

Неоновый лазер с длинами волн 540,1 и 614,3 нм с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом

А.М. Ражев¹, Д.С. Чуркин^{1,2}, И.А. Трунов¹, Р.А. Ткаченко^{1,2*}

¹ Институт лазерной физики СО РАН

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Поступила в редакцию 18.02.2022 г.

Сообщается о результатах исследования особенностей спектральных, временных и пространственных характеристик излучения нейтральных атомов неона при накачке импульсным индукционным цилиндрическим разрядом. Получена лазерная генерация на длинах волн 540,1 и 614,3 нм с длительностью оптических импульсов на уровне 13 ± 1 и 5 ± 1 нс (FWHM) соответственно. Показано, что лазерный пучок в поперечном сечении имеет форму кольца диаметром $33,1 \pm 0,1$ мм и шириной $5,6 \pm 0,1$ мм. При этом распределение интенсивности неоднородно по сечению пучка и имеет зернистую структуру, характерную для лазеров, работающих в режиме усиленного спонтанного шума. Зернистая структура пятна излучения имела ярко выраженную радиальную симметрию, которая, по нашему предположению, обусловлена характером электрического поля в цилиндрическом индукционном разряде.

Ключевые слова: импульсный индукционный разряд цилиндрического типа, NeI-лазер, форма лазерного пучка, усиленный спонтанный шум; inductive pulsed cylindrical discharge, NeI laser, laser beam shape, amplified spontaneous emission.

Введение

На сегодняшний день лазерные источники видимого диапазона длин волн активно используются во многих сферах и направлениях человеческой деятельности благодаря уникальным свойствам лазерного излучения. Одно из таких направлений — области медицины, касающиеся вопросов омоложения кожи, удаления злокачественных и доброкачественных новообразований и опухолей, послеоперационного восстановления и т.д. [1]. Излучение видимого диапазона может использоваться в организации оптической связи и дистанционного мониторинга участков неба благодаря существованию окон прозрачности земной атмосферы и малого рассеяния на ее неоднородностях [2]. Наиболее активное и широкое применение для этих целей нашли твердотельные лазеры, жидкостные лазеры на красителях и интенсивное импульсное световое излучение (IPL) видимого диапазона длин волн.

Однако любая активная лазерная среда или метод возбуждения имеют свои фундаментальные и технические ограничения и особенности, влияющие как на основные параметры накачки, так и на характе-

ристики получаемого излучения. В связи с этим актуален поиск альтернативных методов возбуждения активных лазерных сред, которые позволят реализовать механизмы формирования инверсии населенности, отличающиеся от широко распространенных механизмов в известных методах накачки, и принесут свои особенности. Вместе с поиском альтернативных методов накачки важно исследование характеристик генерации, определяющих возможности прикладного применения лазерного излучения и необходимые параметры преобразующих его систем.

К настоящему времени опубликовано достаточно большое количество экспериментальных работ по созданию индукционных лазеров на переходах атомов и ионов газов [3], а также результатов численных оценок, показывающих принципиальную возможность создания эффективных лазеров на парах металлов, в частности меди [4, 5], при использовании индукционного ВЧ-разряда. Продemonстрирована возможность применения безэлектродных разрядов и в непрерывном режиме работы [6].

Одним из представителей безэлектродных методов накачки является импульсный индукционный разряд, формирующийся благодаря индукции электромагнитного поля при протекании переменного электрического тока по индукторам, не имеющим прямого контакта с активной лазерной средой. При накачке лазерных сред импульсным индукционным разрядом ранее была получена генерация на переходах атомов и молекул различных газов [7].

* Александр Михайлович Ражев (razhev1950@mail.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Игорь Александрович Трунов (trunov.igor1998@gmail.com); Роман Андреевич Ткаченко (tkachenkora23@yandex.ru).

В настоящей работе в качестве активной среды, позволяющей генерировать лазерное излучение в видимом спектральном диапазоне, пригодном для обсуждаемых применений, выступает инертный газ неон. Согласно [8, 9] для накачки неона использовались различные методы возбуждения в импульсно-периодическом и непрерывном режимах в двух- и трехкомпонентных смесях неона с такими газами, как гелий, аргон, криптон, молекулярный водород и др. Однако применение безэлектродного импульсного индукционного разряда для возбуждения инертной активной среды неона позволит создать относительно компактные и перестраиваемые лазерные системы с большим сроком службы.

