

04.1;09.2

Азотный лазер с накачкой импульсным продольным электрическим и индукционным разрядами

© А.М. Ражев¹, Д.С. Чуркин^{1,2}, Р.А. Ткаченко^{1,2}¹ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: churkin@laser.nsc.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2023 г.

В окончательной редакции 18 августа 2023 г.

Принято к публикации 20 августа 2023 г.

Впервые предложен и экспериментально реализован метод совместной накачки азота продольным электрическим и индукционным разрядами. Получено лазерное излучение с длинами волн $\lambda_1 = 337.1$ nm и $\lambda_2 = 357.7$ nm. Энергия генерации достигала 0.54 mJ при длительности импульсов 20 ns и давлении азота 6–7 Torr с однородным распределением интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка. Накачка азота только продольным разрядом в системе с аналогичными параметрами приводила к уменьшению энергии генерации до 0.39 mJ (при той же длительности 20 ns, но при давлении азота не выше 5 Torr) и ухудшению качества лазерного пучка.

Ключевые слова: УФ азотный лазер, импульсный индукционный разряд, продольный электрический разряд, энергия генерации.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56338.19635

Азотный лазер в настоящее время остается одним из наиболее востребованных источников мощного короткоимпульсного УФ-излучения [1–3], что подтверждается продолжающимися исследованиями его активной среды и разработкой различных конструкций излучателей и способов возбуждения (см., например, [4–10]). В своих исследованиях мы показали перспективы использования импульсного индукционного разряда как альтернативного метода накачки азотного лазера [11–13]. Индукционный разряд формируется посредством переменного электромагнитного поля в отсутствие электродов внутри активной среды и вследствие этого имеет ряд преимуществ, таких как высокая однородность разряда, возможность использования агрессивных активных сред, большой ресурс работы лазеров.

Ранее нами было разработано несколько различных систем формирования импульсного индукционного разряда, основанных на базе хорошо зарекомендовавших себя схем Блюмляйна, С–С-перезарядки и LC-инвертора [11–13]. При рассмотрении принципа работы системы накачки индукционный разряд, по сути, представляет собой вторичный короткозамкнутый плазменный виток трансформатора, первичной обмоткой которого является индуктор. Данное обстоятельство обуславливает заметные различия в работе системы накачки классического электроразрядного и индукционного лазеров. В последнем случае в электрической схеме требуется наличие внешнего высоковольтного коммутатора. Это может быть водородный тиратрон в качестве единственного коммутатора, как, например, в схемах Блюмляйна и LC-инвертора, а в более сложных схемах, где производится перезарядка одной емкости на другую,

обычно в сочетании с тиратроном используется дополнительный искровой газонаполненный неуправляемый разрядник. В этом случае разрядник выполняет роль разрыва цепи и обеспечивает достижение максимального напряжения на обостряющих емкостях, а при срабатывании запускает колебательный процесс в первичном контуре (формирование переменного тока в индукторе). В традиционных электроразрядных лазерах подобные неуправляемые разрядники не требуются, так как их роль выполняет межэлектродный промежуток.

Для лазера на молекулярном азоте предъявляются повышенные требования к скорости ввода энергии в активную среду, поэтому общее количество вводимой энергии и соответственно величины емкостей в схемах накачки азотных лазеров обычно невелики. При этом внешний коммутатор является источником паразитных потерь, и при малом общем энергозапасе его отрицательное влияние заметно снижает общую эффективность работы схемы вплоть до срыва генерации. Таким образом, целью настоящей работы является разработка новой схемы накачки активной среды индукционного азотного лазера, при которой вместо неуправляемого разрядника используется продольный электрический разряд и тем самым обеспечивается совместная накачка азота импульсным продольным электрическим и индукционным разрядом.

