

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.373.826

N2-ЛАЗЕР НА ВОЗДУХЕ С НАКАЧКОЙ ПРОДОЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ

**©2025 г. И. Н. Коновалов^а, Ю. Н. Панченко^а, В. Ф. Лосев^а,
А. В. Пучикин^а, Д. М. Лубенко^{а,*}**

*^аИнститут сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: lubenkodm@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.05.2025 г.

После доработки 11.06.2025 г.

Принята к публикации 27.06.2025 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования азотного лазера с накачкой продольным разрядом, в котором азот заменен на воздух. Сообщается о создании экспериментального образца такого лазера. Возбуждение лазера осуществляется импульсным генератором с инвертированием напряжения в накопительных емкостях, который заряжает разрядные емкости, подключенные к двухсекционной разрядной трубке с внутренним диаметром 6.7–17 мм и длиной одной секции 100–217 мм. Показано, что при давлении воздуха 7–9 мм рт. ст. и его прокачке через разрядную трубку лазер может работать с частотой повторения импульсов до 100 Гц и обеспечивать на длине волны 337.1 нм энергию импульса излучения 0.27–1.9 мДж при его длительности от 4 до 13.5 нс.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для многих приложений лазерного излучения требуются мощные импульсы наносекундной длительности в ультрафиолетовой области спектра. Такое излучение обычно формируется в эксимерных или азотных лазерах. Когда не требуются большие энергии лазерного пучка (единицы мДж), то выгоднее использовать азотный лазер, поскольку он намного проще в обслуживании и дешевле. Данный лазер может использоваться в микроэлектронике, для накачки лазеров на красителях, в спектроскопии и т.д. Продолжающийся интерес исследователей к этому лазеру обусловлен прежде всего его низкой стоимостью, небольшими габаритами и безопасностью используемой газовой среды в отличие, например, от

экимерных лазеров. Генерация в азотном лазере осуществляется на второй положительной системе молекулярного азота с длиной волны 337.1 нм. Лазер может работать с частотой повторения импульсов десятки и сотни герц, обеспечивая наносекундные импульсы генерации с энергией уровня мДж. Для накачки такого лазера используется поперечный [1–5] или продольный разряд [6–16] в азоте низкого давления. Поскольку данный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах, его накачка происходит в течение короткого времени (единицы наносекунд) пока на плазме газового разряда поддерживается высокое напряжение, необходимое для создания инверсной населенности. В связи с этим типичная длительность его импульса генерации составляет 3–5 нс.

Использование в азотном лазере продольной накачки позволяет увеличить длительность импульса генерации по сравнению с поперечной накачкой. Это обусловлено возможностью удерживать высокое напряжение на разрядном промежутке более длительное время за счет большей индуктивности разрядного контура. Так, в работе [7] длительность импульса на уровне половины интенсивности $\tau_{\text{изл}}^{0.5}$ была увеличена до 8 нс, а в работе [13] – до 20 нс. При этом энергия генерации составляла 0.2–1 мДж. Увеличение длительности импульса генерации важно для лазера, поскольку при этом существенно возрастает пространственная когерентность излучения за счет увеличения количества его проходов в резонаторе, т.е. снижается расходимость излучения и, следовательно, квадратично по отношению к ней возрастает интенсивность излучения на мишени при фокусировке пучка, что важно для ряда его приложений. Также следует отметить, что практически все частотные электроразрядные азотные лазеры работают на чистом азоте – как отпаянные, так и с прокачкой газа. Для последнего варианта исполнения лазера требуется баллон с азотом. Упрощение и удешевление лазера, например за счет замены азота на воздух, представляют определенный научный и практический интерес.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования временных и энергетических параметров генерации азотного лазера с продольной накачкой в зависимости от условий накачки, размеров газоразрядной трубки и частоты срабатывания лазера при замене азота на воздух. Сообщается о создании экспериментальных образцов компактного N₂-лазера, работающего на воздухе.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ

