

## Компактный УФ азотный лазер с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом

А.М. Ражев<sup>1,2</sup>, Д.С. Чуркин<sup>1,3</sup>, Р.А. Ткаченко<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 26.12.2017 г.

Впервые сообщается о создании компактного излучателя индукционного азотного лазера ( $\lambda = 337,1$  нм) с накачкой активной среды импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа. В созданном индукционном излучателе энергия генерации достигает 0,35 мДж. Длительность импульсов генерации составляет  $(25 \pm 5)$  нс на полувысоте в зависимости от добротности резонатора. При использовании полуconfокального резонатора удалось получить профиль пучка генерации, близкий к гауссовому.

*Ключевые слова:* импульсный, индукционный разряд трансформаторного типа, компактный азотный лазер, высокая стабильность работы лазера, гауссова форма пучка; pulsed, inductive discharge of the transformer type, compact nitrogen laser, high operation stability, Gaussian profile of laser beam.

### Введение

Современные тенденции к миниатюризации лазерных установок обуславливают необходимость создания компактных лазерных излучателей с относительно малыми активными объемами и поперечным сечением лазерного пучка. При создании компактных газовых лазеров часто применяются продольный импульсный и непрерывный электрический или ВЧ-разряды [1–3].

В работах [4–8] мы продемонстрировали возможности импульсного индукционного разряда как альтернативного метода накачки лазерных активных газовых сред. В этих исследованиях использовался индукционный разряд цилиндрической формы, вследствие чего главной отличительной особенностью созданных лазеров стала кольцевая форма пятна генерации. Кроме того, лазеры демонстрируют высокую стабильность работы (отклонение энергии генерации от импульса к импульсу обычно не превышает 0,5–5,0% в зависимости от типа лазера) и малую расходимость лазерной генерации. Также мы показали, что максимальные энергия генерации и КПД лазера при накачке импульсным индукционным разрядом цилиндрического типа достигаются при относительно большом поперечном сечении разрядной трубки (внутренний диаметр  $\sim 35 \div 45$  мм). Однако при создании компактных индукционных лазеров более под-

ходящим представляется использовать для накачки активных газовых лазерных сред индукционный продольный разряд трансформаторного типа.

Известно несколько работ по созданию подобных лазеров непрерывного и квазинепрерывного действия, работающих на переходах ионов галогенов и благородных газов [9–11]. В них в качестве источников питания использовались ВЧ-генераторы мощностью до нескольких киловатт, обеспечивающие падение напряжения на индукторе до 1–2 кВ. Такие параметры вполне достаточны для накачки ионных лазеров или лазеров на колебательно-вращательных переходах молекул, но недостаточны для накачки лазеров на самоограниченных переходах, например азотного лазера.

Азотный лазер — один из наиболее востребованных источников мощного импульсного УФ-излучения, применяемых на практике, в том числе в медицине для лечения туберкулеза [12]. На сегодняшний день на рынке представлено несколько коммерческих моделей азотных лазеров, отличающихся параметрами излучения и массогабаритными характеристиками. Однако энергия большинства моделей не превышает 0,1–0,2 мДж. Несмотря на химическую инертность активной среды, эти лазеры имеют довольно ограниченный ресурс в первую очередь из-за эрозии электродов в процессе работы.

Такие преимущества использования индукционного разряда, как отсутствие каких-либо электродов в активной среде и отсутствие горения разряда в непосредственной близости от стенок разрядной трубки, позволяют существенно увеличить сроки

\* Александр Михайлович Ражев (razhev@laser.nsc.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Роман Андреевич Ткаченко (romaremy@yandex.ru).

службы газовых лазеров. В случае химически инертных активных лазерных сред (например, азотный лазер, лазер на переходах нейтральных атомов или ионов благородных газов) ресурс лазера практически неограничен.

