

УДК 535.33, 537.525.7

УФ азотный лазер с накачкой импульсным продольным индукционно-электрическим разрядом

А.М. Ражев¹, Д.С. Чуркин^{✉ 1,2}, Р.А. Ткаченко^{1,2}, И.А. Трунов^{1*}

¹Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Поступила в редакцию 31.08.2023;
после доработки 02.10.2023;
принята к печати 06.02.2024

Газовые электроразрядные азотные лазеры до сих пор остаются востребованными источниками УФ-излучения и находят множество научных и практических применений. В настоящее время одними из требований, предъявляемых к коммерческим азотным лазерам, являются малые габаритные размеры, высокая стабильность от импульса к импульсу и увеличенное время службы. В настоящей работе в качестве источника, удовлетворяющего подобным критериям, предлагается азотный лазер, возбуждаемый импульсным продольным индукционно-электрическим разрядом. В результате проведенных экспериментальных исследований получено лазерное излучение с длинами волн $\lambda_1 = 337,1$ нм и $\lambda_2 = 357,7$ нм. Энергия импульсов генерации достигала 0,67 мДж при длительности 20 нс на полувысоте и давлении азота 7...8 торр. Накачка азота только продольным разрядом в экспериментальной установке с аналогичными параметрами приводила к уменьшению энергии генерации до 0,4 мДж (с такой же длительностью 20 нс на полувысоте) при давлении азота не выше 5 торр. Азотные лазеры с данными параметрами излучения могут быть использованы для лечения офтальмологических заболеваний и туберкулеза.

Ключевые слова: УФ азотный лазер, импульсный индукционный разряд, продольный электрический разряд, энергия генерации; UV nitrogen laser, pulsed inductive discharge, longitudinal electric discharge, lasing energy.

Введение

Азотные лазеры, излучающие в ультрафиолетовой области спектра, продолжают привлекать к себе внимание исследователей [1–6]. Причина этого — возможность генерации мощных лазерных импульсов в химически инертной активной среде при относительно простой конструкции самого лазера. На сегодняшний день наибольшее распространение получили азотные лазеры с накачкой импульсным продольным и поперечным электрическими разрядами. Исходя из последних тенденций к уменьшению габаритов лазерных установок и вариации параметров лазерного пучка, именно продольный разряд является наиболее предпочтительным для практических приложений [3].

Наши предыдущие исследования зависимости характеристик излучения азота от параметров накачки импульсным индукционным разрядом [7–9] показали, что данный метод накачки может быть

предложен как альтернативный, с возможностью достижения УФ импульсной лазерной генерации мегаваттной мощности. Главная отличительная особенность метода — формирование индукционного разряда в результате электромагнитной индукции, не требующей наличия металлических электродов внутри разрядной трубки. В результате этого даже в ходе длительной работы лазера сохраняется возможность однородного возбуждения активной среды и отсутствуют процессы, приводящие к загрязнению внутренних поверхностей разрядной трубки и оптических элементов резонатора.

У индукционного разряда есть особенности, связанные с условиями его формирования. Индукционный разряд, в отличие от классического продольного или поперечного электрического разряда, не является последовательным элементом электрической цепи и образуется в результате электромагнитной индукции при протекании переменного тока по индуктору. Согласно трансформаторной модели безэлектродных разрядов [10] короткозамкнутый плазменный виток индукционного разряда может быть представлен в виде вторичной обмотки трансформатора, у которого в качестве первичной обмотки выступает индуктор, расположенный на разрядной

* Александр Михайлович Ражев (razhev@laser.nsc.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Роман Андреевич Ткаченко (tkachenkora23@yandex.ru); Игорь Александрович Трунов (trunov.igor1998@gmail.com).

трубке. В результате этого электрическая схема системы накачки требует наличия внешнего высоковольтного коммутатора (например, [9]). Чаще всего это искровой газонаполненный неуправляемый разрядник, который до начала колебательного процесса обладает малой проводимостью и является временным разрывом электрической цепи, что позволяет достичь максимального напряжения на элементах разрядного контура, а также выступает коммутатором, приводящим к старту колебательного процесса на индукторе и формированию индукционного разряда в активной среде. Классические газовые лазеры с накачкой поперечным или продольным электрическим разрядом не требуют наличия таких внешних коммутаторов, так как сам межэлектродный промежуток играет эту роль.