Впервые генерация лазерного излучения с длинами волн $\lambda = 540,1; 594,4$ и $614,3$ нм на переходах $3p \rightarrow 3s$ нейтральных атомов неона при накачке импульсным индукционным цилиндрическим разрядом была получена в [10].

Цель настоящей работы — проведение дополнительных исследований, касающихся особенностей временных и пространственных характеристик генерации индукционного NeI-лазера.

1. Экспериментальная установка

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, описанная в [10]. Основное отличие настоящей работы от [10] — использование индукционного излучателя меньшего диаметра (внутренний диаметр — 34, внешний — 40 мм) и другого индуктора, который был образован 34 катушками (2,5 витка каждая), выполненными из медных шин сечением $4,5 \times 0,5$ мм². Резонатор общей длиной 1,2 м был образован задним плоским алюминиевым зеркалом и передней герметизирующей подложкой. Частота следования импульсов лазера в экспериментах составляла 1 Гц. Прокачка газа производилась вдоль оптической оси разрядной трубки со скоростью ~ 1 л/мин.

Временные характеристики генерации регистрировались при помощи коаксиального фотоэлемента ФЭК-15 с временным разрешением до 10^{-10} с. Регистрация электрических сигналов происходила при помощи высоковольтных щупов Printek ACA-6039 и цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014B. Изучение пространственных характеристик лазерного пучка проводилось при помощи цифрового профилометра OphirSpiricon L110059 с областью спектральной чувствительности 190–1150 нм. Из-за того, что апертура камеры OphirSpiricon L110059 не позволяла регистрировать пятно лазерного излучения целиком, профиль пучка исследовался в два этапа. Для детального изучения его структуры на матрицу камеры подавалась часть кольца лазерного излучения. Для регистрации общего вида лазерного пятна пучок фокусировался на матрицу линзой из кварца КУ-1 с фокусным расстоянием 60 см. Для ослабления интенсивности излучения применялись различные оптические светофильтры. В ряде случаев, при необходимости уточнения отдельных пара-

метров пучка, допускалось пересвечивание матрицы измерительного прибора (регистрируемая интенсивность превышала максимальный предел чувствительности).

2. Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования проводились как в чистом неоне, так и в смесях $\text{Ne}:\text{NF}_3$ в соотношениях, близких к (250–500):1. В этих условиях лазерная генерация была получена на $\lambda = 540,1$ и $614,3$ нм. Аналогично [10] генерация на $\lambda = 540,1$ нм наблюдалась при давлениях неона в диапазоне $5 \div 18$ торр, при этом оптимальным было давление $\sim 13 \div 14$ торр.

Изучение временных характеристик показали, что импульс генерации, как правило, состоит из двух пиков, расстояние между которыми в среднем составляет $7 \div 8$ нс (рис. 1). Распределение интенсивности в каждом из пиков изменялось от импульса к импульсу. В одних и тех же условиях накачки можно было получить максимальную интенсивность в первом или втором пике оптического импульса или же их интенсивности были сравнимы. В редких случаях (преимущественно при оптимальном давлении) импульс генерации мог состоять из трех пиков, но при этом интенсивность третьего пика всегда была значительно ниже двух первых.