В литературе нам не удалось найти сведений о создании азотных лазеров с накачкой индукционным продольным разрядом, а в своих прежних работах для возбуждения азота мы использовали индукционный разряд цилиндрического типа. Поэтому целью настоящей работы стало исследование возможности создания компактного УФ азотного лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа.

## Экспериментальная установка

Для проведения исследований была разработана и собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Электрическая высоковольтная система накачки была выполнена по схеме Блюмляйна [7].

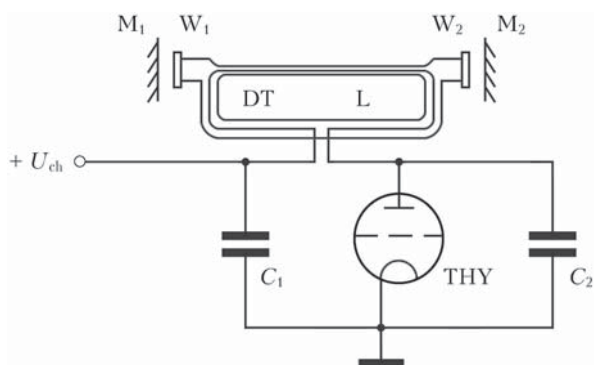


Рис. 1. Электрическая схема системы накачки индукционного разряда трансформаторного типа: ТНУ – тиратрон серии ТПИ1-10к/50; L – индуктор (антенна);  $C_1 = 30$  нФ,  $C_2 = 55$  нФ; DT – разрядная трубка;  $W_1$  и  $W_2$  – подложки из  $\text{CaF}_2$ ;  $M_1$  и  $M_2$  – зеркала резонатора; зарядное напряжение  $U_{\text{ch}} = 20\text{--}30$  кВ

Индукционным лазерным излучателем служила стеклянная трубка с капилляром и обводным каналом. Такая конструкция обеспечивала протекание тока по замкнутому контуру, при этом рабочая область была образована капилляром диаметром 3 и длиной 250 мм для достижения высокой плотности тока, а диаметр обводного канала был значительно больше (20 мм) для снижения полного сопротивления контура. В качестве индуктора применялся набор медных изолированных проводов сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ , установленных жгутами по 4 штуки вдоль разрядного контура. В литературе такой индуктор называется антенной. Вдоль оптической оси осуществлялась прокачка газа с небольшой ( $\sim 1$  л/мин) скоростью.

На торцах трубки перпендикулярно оптической оси в юстировочных узлах располагались плоскопараллельные пластины, выполненные из кристаллов  $\text{CaF}_2$ . Использовался внешний резонатор, либо образованный двумя плоскими диэлектрическими зерка-

лами с коэффициентами отражения 99,9 и 40% на длине волны 337,1 нм, либо полуконфокальный, в котором плотное заднее зеркало заменялось сферическим алюминиевым с фокусным расстоянием 110 см.

Спектральные характеристики спонтанного и лазерного излучения азота в импульсном продольном разряде трансформаторного типа измерялись спектрометром S150 фирмы Solar Laser Systems. Электрические импульсы системы возбуждения регистрировались высоковольтными датчиками Tektronix P6015A и осциллографом Tektronix 2024. Энергетические характеристики генерации регистрировались при помощи дисплея Ophir Nova с измерительной головкой PE-50-BB. Исследования профиля лазерного пучка проводились методом сканирования лазерного пятна диодной линейкой Toshiba TCD 1304AP.

## Результаты и обсуждение

В экспериментах в качестве активной среды использовался чистый азот. Зарядное напряжение изменялось в пределах 20–25 кВ. Индукционный разряд наблюдался при давлениях до 10 торр. Впервые была получена УФ лазерная генерация на переходах  $2^+$  системы полос азота при накачке азота импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа при давлениях около 0,2–4,5 торр. На рис. 2 приведена зависимость энергии генерации лазера от давления азота при зарядном напряжении 25 кВ.