Схематическое изображение конструкции лазера и электрическая схема накачки представлены на рис. 1. Газоразрядная камера состояла из двух секций, которые соединялись катодным узлом. Разрядные трубки каждой секции, расположенные между катодом и анодом, были выполнены из плавленого кварца. Внутренний диаметр разрядной трубки выбирался равным от 6.7 до 17 мм, а длина трубки одной секции – от 100 до 217 мм. В узлах крепления анодов устанавливался резонатор лазера, образованный плоским алюминиевым зеркалом и плоскопараллельным окном из плавленого кварца. Катод и аноды были выполнены из медных цилиндров с внутренней резьбой для усиления электрического поля [14, 17]. Для зажигания объемного разряда и создания активной среды использовалась двухконтурная схема. Первый контур состоял из накопительных емкостей $C_1 = 5.4\text{--}7.1$ нФ, $C_2 = 10.8\text{--}16.2$ нФ и коммутатора P на основе тиратрона марки ТПИЗ-10к/25. Второй контур состоял из разрядных конденсаторов $C_3 = 0.7\text{--}1.4$ нФ, соединенных с катодом и анодами каждой секции. Емкости были собраны из конденсаторов марки TDK UHV-6A 2700 пФ 30 кВ и TDK UHV-233A 700 пФ 30 кВ. Первый и второй контуры соединялись коаксиальным кабелем марки РК-50 длиной 1–4 м.

Рис. 1. Схематическое изображение конструкции лазера и электрическая схема накачки

Принцип работы накачки лазера был следующий. После инвертирования напряжения в емкости C_1 , осуществляемого коммутатором P , возникало высокое напряжение, которое прикладывалось ко второму контуру, при этом происходила зарядка разрядных емкостей. За счет создания резко неоднородного электрического поля около электродов разрядной трубки обеспечивалась предварительная ионизация газа, и после достижения пробивного напряжения на разрядных промежутках в секциях трубки зажигался объемный разряд. Для каждого режима возбуждения поддерживалось оптимальное давление воздуха в разрядной трубке. В частотном режиме срабатывания лазера прокачка газа обеспечивалась через цилиндрические катод и аноды с помощью форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ. Регулировка натекания атмосферного воздуха осуществлялась игольчатым клапаном, встроенным в катод.

Разрядные токи регистрировались с помощью токовых шунтов, напряжение на трубках – с помощью резистивных делителей напряжения. Измерение временной формы лазерного излучения проводилось фотодиодом ФЭК-22 СПУ-М с помощью осциллографа Tektronix TDS-3032. Энергия импульсов излучения регистрировалась детектором Gentec Solo PE с измерительной головкой QE25LP-H-MB-D0.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование режимов горения объемного разряда и генерации лазерного излучения в разрядных трубках с внутренними диаметрами 6.7 и 8.5 мм при длине секций трубки 100–120 мм показало, что однородность объемного разряда критична к выбираемым экспериментальным условиям. Для улучшения однородности объемного разряда мы использовали переменное магнитное поле, создаваемое в разрядной трубке двумя соленоидами, навитыми на секции трубки [15, 16]. Индуктивности соленоидов на каждой секции равнялись 3.8 мкГн. Концевые витки соленоидов были соединены с заземленной монтажной пластиной лазера. При протекании тока в разрядной трубке ЭДС взаимной индукции в соленоидах достигала 20 кВ. Под действием напряжения, приложенного к секциям трубки, и вихревого электрического поля, создаваемого соленоидами, формировался продольно-поперечный разряд с однородным распределением плотности плазмы.

При внутреннем диаметре трубки 6.7 мм, длине двух секций по 100 мм, зарядном напряжении на накопительной емкости 23–25 кВ, давлении воздуха 4.5–20 мм рт. ст. генерируемое излучение равномерно распределялось по сечению трубки. Энергия импульсов излучения равнялась 0.27 мДж. С увеличением давления до 40 мм рт. ст. или с уменьшением зарядного напряжения на накопительных емкостях до 20 кВ распределение интенсивности излучения начинало превращаться в кольцо с темным пятном в середине диаметром около 2 мм. При этом устойчивость характеристик разряда и генерируемого излучения наблюдалась при частотах повторения импульсов до 100 Гц. На рис. 2а показаны осциллограммы импульсов тока в секциях разрядной трубки, тока в витках соленоидов, а также осциллограммы импульсов излучения.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U на секциях трубки, токов I в секциях трубки

В трубке с внутренним диаметром 8.5 мм, длиной секций по 120 мм энергия импульсов излучения возрастала до 0.45 мДж при длительности импульсов излучения $\tau_{\text{изл}}^{0.5} \approx 4$ нс. В оптимальном диапазоне давлений 9–15 мм рт. ст. распределение интенсивности излучения имело форму кольца толщиной 2.5–3 мм.

Мы сравнили характеристики разряда и лазерного излучения с магнитным полем соленоидов и без него. В последнем случае концевые витки соленоидов, обращенные к катоду, были отсоединены от монтажной пластины лазера. Соленоиды, соединенные с заземленными анодами, выполняли роль экранов, облегчающих развитие скользящего разряда по внутренней

поверхности трубки. В этом случае для зарядных напряжений на накопительных емкостях 21–25 кВ энергия и мощность импульсов лазерного излучения уменьшились в 1.4 раза.