На рис. 1 представлена электрическая схема совместной системы накачки, принцип работы которой аналогичен данным работы [12]. В экспериментах использовался индукционный лазерный излучатель, выполненный из стекла и состоящий из капилляра с внутренним диаметром 8 mm и обводного канала диаметром 20 mm. На излучателе размещался индуктор антенного типа [13],

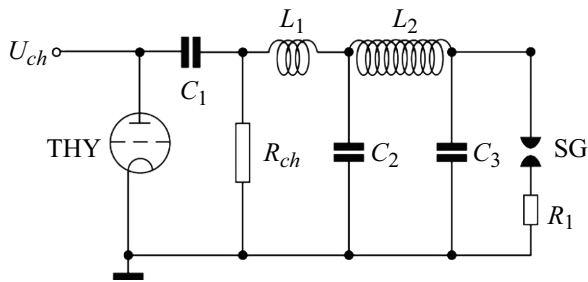


Рис. 1. Электрическая схема системы совместной накачки азота продольным индукционно-электрическим разрядом. ТНУ — тиратрон серии ТПИ1-10к/20, R_{ch} — зарядное сопротивление, L_1 — индуктивность шин системы накачки, $C_1 = 30\text{--}40\text{ нФ}$, $C_2 = C_3 = 3.9\text{ нФ}$, L_2 — индуктор, SG — межэлектродный разрядный промежуток, R_1 — токовый шунт.

выполненный из провода ПВ-3 сечением 1.5 мм^2 . Оптический резонатор лазера был образован задним плоским алюминиевым зеркалом и выходным (кварцевой пластиной из КУ-1), расположенными на металлических юстировочных узлах. Для реализации накачки азота продольным электрическим разрядом данный излучатель включался в электрическую цепь параллельно емкостям C_2 и C_3 . В этом случае продольный электрический разряд зажигался между юстировочными узлами, выполняющими роль полых катода и анода, и таким образом формировался межэлектродный промежуток SG длиной 415 мм . Длина индукционного разрядного промежутка составляла около 300 мм . Зарядное напряжение в экспериментах было равно 24 кВ . В качестве активной среды использовался чистый азот. Эксперименты проводились при частоте следования импульсов 1 Нз .

При совместной накачке азота продольным электрическим и индукционным разрядом была получена лазерная генерация на переходах $0\text{--}0$ ($\lambda_1 = 337.1\text{ нм}$) и $0\text{--}1$ ($\lambda_2 = 357.7\text{ нм}$) 2^+ -системы полос молекул азота (интенсивность излучения полосы $0\text{--}1$ была примерно в 100 раз меньше). Максимальная энергия генерации на этих длинах волн составляла 0.54 мДж и достигалась при давлении азота около $6\text{--}7\text{ Торр}$. КПД от запасенной и вложенной энергии составлял 0.00625 и 0.15% соответственно. Это меньше, чем у оптимизированных электроразрядных азотных лазеров с накачкой продольным разрядом [14], однако конструкция лазера на настоящий момент является неоптимизированной, поэтому величина эффективности также не является максимально достижимой, в результате дальнейших экспериментов она будет увеличена. Импульсы генерации имели колоколообразную форму с длительностью около 20 нс на полувысоте (рис. 2, *a*). Затем индуктор с трубки был удален, и лазерный излучатель накачивался только продольным электрическим разрядом. В данной конфигурации использовались идентичные величины и взаимное расположение емкостей C_2 и C_3 на схеме, одинаковое зарядное напряжение 24 кВ и проведены аналогичные