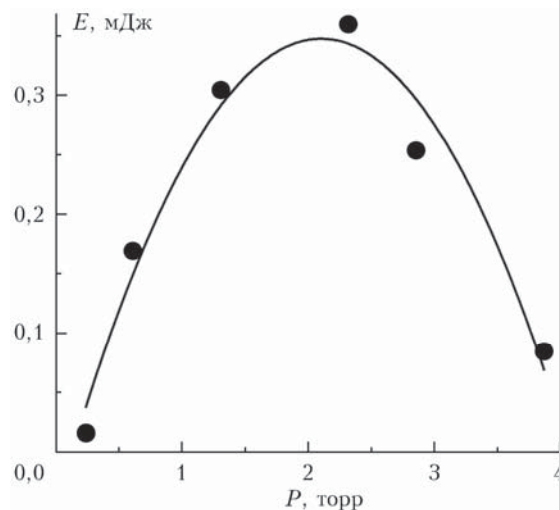


Рис. 2. Зависимость энергии генерации азотного лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа от давления азота;  $U_{\text{ch}} = 25$  кВ

Максимальная энергия генерации ( $\sim 0,35$  мДж) была достигнута при давлении, близком к 2,3 торр. Такое давление примерно соответствует оптимальному и при использовании импульсного цилиндрического индукционного разряда.

Исследования спектра спонтанного и лазерного излучения при накачке азота импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа показали, что состав спектра в целом близок

к аналогичному при накачке азота импульсным индукционным разрядом цилиндрического типа [13]. ИК-излучение, соответствующее низкорасположенным переходам  $1^+$  системы полос молекул азота, отсутствовало, вместо этого мы наблюдали типичное для накачки импульсным индукционным разрядом излучение в видимой области, соответствующее высоколежащим подуровням перехода  $B \rightarrow A$   $1^+$  системы, называемое свечением Льюиса–Рэля. Генерация в данной конструкции лазерного излучателя возникла только на длине волны 337,1 нм, соответствующей переходу  $C(\nu = 0) \rightarrow B(\nu = 0)$   $2^+$  системы полос молекул азота.

Исследования временных характеристик генерации на переходах  $2^+$  системы полос молекул азота показали, что длительность импульсов на полувысоте в зависимости от добротности резонатора может превышать 20 нс (рис. 3), что примерно равно времени жизни верхнего лазерного уровня.

В ходе эксперимента исследовались пространственные характеристики генерации азотного лазера методом сканирования поперечного профиля пучка диодной линейкой с шагом 0,25 или 0,5 мм.

На рис. 4, *a–в* показаны профили лазерного пятна при различной добротности резонатора.

В отсутствие резонатора профиль пятна имел неправильную форму, а также два побочных пика, вызванных, по нашему предположению, распространением луча под углом к оптической оси в результате

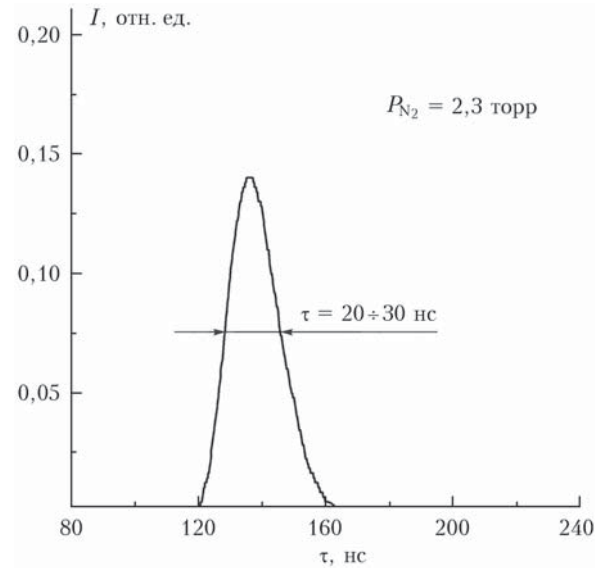


Рис. 3. Временная зависимость интенсивности  $I$  импульса генерации азотного лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа; длительность импульса генерации  $\tau$  измерена на полувысоте

тате переотражения от стенок трубки вследствие наличия клина между поверхностями герметизирующих подложек.

