

УДК 535.33, 537.525.7

Пеннинговский неоновый лазер с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом

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

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 25.01.2024

Лазерное излучение желтого диапазона длин волн находит широкое применение в офтальмологии благодаря своей эффективности и уникальным свойствам. Существующие сегодня коммерческие медицинские лазерные установки обладают малой импульсной мощностью и рядом других недостатков. Желтый лазер на неоне с длиной волны 585,3 нм может быть предложен в качестве альтернативы. В работе представлены результаты экспериментальных исследований пеннинговского неоновый лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом. В качестве активной среды использовалась газовая смесь Ne–H₂ в разных соотношениях. В экспериментах форма и длительность импульсов излучения сильно зависели от соотношения компонент Ne–H₂, позволяя получать как одиночные, так и сдвоенные импульсы общей длительностью от 30 до 100 нс на полувывсоте. Энергия генерации импульсов излучения достигала 20 мкДж, что соответствовало импульсной мощности 200 Вт. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму, близкую к кругу, с расходимостью не более 2 мрад. В дальнейшем при реализации импульсно-периодического режима работы с частотой повторения импульсов до 100 Гц индукционный неоновый лазер может применяться в различных областях, в том числе в медицине.

Ключевые слова: импульсный индукционный продольный разряд, пеннинговский лазер, желтый лазер, индукционный неоновый лазер, импульсная мощность; pulsed inductive longitudinal discharge, Penning laser, yellow laser, inductive neon laser, pulsed power.

Введение

В настоящее время лазерное излучение желтой области спектра находит множество применений в офтальмологии благодаря преимуществам данного диапазона длин волн, а именно: малого рассеивания лазерного луча при прохождении преломляющих сред глаза, высокой эффективности воздействия при процедурах коагуляции васкуляризированных структур, вызванной пиком поглощения гемоглобина и т.д. [1]. Эффективность и безопасность желтых лазеров в лечении широкого круга заболеваний, например макулярного отека, посттравматической ретинопатии, центральной серозной хориоретинопатии, продемонстрированы в [2].

Сегодня коммерческие офтальмологические лазеры, работающие в желтой области спектра, в основном представлены полупроводниковыми лазерами с оптической накачкой и лазерами на красителях. Главные недостатки первых — невысокая импульсная мощность (не более 2 Вт) и невозможность полу-

чения импульсов длительностью < 1 мкс, а лазеров на красителях — необходимость частой смены красителя вследствие его выгорания. Таким образом, задача поиска альтернативных лазерных источников в желтой области спектра остается актуальной.

В качестве такого источника может быть предложен индукционный неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 585,3$ нм. В своих предыдущих работах (например, [3]) мы продемонстрировали возможность получения лазерной генерации на переходе $3p-3s$ атомов неона ($\lambda = 585,3$ нм) при накачке смеси Ne–H₂ импульсным индукционным цилиндрическим разрядом в электрической схеме с высокой плотностью мощности накачки. Однако эта схема включает в себя неуправляемый искровой разрядник, который усложняет конструкцию лазера, ухудшает стабильность и сокращает ресурс работы.

Современные тенденции к миниатюризации лазерных источников делают предпочтительным использование продольного разряда для накачки активной среды газовых лазеров. Другим немаловажным моментом является рекомбинационный характер генерации, что упрощает требования к скорости накачки активной среды, позволяя применять более простые схемы на единственном коммутаторе, в частности более стабильном тиратроне.

* Александр Михайлович Ражев (razhev@laser.nsc.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Роман Андреевич Ткаченко (tkachenkora23@yandex.ru).

Кроме того, сам по себе индукционный разряд образуется в результате магнитной индукции при отсутствии металлических электродов в активной среде, поэтому использование его для накачки газовых лазеров позволяет устранить типичные недостатки классических методов накачки продольным или поперечным электрическим разрядом, связанные с распылением материала электродов. В сочетании с химической инертностью активной среды неоновое лазер это в перспективе позволит создавать лазерные источники с высокой стабильностью и большим ресурсом работы.

Цель работы — создание неоновое лазера с излучением в желтой области спектра с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом.

Материалы и методы

В исследовании применялась система формирования импульсного индукционного разряда, выполненная по схеме Бломляйна (рис. 1). В качестве индукционного лазерного излучателя использовалась трубка-капилляр длиной 250 мм и внутренним диаметром оптической зоны около 4 мм.