Поскольку азот как активная среда требует высокой скорости ввода энергии, дополнительный разрядник негативно влияет на эффективность работы схемы накачки из-за того, что он является источником паразитных потерь, в результате чего может исчезнуть лазерная генерация. Для исключения подобного отрицательного влияния ранее в [11] нами была предложена новая схема накачки азота, в которой помимо индуктора, размещенного на разрядной трубке, реализован дополнительный продольный электрический разряд между юстировочными узлами, выполняющими роль полых электродов. Таким образом обеспечивается накачка азота импульсным продольным индукционно-электрическим разрядом. Представленная статья – продолжение и развитие опубликованных в [11] исследований.

Цель настоящей работы – изучение особенностей генерации УФ азотного лазера с накачкой продольным индукционно-электрическим разрядом.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка и условия проведения экспериментов в целом были аналогичны [11]. Отличительные особенности текущей конфигурации (рис. 1) заключались в оптимизированном соотношении величин емкостей C_2 и C_3 (1,92 и 0,96 нФ соответственно), увеличении внутреннего диаметра капилляра разрядной трубки ДТ до 10 мм и общего сечения антенн индуктора с 12 до 48 мм².

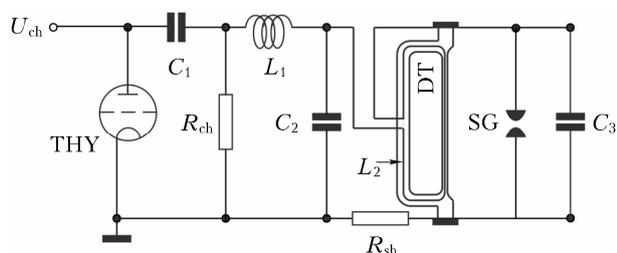


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки: $U_{ch} = 24$ кВ – зарядное напряжение; ТНУ – тиратрон серии ТПИ1-10к/50; R_{ch} – зарядное сопротивление; R_{sh} – сопротивление токового шунта; L_1 – индуктивность подводящих шин; L_2 – индуктор-антенна; ДТ – разрядная трубка; $C_1 = 20$ нФ; $C_2 = 1,92$ нФ; $C_3 = 0,96$ нФ; SG – межэлектродный разрядный промежуток

Продольный электрический разряд формирует за счет подачи напряжения между полым анодом и катодом, образованными юстировочными узлами индукционного излучателя. Контроль тока продольного электрического разряда осуществлялся при помощи токового шунта, выполненного из набора сопротивлений малого номинала R_{sh} , подключенных к одному из юстировочных узлов. Измерение падения напряжения на шунте позволяло определить ток продольного электрического разряда, протекающий в трубке-капилляре. Методика проведения исследований предполагала напуск азота в индукционный излучатель при помощи газовой системы, позволяющей варьировать давление в трубке с точностью до 1 торр. Зарядное напряжение в экспериментах было равно 24 кВ при частоте повторения импульсов 1 Гц.

Результаты и обсуждение

Исследования спектральных характеристик излучения азота при накачке индукционно-электрическим продольным разрядом показали, что лазерная генерация возникает на переходах 0–0 ($\lambda_1 = 337,1$ нм) и 0–1 ($\lambda_2 = 357,7$ нм) второй положительной системы полос молекул N_2 . Отношение интенсивностей спектральных компонент λ_1 и λ_2 было на уровне 100. Генерация на полосе 0–0 регистрировалась при давлениях 1...10 торр. Диапазон давлений генерации на полосе 0–1 был значительно уже – около 1 торр при оптимальном давлении не более 5 торр. Исследования энергетических характеристик лазерного излучения показали, что при накачке азота индукционно-электрическим разрядом с зарядным напряжением 24 кВ энергия генерации достигает 0,67 мДж под давлением 7...8 торр. Форма оптических импульсов показана на рис. 2, а. Измеренная длительность импульсов была ~20 нс на полувысоте. После этого индуктор с трубки, а также емкость C_3 были удалены (ее наличие при отсутствии индуктора не оказывало значительного влияния на энергию генерации). В данном излучателе при накачке азота только продольным электрическим разрядом энергия лазерной генерации и оптимальное давление значительно уменьшались – до 0,4 мДж и 5 торр соответственно. Временные характеристики оптических импульсов при этом не изменялись (рис. 2, б).