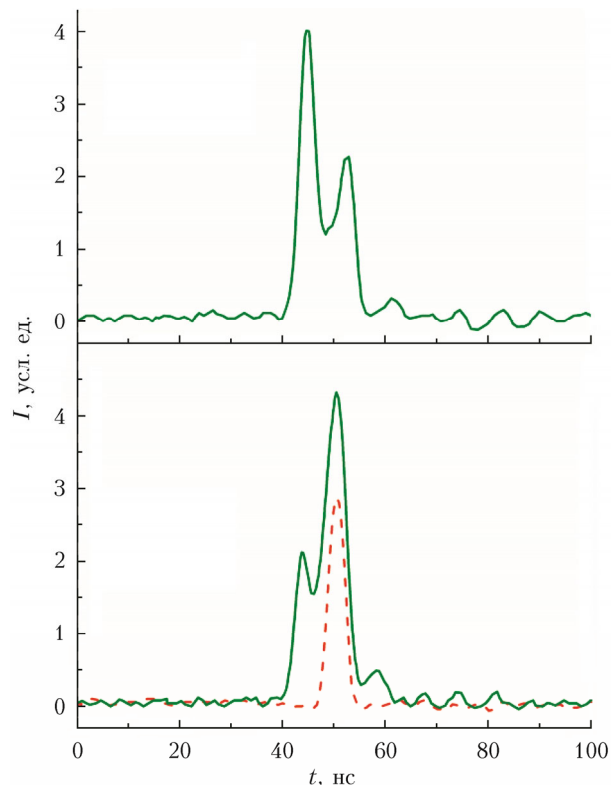


Рис. 1. Осциллограммы оптических импульсов генерации индукционного NeI-лазера, демонстрирующие отличие в распределении интенсивности между первым и вторым пиком излучения на $\lambda = 540,1$ (сплошная кривая) и его положение относительно излучения с $\lambda = 614,3$ нм (штриховая кривая)

Длительность импульсов генерации на полувывсоте обычно не превышала $12 \div 14$ нс, в то время как вблизи основания эта величина, в зависимости от количества пиков, могла достигать 22 нс. Положение импульсов генерации относительно осциллирующего напряжения на индукторе (определяемого как разность осцилляций напряжения на емкостях разрядного контура) было аналогичным [10], следовательно, начало импульса генерации находится вблизи максимума ЭДС индукции внутри разрядной трубки. Также можно отметить, что период осциллирующего напряжения на индукторе значительно превышает временную задержку между соседними пиками импульса генерации. С учетом того, что длина резонатора составляла 1,2 м, можно считать, что подобная форма импульсов определяется проходами излучения по оптическому резонатору.

Лазерная генерация на $\lambda = 614,3$ нм наблюдалась при значительно более низких давлениях ($< 0,5$ торр), когда генерация на $\lambda = 540,1$ нм уже отсутствовала. При этом во всех случаях импульс излучения состоял только из одного колоколообразного пика без каких-либо выраженных особенностей. Длительность генерации на $\lambda = 614,3$ нм не превышала 5 ± 1 нс. Начало генерации запаздывало в среднем на ~ 8 нс относительно генерации на $\lambda = 540,1$ нм.

Исследования пространственных характеристик проводились в основном для лазерной генерации на $\lambda = 540,1$ нм, поскольку она имела большую интенсивность и наиболее выраженные особенности. Вследствие накачки активной лазерной среды цилиндрическим индукционным разрядом лазерный пучок в подобных случаях имеет форму кольца, диаметр которого определяется размерами разрядной трубки, а ширина — особенностями активной среды и условиями накачки. Это же было справедливо и для активной среды индукционного NeI-лазера. На рис. 2 показаны типичные профили пучка, зарегистрированные без линзы.

Как видно из рис. 2, *а, в*, кольцо генерации неоднородно по интенсивности и имеет характерную зернистую структуру. Это явление хорошо известно и описано в литературе [11]. Оно наблюдалось в лазерах с большим коэффициентом усиления, работающих в режиме усиленного спонтанного шума. Очевидно, что подобный режим имеет место и в индукционном NeI-лазере. Можно обратить внимание, что зернистая структура пятна лазерного излучения состоит из неоднородных по форме и размерам элементов, но при этом имеет ярко выраженную радиальную симметрию. Мы предполагаем, что этот факт обусловлен характером электрического поля