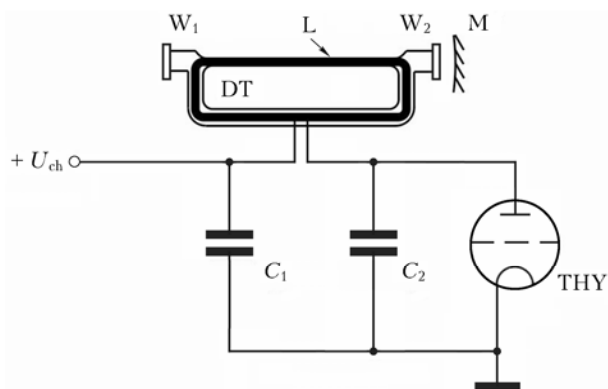


Рис. 1. Электрическая схема системы накачки пеннинговского индукционного неоновое лазера: $C_1 = 28,6$ нФ; $C_2 = 52$ нФ; DT — разрядная трубка; L — индуктор-антенна (полужирная линия); ТНУ — тиратрон серии ТПИ1-10к/50; $U_{ch} = 27$ кВ; W_1 и W_2 — герметизирующие подложки из CaF_2 ; M — зеркало резонатора

На трубке размещался индуктор L антенного типа, выполненный из четырех многожильных проводов ПВ-3 сечением $1,5 \text{ мм}^2$. Резонатор лазера состоял из зеркала M с алюминиевым покрытием (коэффициент отражения $R > 90\%$ на длине волны 585 нм) и плоскопараллельной пластины из CaF_2 ($R \sim 8\%$). Зарядное напряжение в экспериментах было равно 27 кВ при частоте следования импульсов 1 Гц.

Исследования спектральных характеристик спонтанного и лазерного излучения импульсного индукционного продольного разряда в смесях неона с другими газами проводилось на спектрометре S-150 фирмы Solar Laser Systems; временные характеристики импульсов генерации исследовались с помощью коаксиального фотозлемента ФЭК-15 с временным разрешением порядка 0,1 нс. Электрические им-

пульсы системы возбуждения регистрировались высоковольтными датчиками Printek АСА-6039 и осциллографом Tektronix 2014В с полосой пропускания 100 МГц, а энергетические характеристики генерации — с использованием дисплея Ophir StarBright с измерительной головкой Newport 919E-0.1-12-25K. Пространственные характеристики лазерного пучка исследовались с помощью цифровой камеры Ophir Spiricon L11059.

Результаты и обсуждение

Эффективная лазерная генерация на переходах неона на длине волны 585,3 нм осуществляется за счет реакций неупругих столкновений, результатом которых является деактивация метастабильных состояний нижнего лазерного уровня Ne путем ионизации молекулярной добавки (реакция Пеннинга) [4, 5]. В качестве такой добавки мы использовали молекулярный водород.

Для увеличения длительности импульсов тока индукционного разряда и реализации таким образом рекомбинационных механизмов формирования инверсии в неоне мы увеличили период осциллирующих импульсов напряжения до ~ 850 нс (рис. 2). В результате при накачке газовых смесей Ne—H₂ импульсным индукционным продольным разрядом была зарегистрирована лазерная генерация на длине волны 585,3 нм при оптимальном давлении около 20 торр. Исследования временных характеристик излучения на указанной длине волны показали, что генерация начинается спустя 1 мкс после появления импульса возбуждения и начала колебательного процесса в электрической схеме (рис. 2). При этом форма и длительность оптических импульсов лазера сильно зависели от соотношения Ne : H₂ (рис. 3).