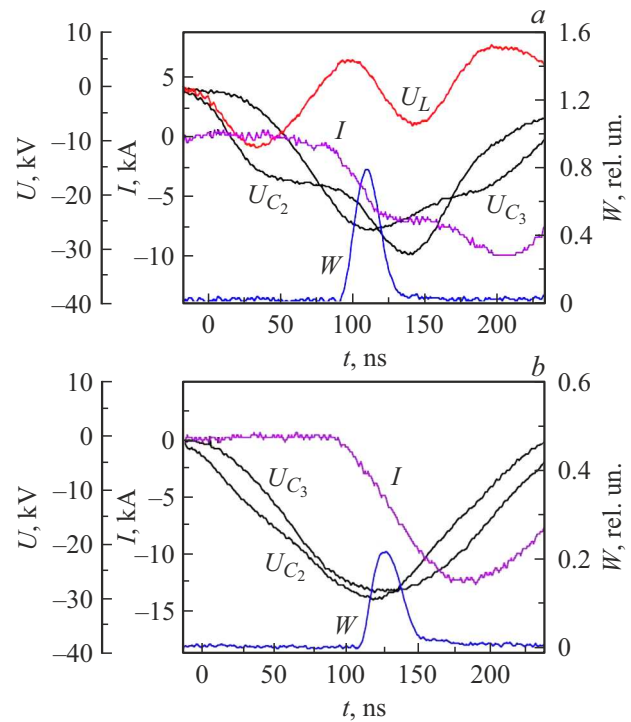


Рис. 2. Импульсы напряжения U на емкостях C_2 и C_3 , напряжения на индукторе U_L , тока разряда I и оптического импульса генерации W . *a* — при совместной накачке продольным индукционным и электрическим разрядом; *b* — при накачке продольным электрическим разрядом.

эксперименты по накачке азота. В таких условиях накачки энергия генерации заметно уменьшалась (до 0.39 мДж) при одновременном снижении оптимального давления до 5 Торр . Длительность и форма импульсов генерации практически не изменялись (рис. 2, *b*).

Были также проведены исследования профилей лазерных пучков в зависимости от конфигурации как для совместной накачки, так и для накачки только продольным разрядом (рис. 3). При совместной накачке распределение интенсивности в поперечном сечении пучка было практически однородным, в то время как при накачке только продольным разрядом лазерное пятно имело неправильную форму с неоднородным распределением интенсивности.

Для детального изучения особенностей характеристик азотного лазера с совместной накачкой планируется организация отдельных исследований. На основании уже полученных экспериментальных данных мы можем предположить следующее. На рис. 2, *a* и *b* приведены осциллограммы напряжений на емкостях C_2 и C_3 , тока продольного электрического разряда I , регистрируемого при помощи токового шунта, и оптического импульса генерации W для совместной накачки и накачки только продольным электрическим разрядом. Видно, что лазерная генерация в обоих случаях начинается на переднем фронте тока электрического разряда I , причем при совместной накачке задержка между началом тока

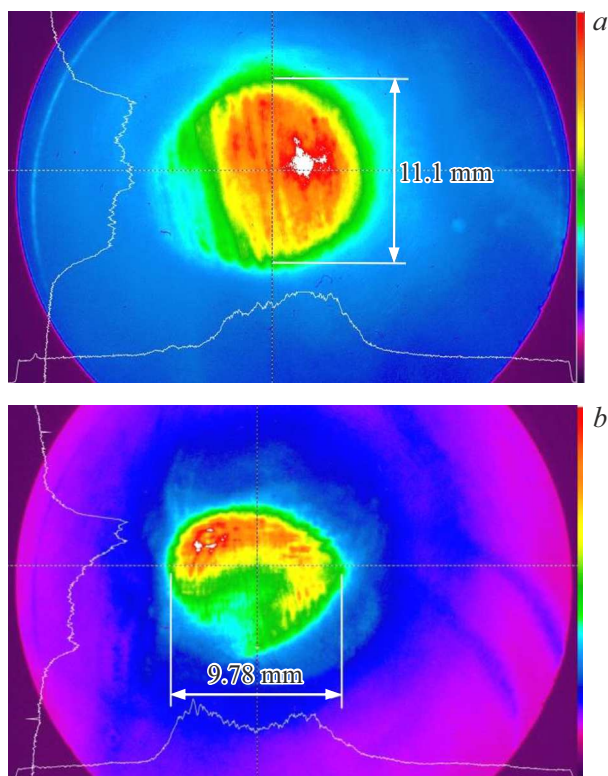


Рис. 3. Профиль поперечного сечения пучка генерации азотного лазера. *a* — при совместной накачке продольным индукционным и электрическим разрядом; *b* — при накачке продольным электрическим разрядом. Полосы на изображениях пучков являются результатом интерференции на поверхностях оптических элементов лазерного резонатора.

