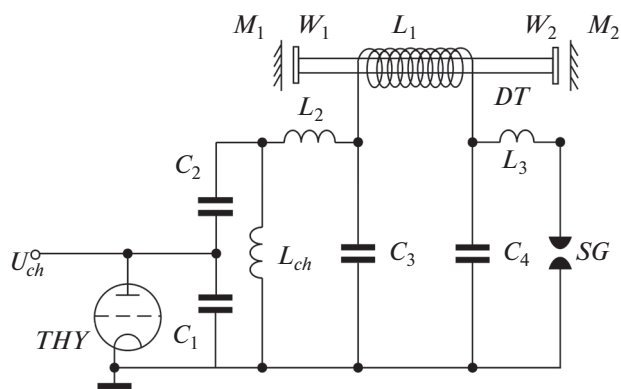


Рис. 1. Электрическая схема системы возбуждения индукционного азотного лазера. $C_1 = 43.2$ нФ, $C_2 = 59.4$ нФ, $C_3 = 9.1$ нФ, $C_4 = 18.2$ нФ, ТНУ – тиратрон ТПИ1-10к/50, DT – индукционный лазерный излучатель, SG – неуправляемый рельсовый разрядник.

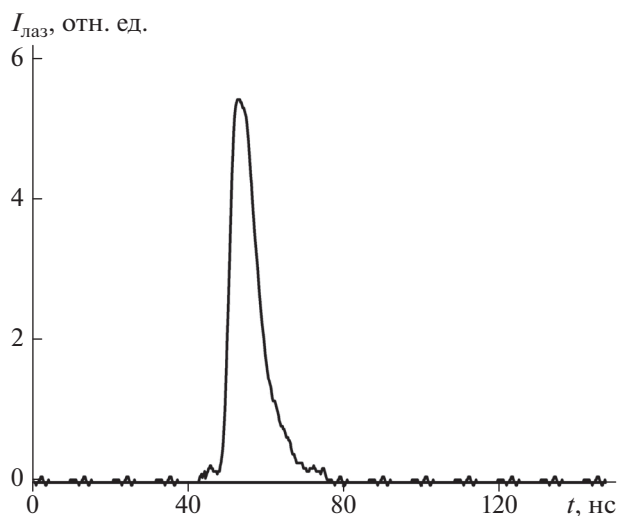


Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации индукционного азотного лазера. Зарядное напряжение 26 кВ, давление азота – 2.5 торр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Электрическая схема системы возбуждения приведена на рис. 1. Система возбуждения включала в себя генератор импульсных напряжений, выполненный по схеме LC-инвертор, состоящий из емкостей $C_1 = 43.2$ нФ, $C_2 = 59.4$ нФ, тиратрона ТПИ1-10к/50 в качестве высоковольтного коммутатора и разрядный контур, включающий в себя две емкости $C_3 = 9.1$ нФ, $C_4 = 18.2$ нФ и рельсовый разрядник SG.

Индукционный лазерный излучатель состоял из керамической трубки DT длиной 800 мм и внешним и внутренним диаметрами 25 и 20 мм, соответственно, с намотанным на нее индукто-

ром. Индуктор L состоял из 32 катушек, выполненных из многожильного провода ПВ-3 с сечением 4 мм², включенных параллельно. Трубку герметизировали плоскопараллельными пластинами из CaF₂, размещенных в юстировочных узлах на торцах трубки. Использовали внешний резонатор, образованный задним плотным плоским зеркалом (M_2) и передним зеркалом (M_1) с коэффициентом отражения 40%.

Спектральные характеристики спонтанного и лазерного излучения азота в импульсном индукционном разряде исследовали на спектрометре S-150 фирмы SolarSystems, а временные характеристики импульсов – при помощи коаксиального фотоэлемента ФЭК-22. Электрические импульсы системы возбуждения регистрировали высоковольтными датчиками Tektronix P6015A с полосой 75 МГц и осциллографа Tektronix 2024 с полосой 200 МГц. Энергетические характеристики генерации измеряли головкой PE-50-BB, оснащенной дисплеем OphirNova.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментах в качестве активной среды использовали чистый азот. Зарядное напряжение было равным 26 кВ, при этом, на разрядном контуре напряжение достигало 31.5 кВ. Индукционный разряд в азоте наблюдали при давлениях до 15 торр. Лазерная генерация в данном излучателе была получена при давлениях азота от долей до нескольких торр.