При дальнейшем увеличении внутреннего диаметра трубки до 11.5 мм при длине каждой секции 200 мм, давлении воздуха 7.6 мм рт. ст. и зарядном напряжении $U_0 = 24$ кВ энергия в импульсе излучения повысилась до 0.65 мДж, а длительность импульса излучения увеличилась до $\tau_{\text{изл}}^{0.5} = 12$ нс. Наложение переменного магнитного поля на продольный разряд приводило к уширению кольцевой области разряда и вследствие этого к уменьшению удельной мощности накачки и снижению энергии генерации. Поэтому в последующих экспериментах с большим диаметром разрядных трубок магнитное поле не использовалось.

В лазере с внутренним диаметром трубки 17 мм, длиной секций по 217 мм при использовании чистого азота были определены условия устойчивого горения объемного разряда длительностью 40 нс при плотности тока до 5 кА/см² и удельной мощности накачки до 10 МВт/см³. Получена энергия генерации 3.5 мДж с длительностью импульсов 18 нс. При заполнении трубки воздухом до давления 7.5 мм рт. ст. и зарядном напряжении на накопительной емкости 25 кВ энергия импульса генерации составила 1.9 мДж, длительность импульса $\tau_{\text{изл}}^{0.5}$ увеличилась до 13.5 нс (рис. 26). В этих режимах разряда плотность тока в кольце разряда достигала 3 кА/см², удельная мощность накачки составляла 3.5 МВт/см³. Зависимость энергии генерируемого импульса излучения от давления воздуха в разрядной трубке и от зарядного напряжения на накопительных емкостях приведена на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость энергии импульса излучения ...

При наблюдении свечения разряда через стенки разрядной трубки столб разряда около катода и анодов, как и в случае использования чистого азота, состоял из диффузных каналов, соединяющихся в область с однородным распределением плазмы. При уменьшении давления газа в разрядной трубке область внутри кольца лазерного излучения начинала заполняться излучением с меньшей плотностью.

Исследование работы лазера показало, что из-за более низкого потенциала ионизации кислорода в молекулах O₂ и H₂O пробивное напряжение на секциях разрядной трубки было меньше, чем в чистом азоте. Вследствие этого уменьшение энергии, запасаемой в емкостях С₃, приводило к снижению мощности накачки лазера. При увеличении давления воздуха в разрядной трубке выше 8 мм рт. ст. с целью достижения более высоких пробивных напряжений в положительном столбе разряда нарастали неоднородности. Изменение влажности

атмосферного воздуха не оказывало заметного влияния на характеристики разряда и генерируемого излучения.

Длительная работа лазера с внутренним диаметром разрядной трубки 17 мм была исследована при частотах повторения импульса f до 50 Гц. При прокачке воздуха через трубку замена его объема проводилась до 50 раз/с. При зарядных напряжениях на накопительных емкостях $U_0 = 20\text{--}25$ кВ и частоте срабатывания лазера до 20 Гц энергия и форма импульсов генерируемого излучения изменялись незначительно. С увеличением частоты f до 50 Гц при количестве импульсов $N \leq 5000$ напряжение пробоя в трубке и амплитуда импульсов лазерного излучения не изменялись, однако длительность импульсов излучения уменьшалась с 13.5 нс до 12–12.5 нс. При увеличении количества импульсов $N > 5000$ как длительность, так и амплитуда импульсов излучения постепенно снижались, что приводило к уменьшению энергии генерации (рис. 4). После перерыва в работе лазера в течение 5–10 с характеристики импульсов излучения восстанавливались до получаемых при частотах $f = 1\text{--}20$ Гц. При работе лазера с частотой $f = 50$ Гц в спектре излучения разряда наблюдались полосы свечения окислов азота. Поглощение лазерного излучения окислами азота, нарабатываемыми при длительной работе лазера, является одной из возможных причин снижения энергии импульсов излучения при работе лазера на воздухе [18].

Рис. 4. Зависимость энергии импульса излучения от количества импульсов N...

При разборке секций разрядной трубки после длительной работы лазера на внутренней поверхности острейного цилиндрического катода наблюдались следы равномерного прогрева, проникающие в цилиндр на глубину до 10 мм с каждой его стороны. Охлаждение катода и анодов проточной водой не приводило к заметному влиянию на параметры генерации лазера.

На основе проведенных исследований был создан экспериментальный образец N2-лазера (рис. 5).