На рис. 2 представлены временные зависимости параметров системы накачки (напряжение на емкостях C_2 и C_3 , напряжение на индукторе $U_L = U_{C_3} - U_{C_2}$), а также ток разряда в трубке I и относительное положение оптических импульсов. Видно, что лазерная генерация возникает на переднем фронте импульса тока разряда I . При этом накачка азота индукционно-электрическим разрядом обеспечивала большую амплитуду тока и крутизну его нарастания. Также на рис. 2, а можно заметить наличие временной задержки, возникающей при запуске колебательных процессов и переплюсовки батарей конденсаторов C_2 и C_3 , что

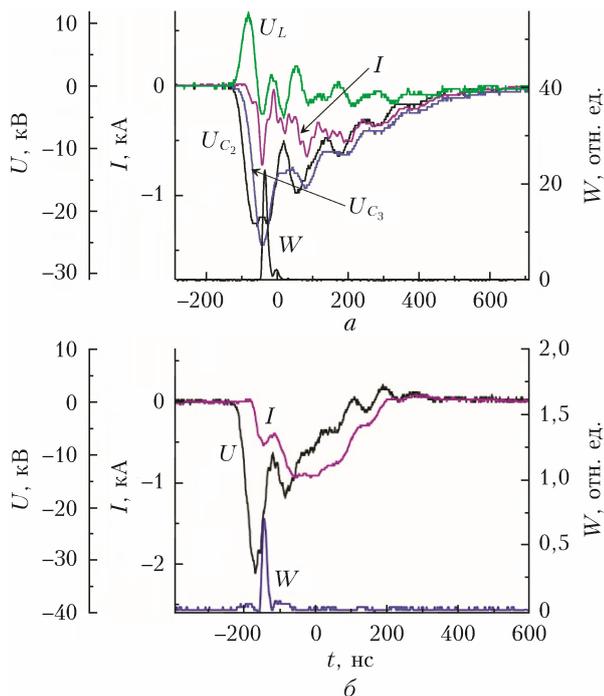


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжений на обостряющих емкостях C_2 и C_3 , напряжения на индукторе U_L , тока разряда I в трубке, а также оптического импульса генерации W УФ азотного лазера: *a* — накачка молекулярного азота продольным индукционно-электрическим разрядом; *b* — накачка азота только продольным электрическим разрядом (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

приводит к возникновению разницы напряжений еще до момента пробоя разрядного промежутка.

Наличие данной временной задержки обуславливает возникновение напряжения на индукторе, приводящее к формированию импульсного индукционного продольного разряда, который служит в качестве предыонизации для продольного электрического разряда. В результате этого возрастает оптимальное рабочее давление активной среды, что позволяет повысить энергию генерации и улучшить качества лазерного пучка [11]. На рис. 3 приведен профиль пучка азотного лазера с накачкой индукционно-электрическим продольным разрядом при максимальной энергии генерации. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму, близкую к кругу. Неоднородности в распределении интенсивности главным образом вызваны наличием клина между поверхностями оптических элементов резонатора, в результате чего часть излучения отражается под углом к оптической оси, что, в свою очередь, приводит к многократным отражениям от внутренней поверхности разрядной трубки.

Отдельный интерес представляла полярность включения индуктора в электрическую цепь. Описанные выше результаты для совместной накачки были получены при сонаправленном токе индукционного и продольного электрического разрядов. Изменение полярности индуктора приводило к резкому (до 1,5 раз) уменьшению амплитуды импульса тока разряда (первый пик импульса тока I

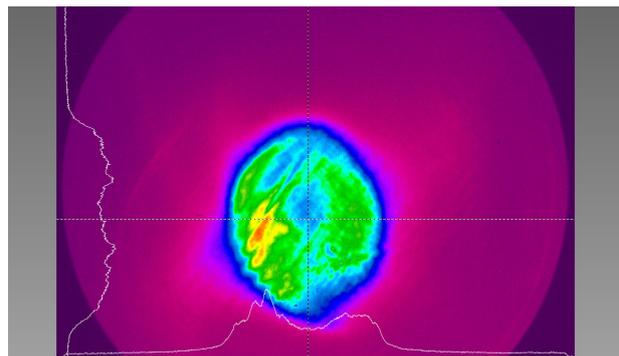


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка генерации N_2 -лазера при накачке продольным индукционно-электрическим разрядом. Наличие наклонных полос связано с интерференцией излучения на передней и задней поверхностях элементов резонатора (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

на рис. 2, *a*), а энергия генерации снижалась до 0,06 мДж.