разряда и началом генерации заметно меньше. В то же время на этапе зарядки напряжение на емкости C_3 имеет некоторую временную задержку относительно U_{C_2} , в результате чего еще до момента пробоя разрядного промежутка на индукторе возникает напряжение (U_L). Мы полагаем, что в результате этого начинает формироваться импульсный индукционный продольный разряд, который по отношению к продольному электрическому разряду выступает в качестве предионизации. В результате удается повысить рабочее давление азота и, как следствие, увеличить энергию генерации, а также добиться улучшения качества пучка. Для оценки влияния тока непосредственно индукционного разряда на накачку азота необходима организация специальных экспериментальных и теоретических работ, что является целью наших дальнейших исследований.

Таким образом, продемонстрировано преимущество совместной накачки азота импульсным продольным электрическим и индукционным разрядом. Данная схема накачки обеспечивает высокую однородность разряда и хорошее качество лазерного пучка при больших диаметрах разрядной трубки и, как следствие, возможность создания эффективных азотных лазеров для различных практических приложений.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00116).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Khalmanov, S. Ernazarov, A. Muxamedov, N. Toshkuvatova, *ISJ Theor. Appl. Sci.*, **12** (92), 75 (2020). DOI: 10.15863/TAS.2020.12.92.16
- [2] K.K. Murray, *J. Mass Spectrom.*, **56** (6), e4664 (2021). DOI: 10.1002/jms.4664
- [3] А.Ю. Шолохова, А.К. Буряк, *Сорбционные и хроматографические процессы*, **21** (4), 450 (2021). DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3627
- [4] В.А. Kozlov, А.Р. Stepanov, in *2018 Int. Conf. Laser Optics (ICLO)* (IEEE, 2018), p. 106. DOI: 10.1109/LO.2018.8435715
- [5] S. Panahibakhsh, S. Sarikhani, A. Hariri, *Optik*, **168**, 541 (2018). DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.080
- [6] А.В. Пучикин, В.Ф. Лосев, И.Н. Коновалов, Ю.Н. Панченко, *Азотный лазер, возбуждаемый продольным электрическим разрядом*, патент RU 2664780 (2018). <https://findpatent.ru/patent/266/2664780.html>
- [7] А.Н. Panchenko, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, N.A. Panchenko, A.I. Suslov, *Opt. Commun.*, **430**, 210 (2019). DOI: 10.1016/j.optcom.2018.08.014
- [8] M. Naeem, R. Munawar, M. Hussain, T. Imran, A.S. Bhatti, *Majlesi J. Electr. Eng.*, **15** (2), 65 (2021). DOI: 10.52547/mjee.15.2.65
- [9] M. Naeem, T. Imran, R. Munawar, A.S. Bhatti, *J. Electr. Electron. Eng.*, **10** (2), 47 (2022). DOI: 10.11648/j.jeee.20221002.12
- [10] <https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/OSD/OBB/flyers/Laser.pdf>
- [11] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, *Письма в ЖЭТФ*, **86** (6), 479 (2007). [A.M. Razhev, D.S. Churkin, *JETP Lett.*, **86** (6), 420 (2007). DOI: 10.1134/S0021364007180154].
- [12] А.М. Razhev, D.S. Churkin, R.A. Tkachenko, *Appl. Phys. B*, **126** (6), 104 (2020). DOI: 10.1007/s00340-020-07459-8
- [13] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Р.А. Ткаченко, *Оптика атмосферы и океана*, **31** (3), 182 (2018). DOI: 10.15372/AOO20180304
- [14] Ю.И. Бычков, М.Н. Костин, В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, *Приборы и техника эксперимента*, № 4, 228 (1978).