Рис. 5. Вид экспериментального образца N2-лазера с продольной накачкой.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования азотного лазера с накачкой продольным разрядом, в котором азот заменен на воздух. Для возбуждения лазера использовался двухконтурный импульсный генератор с накопительными и разрядными емкостями. Для зажигания объемного разряда использовалась предварительная ионизация газа в резко неоднородном электрическом поле около электродов разрядной трубки. При этом в

зависимости от конструкции разрядных секций и параметров накачки можно было формировать однородную плазму по всему объему трубки, либо в виде кольца у ее стенок в диапазоне давлений воздуха от 4 до 15 мм рт. ст. Получены импульсы излучения на длине волны 337.1 нм с энергией 0.4–1.9 мДж и длительностью на уровне половины интенсивности 4–13.5 нс. Показана возможность длительной работы лазера с частотой повторения импульсов 50–100 Гц при прокачке воздуха через разрядную трубку. Разработан и создан экспериментальный образец компактного воздушного N₂-лазера. Данный образец обеспечивает параметры генерации, сопоставимые с лазером на чистом азоте. При этом он отличается простотой конструкции и обслуживания, что может расширить возможности его применения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2021-0014).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // Квантовая электроника. 1973. Т. 3. № 15. С. 103.
2. Бычков Ю.И., Загулов Ф.Я., Кутелев А.Ф., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 9. С. 2103.
3. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 10. С. 2285.
4. Ражев А.М., Телегин Г.Г. // Зарубежная радиоэлектроника. 1978. Т. 3. С. 76.
5. Panchenko A.N., Suslov A.I., Tarasenko V.F., Konovalov I.N., Tel'minov A.E. // Physics of Wave Phenomena. 2009. V. 17. № 4. P. 251. <https://doi.org/10.3103/S1541308X09040037>
6. Furuhashi H., Goto T. // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59. № 12. P. 2552. <https://doi.org/10.1063/1.1139896>
7. Бычков Ю.И., Костин М.Н., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 1978. № 4. С. 228.

8. Горлов А.И., Кюн В.В., Скоз В.С., Токунов Ю.М. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 9. С. 1781.
9. Бакиит Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 12. С. 1087.
10. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Тарасов Н.С. // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т. 2. № 4. С. 113.
11. Tsuchida H., Uno K., Akitsu T., Jitsuno T. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. No. 4. P. 043106. <https://doi.org/10.1063/1.4979805>
12. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Тарасов Н.С. // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 20. С. 8. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.20.56338.19635>
13. Коновалов И.Н., Панченко Ю.Н., Пучикин А.В., Лосев В.Ф., Бобровников С.М. // Изв. ВУЗов, Физика. 2019. Т. 62. № 9. С. 139. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/9/139>
14. Панченко Ю.Н., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Пучикин А.В. РФ Патент 2664780 С1, 2018.
15. Коновалов И.Н., Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф., Пучикин А.В. РФ Патент 206537, 2021.
16. Панченко Ю.Н., Коновалов И.Н., Пучикин А.В., Андреев М.В. РФ Патент 232324, 2025.
17. Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Визирь В.А., Коновалов И.Н., Бакиит Е.Х., Червяков В.В. // ПТЭ. 1997. № 6. С. 86.
18. Mintoussov E.I., Pendleton S.J., Gerbault F.G., Popov N.A., Starikovskaia S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 285202. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/285202>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схематическое изображение конструкции лазера и электрическая схема накачки: C_1 и C_2 – накопительные емкости, C_3 – разрядные емкости, P – коммутатор, L_0 – зарядная индуктивность.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U на секциях трубки, токов I в секциях трубки и в витках соленоидов, импульса лазерного излучения: **а** – $P_{\text{воздуха}} = 15$ мм рт. ст., $C_1 = 0$ нФ, $C_2 = 3.4$ нФ, $C_3 = 0.7$ нФ, $U_0 = 25$ кВ, $E_{\text{изл.}} = 0.27$ мДж; **б** – $P_{\text{воздуха}} = 7.5$ мм рт. ст., $C_1 = 7.1$ нФ, $C_2 = 16.2$ нФ, $C_3 = 2.8$ нФ, $U_0 = 25$ кВ, $E_{\text{изл.}} = 1.9$ мДж.

Рис. 3. Зависимость энергии импульса излучения от давления воздуха в трубке p при $U_0 = 25$ кВ (**а**) и от зарядного напряжения на накопительных емкостях U_0 при $p = 9$ мм рт. ст. (**б**) ($C_1 = 7.1$ нФ, $C_2 = 16.2$ нФ, $C_3 = 2.8$ нФ).

Рис. 4. Зависимость энергии импульса излучения от количества импульсов N при различных частотах срабатывания лазера, $U_0 = 20$ кВ.