Максимальная энергия генерации (около 4.5 мДж) была достигнута при давлении, близком к 2.5 торр. Такое давление выше, чем оптимальных условиях накачки переднее зеркало удалялось из оптического резонатора, ее роль в этом случае играла передняя подложка. Форма импульса генерации была близка к колоколообразной и не содержала никаких особенностей. Импульсная мощность генерации индукционного азотного лазера, таким образом, превышала 600 кВт. Необходимо отметить, что такие энергетические характеристики генерации являются достаточно высокими по сравнению с традиционными электроразрядными азотными лазерами, а в импульсном индукционном разряде получены впервые.

Исследование спектра спонтанного и лазерного излучения при накачке азота импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа показали, что его состав в целом является типичным для накачки азота импульсным индукционным разрядом цилиндрического типа

[14]. ИК излучение, соответствующее низкорасположенным переходам 1^+ системы полос молекул азота, отсутствовало. Вместе с тем обычно наблюдаемое излучение в видимой области, соответствующее высоко лежащим подуровням перехода $B \rightarrow A 1^+$ системы, называемое свечением Льюиса–Рэля в данной системе имело довольно низкую интенсивность. Мы предполагаем, что снижение интенсивности свечения Льюиса–Рэля в данной системе связано с уменьшением общего уровня энерговклада в активную среду (при одновременном увеличении мощности накачки). Лазерная генерация в данной конструкции лазерного излучателя возникла только на длинах волн 337.1 и 357.7 нм, соответствующих переходам $C (v = 0) \rightarrow B (v = 0)$ и $C (v = 0) \rightarrow B (v = 1)2^+$ системы полос молекул азота, при этом интенсивность полосы $0 \rightarrow 1$ была примерно в 100 раз ниже.

Исследования пространственных характеристик генерации показали, что лазерный пучок имеет форму кольца диаметром около 20 мм и шириной порядка 2 мм, что является типичным для накачки азота импульсным индукционным разрядом цилиндрического типа.

ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах напряжение на индукторе определялось как разность осцилляций напряжения на емкостях обостряющего контура C_3 и C_4 . Осциллограммы напряжения на C_3 и C_4 и на индукторе приведены на рис. 3.

В описанных выше системах возбуждения период осцилляций напряжения на индукторе составлял около 300 нс для системы на основе одного коммутатора тиратрона и около 180 нс с использованием искрового разрядника. В данной схеме применение рельсового разрядника в сочетании с минимизацией общей индуктивности разрядного контура позволила уменьшить период осцилляций напряжения на индукторе до менее 100 нс. С учетом того, что рельсовый разрядник имеет меньшее сопротивление и индуктивность, удалось значительно повысить мощность накачки. В результате с использованием трубки диаметром 20 мм была достигнута энергия генерации 4.5 мДж. Отметим, что ранее такие значения энергии в индукционном разряде достигались при достаточно больших диаметрах (40–45 мм) разрядных трубок, у которых активный объем был, соответственно, в 2–2.25 раза больше, чем в данном случае. При расчетах мощности генерации электроразрядного азотного лазера отмечалось увеличение и мощности и одновременно сокращение длительности импульсов генерации при увеличении скорости ввода энергии в активную среду [15], то есть, мощности накачки. Аналогичная картина наблюдалась и для

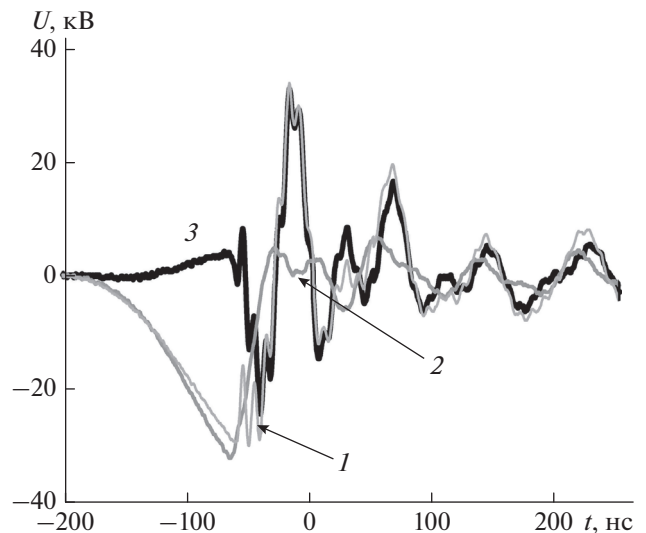


Рис. 3. Осциллограммы напряжений на емкостях C_3 (1) и C_4 (2) и на индукторе (3). Зарядное напряжение 26 кВ.