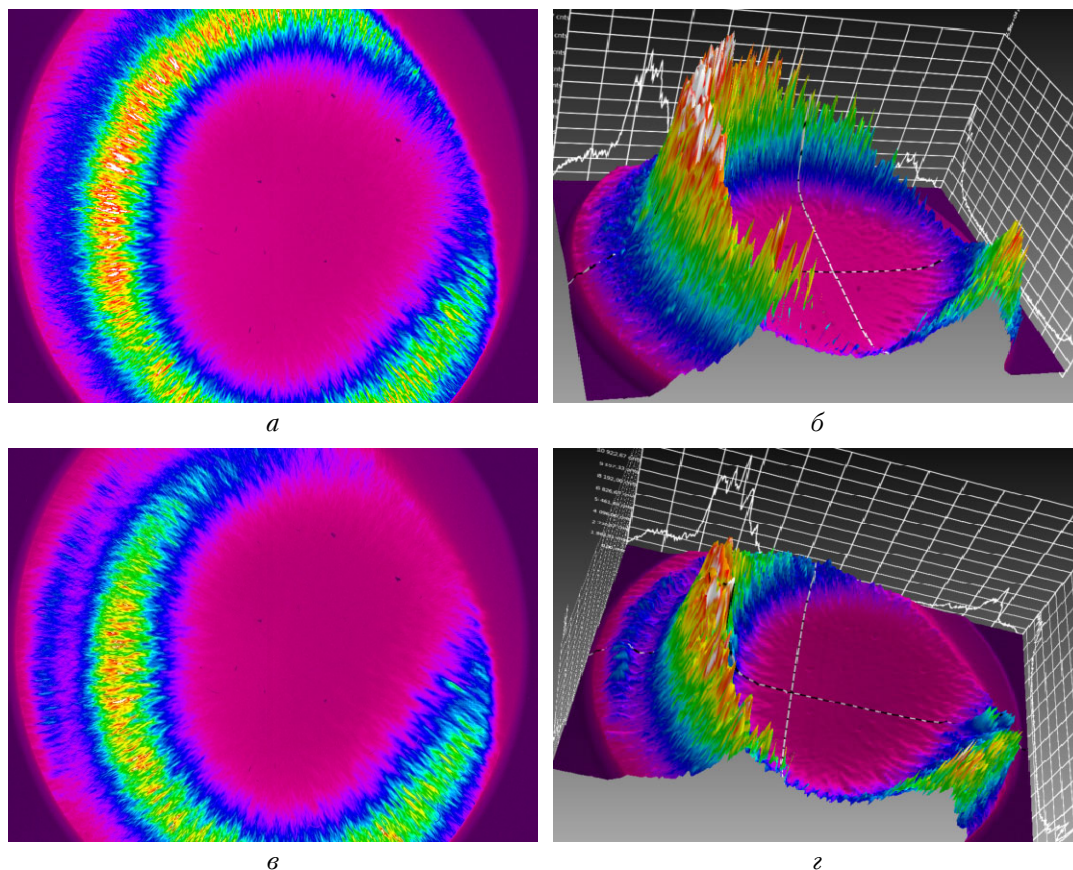


Рис. 2. 2D- и 3D-профили пучка индукционного NeI-лазера на $\lambda = 540,1$ нм до (*а, б*) и после (*в, г*) образования дуги внешнего малоинтенсивного кольца излучения (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

в цилиндрическом индукционном разряде, которое имеет вихревую конфигурацию согласно уравнению Максвелла

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}. \quad (1)$$

Таким образом, радиальная симметрия пучка излучения обусловлена радиальной зависимостью амплитуды напряженности поля, связанной с осевой симметрией рассматриваемой задачи:

$$\oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = -\int_S \left(\frac{d\mathbf{B}}{dt}, d\mathbf{S} \right). \quad (2)$$

Так как сечение цилиндрического индукционного излучателя разбито на элементарные кольца L различного радиуса r , с учетом однородности электрического поля и с использованием (2) мы получим напряженность электрического поля

$$E_r \sim r. \quad (3)$$

Следовательно, скорость дрейфа v электронов, играющих определяющую роль в механизме формирования инверсии населенности импульсного индукционного неоновом лазера, также будет зависеть от направления напряженности электрического поля $v(E)$. В связи с этим формирующиеся электронные лавины будут иметь радиальную симметрию и достигать достаточной концентрации заряженных частиц для формирования индукционного разряда на определенном расстоянии r от центра индукционной трубки (3). Из-за высокого омического сопротивления в пристеночной области разрядной трубки [12] индукционный разряд отстоит

от нее на некотором расстоянии, что определяет внешние границы распространения электронных лавин и одновременно их наблюдаемую веретенообразную структуру (см. рис. 2, *a*). Сам же индукционный разряд формируется в виде полого цилиндра. Для количественных оценок планируются отдельные теоретические исследования.

Кроме микронеоднородностей в некоторых импульсах можно было наблюдать формирование дополнительных дуг генерации, которые при определенных условиях были способны сформировать еще одно внешнее кольцо генерации, обладающее заметно меньшей интенсивностью и шириной по сравнению с основным кольцом. Формирование внешнего кольца генерации может объяснить появление третьего малоинтенсивного пика в импульсе генерации (см. рис. 1), однако возможности текущей системы регистрации не позволяют сделать насчет этого однозначные предположения.