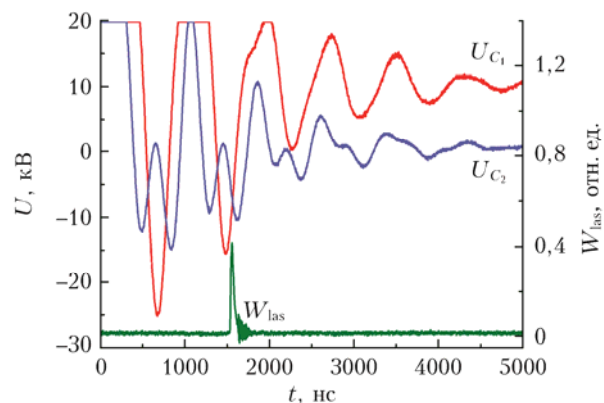


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на емкостях системы накачки C_1 и C_2 и оптического импульса генерации W_{las} пеннинговского индукционного неоновое лазера

При Ne:H₂, близких к 1:1, импульс генерации, как правило, представлял собой колоколообразный пик длительностью ~ 30 нс на полувысоте (рис. 3, а). С увеличением концентрации водорода (Ne:H₂ = 1:1,5) начинал формироваться второй пик (рис. 3, б) схожей длительности (20...30 нс),

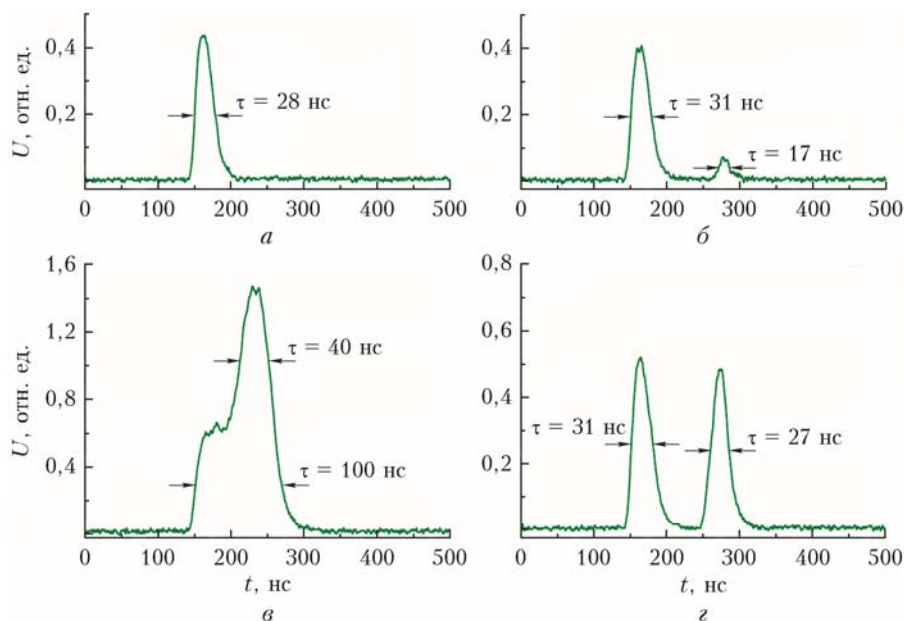


Рис. 3. Осциллограммы оптических импульсов генерации различной длительности (τ) пеннинговского индукционного неоновых лазера при соотношении $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:1$ (а); $1:1,5$ (б); $1:3...1:5$ (в); $1:7$ (г)

отстоящий от первого на ~ 100 нс. При $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:3...1:5$ длительность первого и второго импульсов была максимальной, они начинали перекрываться, формируя единственный импульс длительностью ~ 100 нс (рис. 3, в). При данных соотношениях достигалась максимальная энергия генерации ~ 20 мкДж, что соответствовало импульсной мощности 200 Вт. При дальнейшем увеличении содержания водорода энергия генерации начинала снижаться, а оптический импульс опять разделялся на два последовательных импульса с небольшим изменением амплитуды (рис. 3, г).

В электроразрядных лазерах в качестве пеннинговских добавок к неону часто использовались различные молекулярные газы, например NF_3 [6]. В настоящей работе мы также использовали NF_3 и другие добавки — SF_6 и CH_4 . Однако режим лазерной генерации на $\lambda = 585,3$ нм достигался только в случае H_2 .

