

Желтый неоновый лазер ($\lambda = 585.3 \text{ nm}$) с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом

© А.М. Ражев,¹ Д.С. Чуркин,^{1,2¶} Р.А. Ткаченко^{1,2}

¹Институт лазерной физики СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

¶ e-mail: churkin@laser.nsc.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2024 г.

В окончательной редакции 11 февраля 2025 г.

Принято к публикации 12 февраля 2025 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований энергетических, временных и пространственных характеристик генерации пеннинговского неоновго лазера ($\lambda = 585.3 \text{ nm}$) с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом. В качестве активной среды использовалась газовая смесь Ne-H_2 . Максимальная энергия генерации 0.14 mJ была получена в смеси $\text{Ne:H}_2 = 1:2$. Мощность излучения достигала 700 W при длительности оптических импульсов генерации 200 ns на полувысоте. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму, близкую к кругу, с расходимостью не более 2 mrad . На основании анализа амплитудно-временных характеристик лазерной генерации и импульсов тока индукционного разряда предполагается, что лазерная генерация на длине волны 585.3 nm в импульсном индукционном продольном разряде возникает в результате заселения верхнего лазерного уровня электронным ударом, с пеннинговской очисткой нижнего лазерного уровня молекулами водорода.

Ключевые слова: импульсный индукционный продольный разряд, пеннинговский лазер, желтый лазер, индукционный неоновый лазер, импульсная мощность.

DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60460.258-24

Введение

В настоящее время лазерное излучение желтой области спектра ($550\text{--}590 \text{ nm}$) находит множество применений в биологии и медицине, в частности, в офтальмологии [1]. Его преимуществами являются: повышенный показатель отклика при облучении по сравнению с широко известными лазерами на длинах волн 532 и 633 nm [2–5], малое рассеивание лазерного луча при прохождении преломляющих сред глаза, высокая эффективность воздействия при процедурах коагуляции васкуляризированных структур, сниженные болевые ощущения и так далее [6]. Эффективность и безопасность желтых лазеров продемонстрирована при лечении широкого круга заболеваний, таких как макулярный отек, посттромботическая ретинопатия, центральная серозная хориоретинопатия [7]. Существующие сегодня коммерческие желтые лазеры в основном представлены полупроводниковыми лазерами с оптической накачкой и лазерами на красителях. Главными недостатками перечисленных медицинских аппаратов в первом случае являются низкая импульсная мощность (не более 2 W) и невозможность получения импульсов длительностью короче $1 \mu\text{s}$. При использовании лазеров на красителях возникает необходимость частой замены красителя вследствие его выгорания. Другие применяемые в данной спектральной области медицинские приборы

основаны на лазерах на парах меди. Они имеют высокие значения как импульсной, так и средней мощности (порядка 10 W), однако отличаются достаточно крупными габаритными размерами, большой потребляемой мощностью и невысоким ресурсом работы (порядка $400\text{--}500 \text{ h}$) [8]. Таким образом, задача поиска альтернативных лазерных источников в желтой области спектра продолжает оставаться актуальной. В качестве такого лазерного источника может быть предложен импульсный индукционный неоновый лазер с излучением на длине волны 585.3 nm .

Лазер с генерацией на желтой линии неона с длиной волны 585.3 nm , соответствующей переходу атомов $\text{Ne I } 3p^2[1/2]_0 \rightarrow 3s^2[1/2]_1^o$, является одним из наиболее известных пеннинговских рекомбинационных лазеров, в котором роль тушащей частицы играет водород или иные добавки (например, NF_3). Активная среда плазменного неоновго лазера достаточно интенсивно исследовалась в 80-е и 90-е гг. [9–12] XX в. Для ее возбуждения использовался как традиционный продольный и поперечный электрический разряд, так и другие методы, например, электронный пучок [13,14]. В электрическом разряде энергия генерации не превышала 0.15 mJ [15] при длительности оптических импульсов от единиц наносекунд до единиц микросекунд [15,16]. Импульсная мощность таких лазерных установок, как правило, была на уровне десятков ватт. Наибольшая величина была

получена в работе [16] и достигала 1.1 kW. Вероятно, подобные энергетические характеристики послужили причиной снижения интереса к данной активной среде на тот момент времени. Однако современные желтые лазеры, применяемые, например, для микроимпульсной трабекулопластики, обеспечивают именно такие параметры лазерной генерации при воздействии на внутренние ткани глаза. Соответственно, как было отмечено выше, желтый неоновый лазер может рассматриваться в качестве альтернативного источника излучения для медицинских применений.