Снижение энергии генерации азота может быть объяснено тем, что при смене полярности включения индуктора ток разряда начинает протекать преимущественно через обводной канал. В данном случае при обратном включении индуктора направление тока индукционного разряда в обводном канале совпадает с продольным электрическим. В связи с этим увеличивается длина активной области протекания разряда, что приводит к общему уменьшению силы тока. При этом условия для возникновения лазерной генерации достигаются на небольших участках лазерной трубки между юстировочными узлами и замкнутым контуром индукционного разряда (см. рис. 1). При понижении давления до 2...3 торр смена полярности индуктора не приводила к столь заметным изменениям, энергия генерации уменьшалась с 0,17 до 0,12 мДж. Вероятно, это связано с тем, что при пониженном давлении и малой концентрации частиц линии тока индукционного и электрического разрядов могут быть пространственно разделены (за счет увеличения длины свободного пробега электронов лавины от индукционного и электрического разрядов могут не перекреститься). Для детального исследования влияния тока индукционного разряда на характеристики генерации УФ азотного лазера планируется организация сравнительных экспериментов с накачкой азота продольным электрическим разрядом в трубке с таким же диаметром и активной длиной, но без обводного канала.

Заключение

Накачка азота индукционно-электрическим разрядом по сравнению с традиционным продольным электрическим разрядом обеспечивает высокую однородность разряда при повышенных давлениях, позволяя увеличить энергию генерации, а также использовать разрядные трубки больших диаметров без потери качества лазерного пучка.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 23-22-00116).

Список литературы

1. *Kartashov D.V., Alisauskas S., Pugžlys A., Shneider M.N.* Theory of a filament initiated nitrogen laser // *J. Phys. B.* 2015. V. 48, N 9. P. 1–15.
2. *Ahmed R., Umar Z.A., Aslam Baig M.* Emission intensity enhancement by re-ionization of Nd:YAG laser-produces plasma using a nitrogen laser // *Laser Phys.* 2019. V. 29, N 5. P. 1–5.
3. *Uno K., Jitsuno T.* Note: Simple 100 Hz N₂ laser with longitudinal discharge tube and high-voltage power supply using neon sign transformer // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. V. 88, N 126110. P. 1–2.
4. *Murray K.K.* Lasers for matrix-assisted laser desorption ionization // *J. Mass. Spectrom.* 2021. V. 56, N 6. P. 1–33.
5. *Bhagwanani N.S., Bhatia C.C., Sharma N., Hemvani N., Chitnis D.S.* Low level nitrogen laser therapy in pulmonary tuberculosis // *Laser Ther.* 2015. V. 24, N 3. P. 209–214.
6. *Hemvani N., Chitnis D.S., Bhagwanani N.S.* Helium-neon and nitrogen laser irradiation accelerates the phagocytic activity of human monocytes // *Photomed. Laser Surg.* 2005. V. 23, N 6. P. 571–574.
7. *Ражев А.М., Чуркин Д.С.* Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т. 86, № 6. С. 479–483.
8. *Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А.* Компактный УФ-азотный лазер с накачкой импульсным индукционным разрядом // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 3. С. 182–185; *Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A.* Compact UV nitrogen laser pumped by a pulsed longitudinal inductive discharge // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 4. P. 414–418.
9. *Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A.* MW peak-power UV inductive nitrogen laser // *Appl. Phys. B.* 2020. V. 126, N 104. P. 1–6.
10. *Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.* A simple analysis of an inductive RF discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. V. 1, N 3. P. 179–186.
11. *Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А.* Азотный лазер с накачкой импульсным продольным электрическим и индукционным разрядами // *Письма в ЖТФ.* 2023. Т. 49, № 20. С. 8–10.

A.M. Razhev, D.S. Churkin, R.A. Tkachenko, I.A. Trunov. **UV nitrogen laser pumped by a pulsed longitudinal inductive-electric discharge.**

Electric discharge nitrogen lasers remain popular sources of UV radiation and find many scientific and practical applications. Currently, some of the requirements for commercial nitrogen lasers are small overall dimensions, high pulse-to-pulse stability, and extended service life. In this paper, a nitrogen laser excited by a pulsed longitudinal inductive-electric discharge is suggested as a source which satisfies such criteria. As a result of the experimental studies, lasing at wavelengths $\lambda_1 = 337.1$ and $\lambda_2 = 357.7$ nm was obtained. The generation energy reached 0.67 mJ with a pulse duration of 20 ns (FWHM) and a nitrogen pressure of 7...8 Torr. Pumping nitrogen only with a longitudinal discharge in an experimental setup with similar parameters led to a decrease in the lasing energy to 0.4 mJ (with the same pulse duration of 20 ns) at a nitrogen pressure of no higher than 5 Torr. Nitrogen lasers with these radiation parameters can be used to treat ophthalmic diseases and tuberculosis.