Анализ пространственных и временных характеристик излучения показывает, что условия накачки такого лазера не являются оптимальными, в результате чего формирование инверсии происходит в условиях усиленного спонтанного шума при ненасыщенном коэффициенте усиления, что может объяснить неоднородности во временном поведении и в распределении интенсивности по сечению пучка.

Оценка размеров кольца производилась для сфокусированного линзой изображения пучка методом ABCD-матриц (рис. 3). Для этого допускалось переувеличение матрицы камеры при том, что параметры кольца рассчитывались для участков вблизи основания, когда начинался заметный рост интенсивности. Диаметр кольца находился на уровне $33,1 \pm 0,1$ мм;

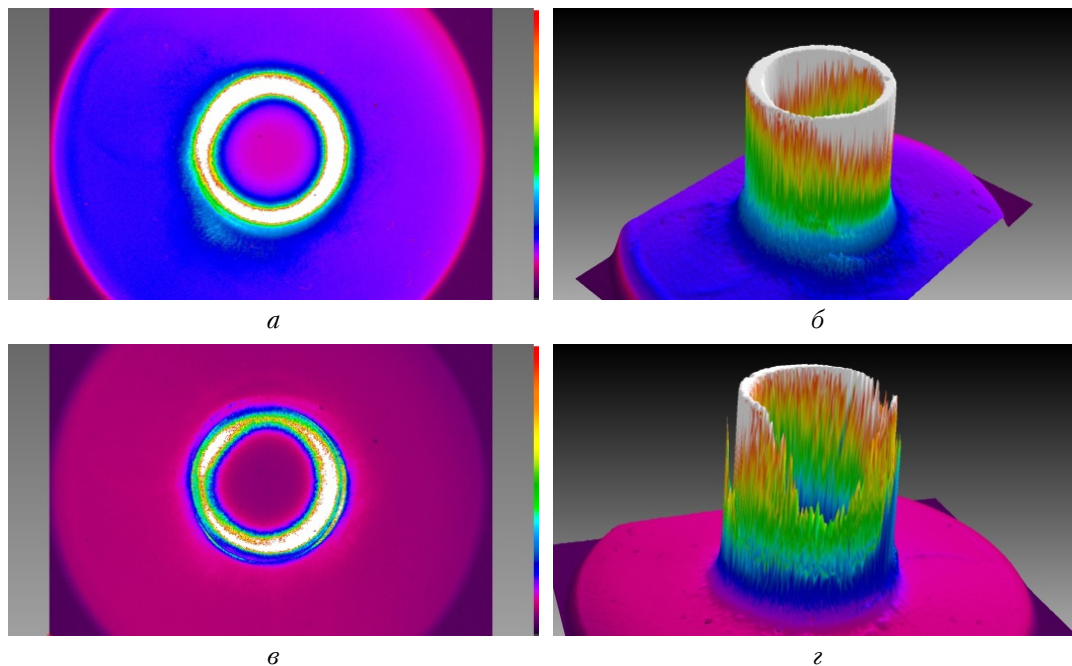


Рис. 3. 2D- и 3D-профили пучков индукционного NeI-лазера ($\lambda = 540,1$ нм), сфокусированных линзой, до (*a, б*) и после (*в, г*) образования частей внешнего малоинтенсивного кольца излучения (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

ширина кольца достигала $5,6 \pm 0,1$ мм. В случае формирования малоинтенсивного внешнего кольца вместе с основным внутренним (рис. 3, в и г) диаметр основного кольца был равен $31,8 \pm 0,1$ мм, а дополнительного — $33,6 \pm 0,1$ мм. Общая ширина такого кольца оставалась примерно такой же — около 6 мм, а дополнительного — не более 0,7 мм.