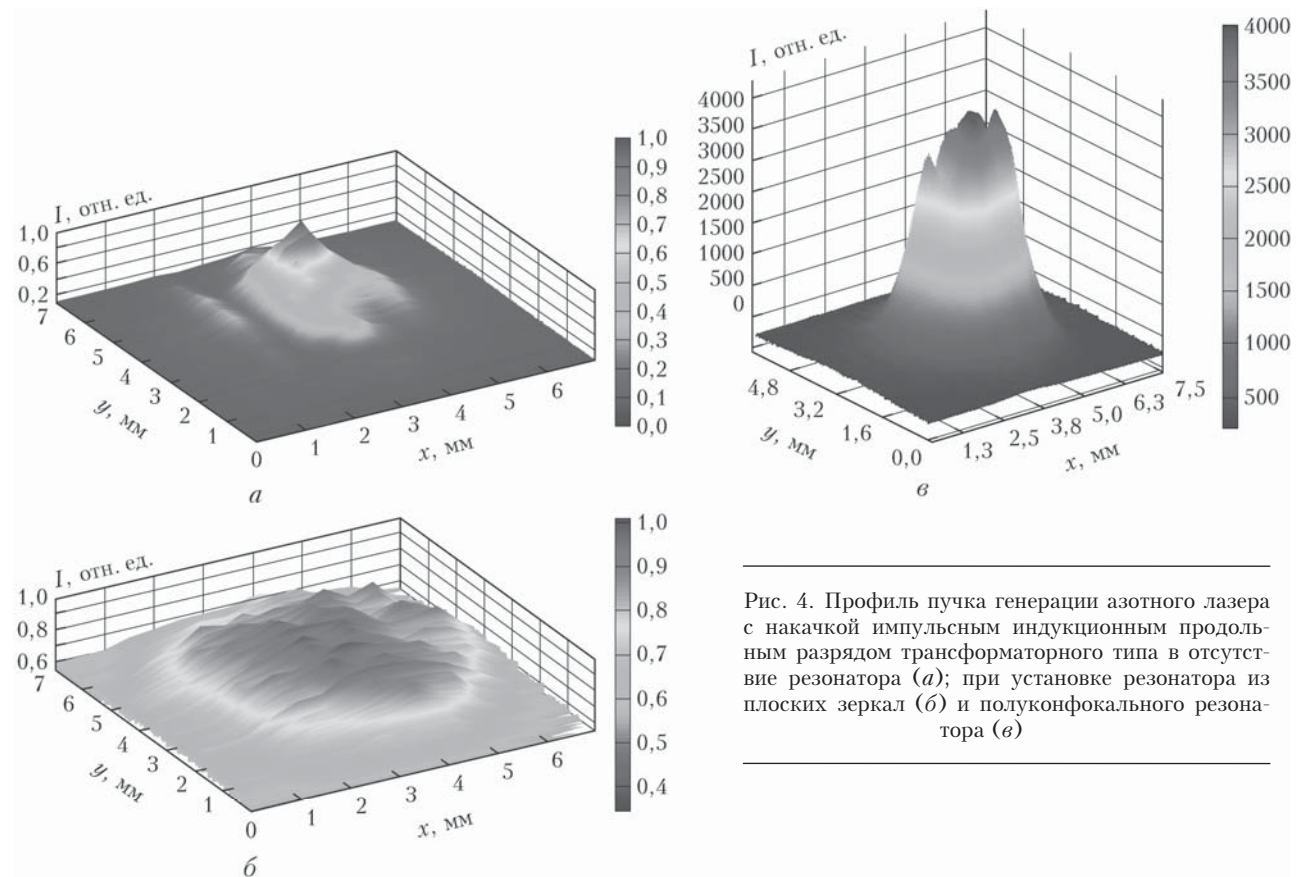


Рис. 4. Профиль пучка генерации азотного лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа в отсутствие резонатора (*a*); при установке резонатора из плоских зеркал (*b*) и полуконфокального резонатора (*в*)

При установке резонатора, составленного из двух плоскопараллельных зеркал (переднее полупрозрачное и заднее плотное зеркала на длину волны 337,1 нм), распределение интенсивности по сечению становилось более однородным. В этом же резонаторе была получена максимальная энергия генерации 0,35 мДж.