Рис. 5. Вид экспериментального образца N2-лазера с продольной накачкой. Внутренний диаметр трубки 17 мм, длина секций 217 мм, $E_{\text{изл.}} = 1.9$ мДж.

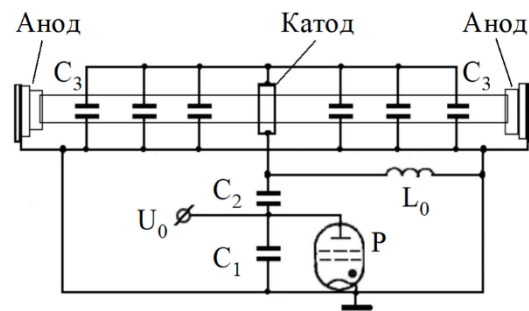


Рис. 1.

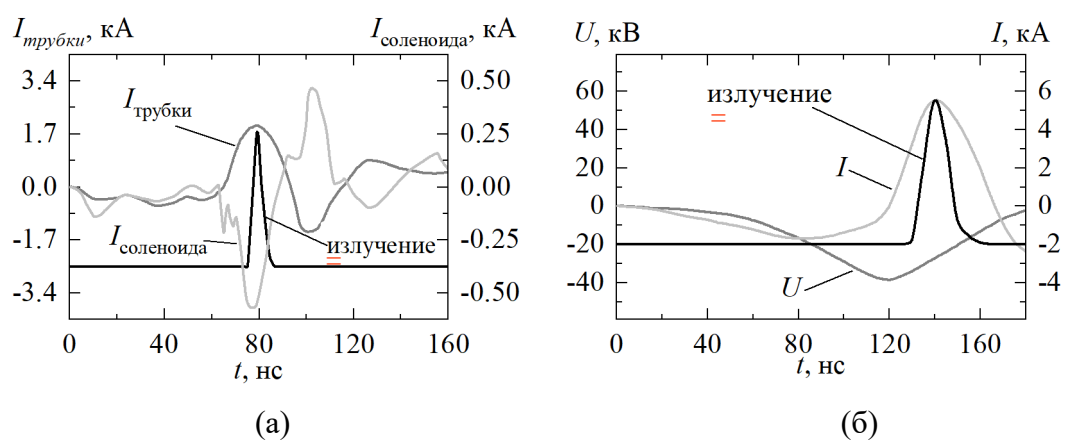
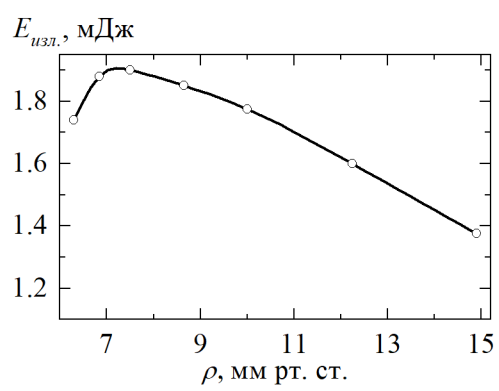
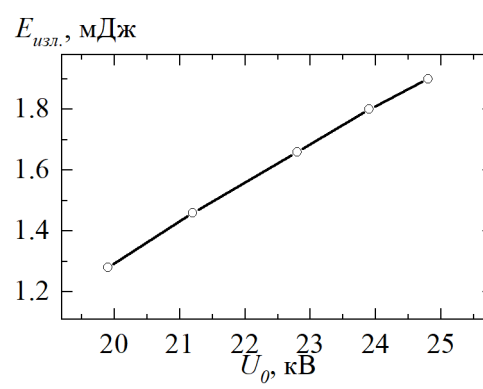


Рис. 2.



(a)



(б)

Рис. 3.

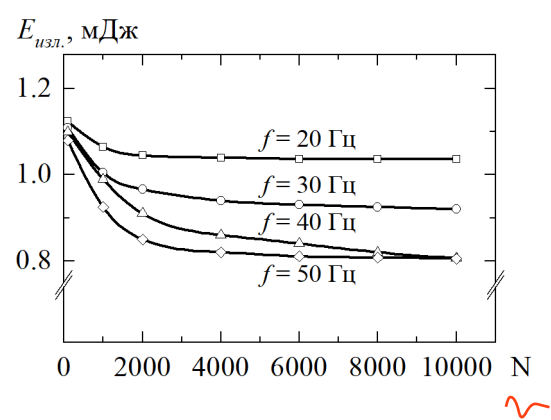


Рис. 4.



Рис. 5.