накачки азота импульсным индукционным разрядом. Уменьшение периода осцилляций напряжения на индукторе для неизменных амплитуд обеспечивает увеличение мощности накачки активной среды импульсным индукционным разрядом. Это приводит к увеличению энергии генерации, сокращению длительности импульсов и, как следствие, увеличению импульсной мощности. Таким образом, появляется возможность создания индукционных азотных лазеров мегаваттной мощности, что является целью наших дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование влияния характеристик системы возбуждения на энергетические, временные и спектральные характеристики генерации индукционного азотного лазера. Показано, что в импульсном индукционном разряде при увеличении частоты осцилляций напряжения на индукторе наблюдается сокращение длительности импульсов при одновременном увеличении энергии и импульсной мощности генерации. Впервые в импульсном индукционном разряде получена энергия генерации 4.5 мДж при длительности импульсов на полувысоте 7 ± 1 нс. Импульсная мощность превышала 600 кВт. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму кольца диаметром около 20 мм и шириной порядка 2 мм. Разработанный лазер имеет широкие перспективы для практических применений, в частности, может быть использован в медицине для лечения туберкулеза [7].

Результаты исследований, представленные в работе, получены в рамках государственного задания (тема № АААА-А18-118032390097-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карелин А.В., Широков Р.В. // Квант. электрон. 2009. Т. 39. № 8. С. 735; Karelin A.V., Shirokov R.V. // Quant. Electron. 2009. V. 39. № 8. P. 735.
2. Генин Д.Е., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 4. С. 360; Genin D.E., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Tel'minov A.E. // Quant. Electron. 2011. V. 41. № 4. P. 360.
3. Sarikhani S., Hariri A. // J. Opt. 2013. V. 15. № 5. Art. № 085703.
4. Xie H., Li G., Chu W. et al. // New J. Phys. 2015. V. 17. № 7. Art. № 073009.
5. Kartashov D., Ališauskas S., Pugžlys A. et al. // J. Phys. B. 2015. V. 48. № 9. Art. № 094016.
6. Ahmed R., Umar Z.A., Aslam Baig M. // Laser Phys. 2019. V. 29. № 5. Art. № 055701.
7. Алимов Д.Т., Захаров В.П., Левченко О.А. и др. Способ лечения деструктивных форм туберкулеза легких, газовый лазер и лазерная установка для лечения заболеваний, сопровождающихся воспалительным процессами с микробной флорой. Пат. РФ № 2082455. 1992.
8. <https://www.opto-lab.ru/ru/produktsiya-i-uslugi/lazery/gazovye-lazery/azotnye-lazery>.
9. <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/technologies/tech23.html>.
10. Коновалов И.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 7. С. 623; Konovalov I.N., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Tel'minov E.A. // Quant. Electron. 2007. V. 37. № 7. P. 623.
11. Разжев А.М., Чуркин Д.С. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 6. С. 479; Razhev A.M., Churkin D.S. // JETP Lett. 2007. V. 86. № 6. P. 479.
12. Разжев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А. // Опт. атмосф. и океана. 2018. Т. 31. № 3. С. 182; Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. // Atmos. Oceanic Opt. 2018. V. 31. № 4. P. 415.
13. Razhev A.M., Churkin D.S. // Opt. Commun. 2009. V. 282. № 7. P. 1354.
14. Разжев А.М., Чуркин Д.С., Жупиков А.А. // Квант. электрон. 2009. Т. 37. № 10. С. 901; Razhev A.M., Churkin D.S., Zhurikov A.A. // Quant. Electron. 2009. V. 39. № 10. P. 901.
15. Ali A.W. // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 5. P. 993.