В случае полуконфокального резонатора распределение интенсивности по сечению профиля пучка становилось близким к гауссовому. Однако и в этом случае наблюдались некоторые неоднородности, вызванные побочным переотражением излучения, как и в отсутствие резонатора. Поэтому одной из наших дальнейших задач мы видим доработку конструкции лазерного излучателя с целью исключения влияния качества герметизирующих подложек.

### Заключение

В результате проведенных исследований впервые создан компактный излучатель индукционного азотного лазера ( $\lambda = 337,1$  нм) с накачкой активной среды импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа. Лазерная генерация на переходах  $2^+$  системы полос азота получена при давлениях  $\sim 0,2-4,5$  торр; энергия генерации достигает 0,35 мДж; длительность импульсов генерации в зависимости от добротности резонатора составляет  $(25 \pm 5)$  нс на полувысоте. При использовании полуконфокального резонатора удалось получить профиль пучка генерации, близкий к гауссовому.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-02-00316.

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

The creation of a compact emitter for an inductive nitrogen laser ( $\lambda = 337.1$  nm) with the active medium pumped by a pulsed inductive longitudinal discharge of the transformer type is reported for the first time. In the inductive laser head created, the lasing energy attains 0.35 mJ and the lasing pulse length is  $(25 \pm 5)$  ns (FWHM) depending on the resonator  $Q$ -factor. The use of a semiconfocal cavity provides for a near-Gaussian beam profile.

1. URL: <http://www.ltb-berlin.de/assets/uploads/lasers-datasheet.pdf> (last access: 25.12.2017).
2. Газовый лазер щелевого типа: Пат. 2273116. Россия, МПК, H 04 S 3/00. Орлов К.Е., Дутов А.И., Малик Д.А., Смирнов А.С., Старовойтов А.В.; НЕВИНПАТ. № 2004112289/28; Заявл. 23.04.2004; Опубл. 27.03.2006, Бюл. № 9.
3. URL: <http://www.plasmalabs.ru/category/index/id/18> (last access: 25.12.2017).
4. Ражев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С. FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, вып. 5. С. 290–294.
5. Ражев А.М., Чуркин Д.С. Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86, вып. 6. С. 479–483
6. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Завьялов А.С. Импульсный индукционный лазер на молекулярном водороде // Вестн. НГУ. Физика. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 12–19.
7. Razhev A.M., Churkin D.S. Pulsed inductive discharge CO<sub>2</sub> laser // Opt. Commun. 2009. V. 282, N 7. P. 1354–1357.
8. Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S. Chemical HF laser with pulsed inductive discharge initiation // Laser Phys. Lett. 2013. V. 7, N 10. P. 075002.
9. Bell W.E. Ring discharge excitation of gas ion lasers // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 7, N 7. P. 190–191.
10. Goldborough J.P., Hodges E.B., Bell W.E. RF induction excitation of CW visible laser transitions in ionized gases // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8, N 6. P. 137–139.
11. Zhu P., Boswell R.W. A new argon-ion laser based on an electrodeless plasma // J. Appl. Phys. 1990. V. 6, N 5. P. 1981–1984.
12. URL: <http://www.aetechnologies.ru/dev/14-details.htm> (last access: 25.12.2017).
13. Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S. Characteristics of the inductive nitrogen laser // Opt. Commun. 2016. V. 367. P. 244–248.