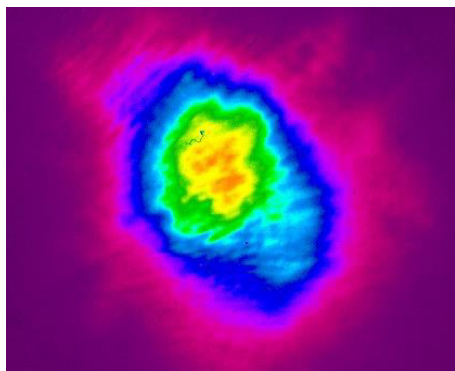


Рис. 4. Профиль пучка пеннинговского неоновых лазера ($\lambda = 585,3$ нм) с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом; изменение цвета от фиолетового к красному соответствует увеличению интенсивности (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Исследования пространственных характеристик лазерной генерации показали, что в поперечном сечении лазерный пучок имеет форму, близкую к кругу диаметром 4,5 мм (рис. 4). Интенсивность в поперечном сечении увеличивалась от краев к центру, что в дальнейшем при установке полуконфокального или конфокального резонатора позволит получить распределение, близкое к гауссовому. Оценки расходимости генерации показали, что ее величина не превышает 2 мрад.

Заклучение

Продемонстрирована возможность получения лазерной генерации на неоне в желтой области спектра (длина волны 585,3 нм) при накачке активной среды импульсным индукционным продольным разрядом. В качестве активной среды использовалась газовая смесь $\text{Ne}-\text{H}_2$ в различных соотношениях. В экспериментах форма и длительность импульсов сильно зависели от соотношения $\text{Ne}:\text{H}_2$, что позволяло управлять параметрами генерации и получать как одиночные, так и сдвоенные импульсы общей длительностью от 30 до 100 нс на полувывоте. Энергия генерации достигала 20 мкДж, что соответствовало импульсной мощности 200 Вт. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму, близкую к кругу, с расходимостью не более 2 мрад. Задача дальнейших исследований заключается в оптимизации параметров системы накачки с целью обеспечения импульсно-периодического режима работы с частотой следования импульсов до 50...100 Гц и получения возможности изменения дозы воздействия на биологические ткани.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121033100059-5).

Список литературы

1. Adam M.K., Weinstock B.M., Sundeeep K.K., Kasi S.K., Ehmann D.S., Hsu J., Garg S.J., Ho A.C., Chiang A. Patient comfort with yellow (577 nm) vs. green (532 nm) laser panretinal photocoagulation for proliferative diabetic retinopathy // *Ophthalmol Retina*. 2018. V. 2, N 2. P. 91–95.
2. Gosteva K.E., Gosteva N.N. A combined laser treatment of neovascular glaucoma with thrombosis complicated by hemophthalmia // *Laser Medicine*. 2021. V. 25, N 3S. P. 70.
3. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Inductive Penning plasma neon laser with a wavelength of 585.3 nm // *Laser Phys. Lett.* 2021. V. 18, N 9. P. 1–6.
4. Schmieder D., Brink D.J., Salamon T., Jones E. A high pressure 585.3 nm neon hydrogen laser // *Opt. Commun.* 1981. V. 36, N 3. P. 223–226.
5. Латуш Е.Л., Сэм М.Ф., Чеботарев Г.Д. Механизмы генерации газоразрядного неон-водородного лазера на $\lambda = 585,3$ нм // *Квант. электрон.* 1990. Т. 17, № 11. С. 1418–1423.
6. Ломаев М.И., Назорный Д.Ю., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Кириллин Г.В. Генерация на атомарных переходах инертных газов в смесях с NF_3 // *Квант. электрон.* 1989. Т. 16, № 10. С. 2053–2056.

A.M. Razhev, D.S. Churkin, R.A. Tkachenko. Penning neon laser pumped by a pulsed inductive longitudinal discharge.

Laser radiation in the yellow wavelength range is widely used in ophthalmology due to its effectiveness and unique properties. Commercial medical laser systems existing today have low pulse power and other disadvantages. A yellow neon laser with a wavelength of 585.3 nm can be proposed as an alternative. This paper describes the experimental study of a neon laser pumped by a pulsed inductive longitudinal discharge. A Ne–H₂ gas mixture with various ratios is used as the active medium. The shape and duration of the lasing pulses strongly depend on the ratio Ne:H₂, providing both single and double pulses with a total duration of 30 to 100 ns (FWHM). The generation energy reaches 20 μJ , which corresponds to a pulse power of 200 W. The cross-section of the laser beam has a shape close to a circle, with a divergence less than 2 mrad. Further, with implementing a pulse-periodic operating mode of an induction neon laser with a pulse repetition rate of up to 100 Hz, it can be used for various applications, including in medicine.