Заключение

Исследованы особенности спектральных, временных и пространственных характеристик излучения NeI-лазера с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом. Получена лазерная генерация на $\lambda = 540,1$ и $614,3$ нм с длительностью оптических импульсов на уровне 13 ± 1 и 5 ± 1 нс соответственно. Импульс генерации на $\lambda = 540,1$ нм, как правило, состоял из двух пиков, расстояние между которыми в среднем составляло $7 \div 8$ нс, а соотношение интенсивностей в каждом из пиков изменялось от импульса к импульсу, что обусловлено проходами излучения по резонатору. Импульс генерации на $\lambda = 614,3$ нм состоял только из одного колоколообразного пика без каких-либо выраженных особенностей. В поперечном сечении лазерный пучок имел форму кольца диаметром $33,1 \pm 0,1$ мм и шириной $5,6 \pm 0,1$ мм. Обнаружена неоднородность интенсивности излучения по кольцу генерации в виде зернистой структуры с ярко выраженной осевой симметрией. Появление зернистой структуры обусловлено работой лазера в режиме усиленного спонтанного шума, в то время как осевая симметрия может быть объяснена радиальным направлением дрейфовой скорости электронов, приводящих к формированию инверсии населенностей на переходах нейтральных атомов неона при накачке импульсным индукционным цилиндрическим разрядом.

Экспериментальное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-42-543005\20. Результаты теоретических исследований,

представленные в работе, получены в рамках государственного задания (тема № 121033100059-5).

1. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. СПб.: НИУИТМО, 2012. 129 с.
2. Rogers R.R., Hostetler C.A., Hair J.W., Ferrare R.A., Liu Z., Obland M.D., Harper D.B., Cook A.L., Powell K.A., Vaughan M.A., Winker D.M. Assessment of the CALIPSO Lidar 532 nm attenuated backscatter calibration using the NASA LaRC airborne High Spectral Resolution Lidar // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. N 11. P. 1295–1311.
3. Bell W.E. Ring discharge excitation of gas ion lasers // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 7, N 7. P. 190–191.
4. Kazaryan M.A., Malikov M.M., Karpukhin V.T., Lyabin N.A. The use of inductive discharge for laser pumping of a copper vapor // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. N 826. P. 1–8.
5. Batenin V.M., Lyabin N.A., Malikov M.M. Numerical simulation of a copper vapor laser with induction discharge and additional heating // *Appl. Phys.* 2020. N 5. P. 103–108.
6. Zhu P., Boswell R.W. A new argon-ion laser based on an electrodeless plasma // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 68. N 5, P. 1981–1984.
7. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. MW peak-power UV inductive nitrogen laser // *Appl. Phys. B.* 2020. 126:104.
8. Заярный Д.А., Холин И.В. Пеннинговские лазеры высокого давления $3p-3s$ -переходах неона с длинами волн 703 и 725 нм // *Квант. электрон.* 2003. Т. 33, № 6. С. 474–484.
9. Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. Характеристики лазера с ядерной накачкой на переходах $3p-3s$ атома неона // *Квант. электрон.* 1995. Т. 22, № 3. С. 225–230.
10. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Inductive laser on neon's atomic transitions pumped by a pulsed inductive discharge // *Appl. Phys. B.* 2021. 127:152.
11. Ищенко В.И., Лисицын В.Н., Ражев А.М., Раутман С.Г., Шалагин А.М. О расщеплении линии излучения импульсных лазеров на сверхсвечистости // *Письма в ЖЭТФ.* 1974. Т. 19, № 11. С. 669–672.
12. Бабат Г.И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ним вопросы // *Вестн. электропром.* 1942. С. 1–12.

A.M. Razhev, D.S. Churkin, I.A. Trunov, R.A. Tkachenko. Neon laser with wavelengths of 540.1 and 614.3 nm pumped by an inductive pulsed cylindrical discharge.

Results of the study of features of the spectral, temporal, and spatial characteristics of the radiation from neutral neon atoms pumped by an inductive pulsed cylindrical discharge are presented. Lasing was obtained at wavelengths of 540.1 and 614.3 nm with optical pulse duration at levels of 13 ± 1 and 5 ± 1 ns (FWHM), respectively. The cross section of the laser radiation had the shape of a ring with a diameter of 33.1 ± 0.1 mm and a width of 5.6 ± 0.1 mm. The intensity distribution of the lasing ring was nonuniform and has a grain structure, typical of lasers operating in the amplified spontaneous emission mode. The grain region is inhomogeneous in form and size and shows a pronounced radial symmetry, which, according to our assumption, is due to the nature of the electric field in an inductive cylindrical discharge.