Ранее в работе [17] мы продемонстрировали возможность получения лазерной генерации в активной среде неона с длиной волны 585.3 nm при накачке смеси Ne–H₂ импульсным индукционным цилиндрическим разрядом. Применяемая система формирования импульсного индукционного разряда обеспечивала высокую удельную мощность накачки, однако включала неуправляемый искровой разрядник, что усложняло конструкцию лазера и ухудшало стабильность и ресурс работы. Следовательно, данные недостатки в совокупности с современными тенденциями, направленными на миниатюризацию лазерных источников, делают более предпочтительным использование продольного индукционного разряда. Другим немаловажным моментом является рекомбинационный характер лазерной генерации на неоне с длиной волны 585.3 nm, что позволяет использовать более простые системы формирования импульсного индукционного разряда на основе единственного коммутатора в виде высокостабильного тиратрона. Сам индукционный разряд образуется в результате электромагнитной индукции при отсутствии металлических электродов в активной среде. Данное преимущество позволяет устранить типичные недостатки классических методов накачки продольным или поперечным объемным сильноточным электрическим разрядом, связанные с распылением материала металлических электродов. Таким образом, сочетание безэлектродности индукционного разряда и инертности активной среды неоновой лазера в перспективе позволит создавать относительно простые с инженерной точки зрения лазерные источники с высокой стабильностью и большим ресурсом работы. В связи с этим целью настоящей работы являлось создание неоновой лазера в желтой области спектра с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом.

1. Экспериментальная установка

Для проведения исследований использовалась система формирования импульсного индукционного разряда, выполненная по типу схемы LC-инвертор (рис. 1). Данная схема состояла из набора параллельно подключенных конденсаторов, формирующих емкости C_1 и C_2 , которые заряжались от импульсного источника питания ALE-152A фирмы Lambda EMI до заданного напря-

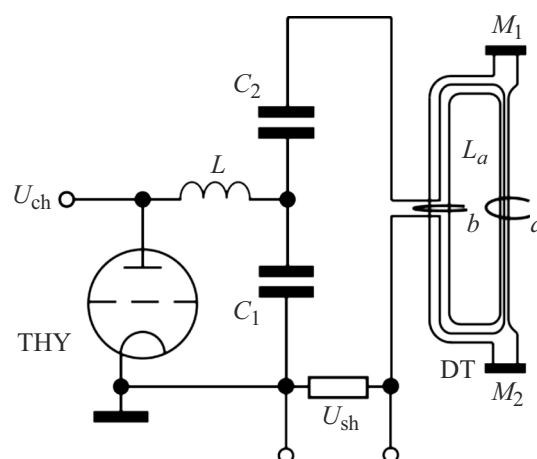


Рис. 1. Электрическая схема системы накачки пенингонского индукционного неоновой лазера. $C_1 = C_2 = 97.2 \text{ nF}$, DT — разрядная трубка, L_a — индуктор-антенна, L — индуктивность шин и коммутатора, THY — тиратрон серии ТПИ1-10к/50, U_{ch} — зарядное напряжение 26–29 kV, M_1 и M_2 — зеркала резонатора, a и b — расположение пояса Роговского при калибровке и основных измерениях соответственно, U_{sh} — сигнал с резистивного токового шунта.

жения U_{ch} . После их зарядки срабатывал коммутатор THY, запускающий колебательный процесс в контурах THY- L - C_1 и THY- L_a - L - C_2 высоковольтной схемы. За счет разности периодов колебаний, определяемых емкостными и индуктивными параметрами электрической схемы, в смежных контурах достигался режим работы, при котором напряжение на индукторе принимало максимальные значения, превышая зарядное в 1.5–1.7 раза. В качестве индукционного лазерного излучателя использовалась трубка DT длиной 300 mm, имеющая рабочую область с внутренним диаметром оптической зоны около 8 mm и обводной канал диаметром 20 mm соответственно.

На трубке размещался индуктор L антенного типа, выполненный из четырех многожильных проводов ПВ6-3 сечением 10 mm^2 . Резонатор лазера состоял из плотного зеркала M_1 с алюминиевым покрытием ($R > 90\%$) и диэлектрического зеркала M_2 с $R \sim 35\%$ на длине волны $\lambda = 585 \text{ nm}$. Зарядное напряжение U_{ch} в экспериментах изменялось в пределах 26–29 kV. Частота следования импульсов в зависимости от условий накачки варьировалась от 1 до 100 Hz.

Исследования спектральных характеристик спонтанного и лазерного излучения импульсного индукционного продольного разряда в смесях неона с другими газами проводилось при помощи спектрометра S-150 фирмы Solar Laser Systems. Временные характеристики импульсов генерации исследовались при помощи коаксиального фотоэлемента ФЭК-15 с временным разрешением порядка 0.5 ns и фотодиода ФД-24К. Электрические импульсы системы возбуждения регистрировались при помощи высоковольтных датчиков Printek ACA-6039, токового

резистивного шунта и пояса Роговского, сигналы с которых подавались на цифровой запоминающий осциллограф Rigol MSO5354 с полосой 350 MHz. Калибровка пояса Роговского проводилась при помощи резистивного шунта. Для этого пояс размещался на трубке так, чтобы охватывать плазменный виток с индуктором (точка *a* на рис. 1), и при давлениях около 1 atm, когда индукционный разряд отсутствовал, проводилась одновременная регистрация сигнала с резистивного датчика и пояса Роговского. Далее пояс размещался на обводном канале в районе точек крепления индуктора к схеме (точка *b* на рис. 1), чтобы исключить влияние на регистрируемый сигнал тока через индуктор и снизить величину наведенных ЭДС. Энергетические характеристики генерации регистрировались при помощи дисплея Ophir StarBright с измерительной головкой Newport 919E-0.1-12-25K. Исследование пространственных характеристик лазерного пучка проводилось при помощи цифровой камеры Ophir Spiricon L11059.

2. Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования спектральных характеристик излучения неона при накачке импульсным индукционным продольным разрядом показали, что лазерная генерация на длине волны 585.3 nm возникает только в присутствии молекулярного водорода. Использование других добавок в виде таких газов, как NF_3 и SF_6 в двухкомпонентных смесях с неоном в данных условиях накачки приводило к уменьшению энергии генерации или ее полному исчезновению, а также перераспределению энергии возбуждения между целым набором малоинтенсивных линий в видимой области спектра. В связи с этим в качестве активной среды использовались двухкомпонентные газовые смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ при различных соотношениях и парциальных давлениях. На рис. 2 приведена зависимость энергии генерации и оптимального давления желтого неоновых лазера от

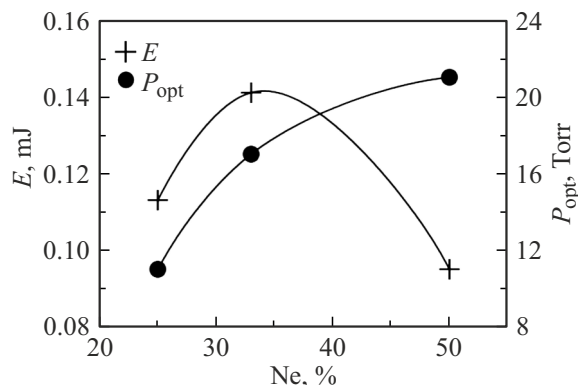


Рис. 2. Зависимость энергии генерации и оптимального давления пеннинговского индукционного неоновых лазера от процентного соотношения неона в смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ при частоте повторения импульсов 1 Hz.

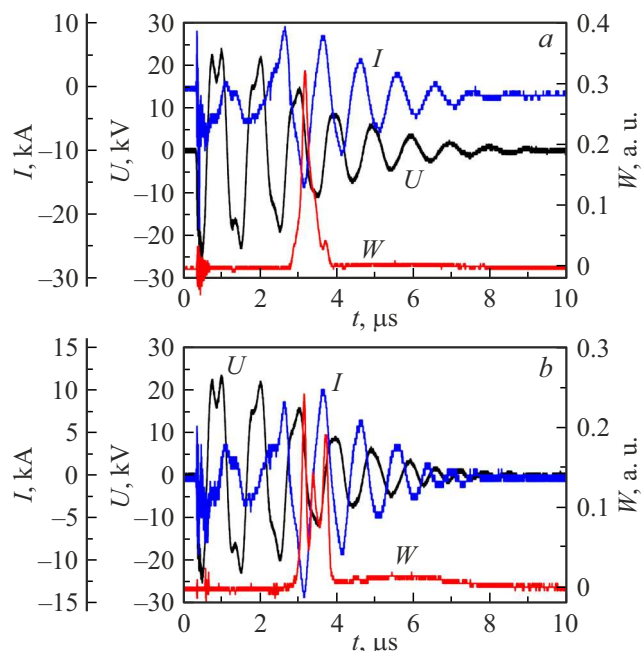


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на индукторе U , тока индукционного разряда I и оптических импульсов спонтанного и лазерного излучения смеси $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:2$ в импульсном индукционном разряде W : *a* — при оптимальном давлении 17.5 Torr; *b* — при пониженном (14–15 Torr) давлении.

процентного соотношения неона в применяемых активных смесях при частоте повторения импульсов 1 Hz.

Максимальная энергия генерации около 0.14 мДж была получена при соотношении $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:2$. Длительность оптических импульсов излучения достигала около 200 ns на полувысоте, что соответствует импульсной мощности 700 W. Полученные характеристики генерации оказались на уровне максимальных результатов, достигнутых при возбуждении неона электрическим разрядом, и впоследствии могут быть улучшены за счет дальнейшей оптимизации условий возбуждения. На рис. 2 также приведена зависимость оптимального давления смеси от соотношения $\text{Ne}:\text{H}_2$. Увеличение содержания водорода в смеси приводило к снижению оптимального давления с 25 до 10 Torr при соотношениях $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:1$ и $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:3$ соответственно. В оптимальном составе $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:2$ лазерная генерация наблюдалась в диапазоне давлений от 10 до 22 Torr с максимальным значением энергии излучения 0.14 мДж при давлении P_{opt} около 17.5 Torr. Визуальные наблюдения показали, что индукционный разряд устойчиво зажигался до давлений активной среды на уровне 30 Torr.

На рис. 3 приведены осциллограммы оптических импульсов лазерного излучения неона ($\lambda = 585.3$ nm) при различных давлениях оптимальной газовой смеси $\text{Ne}:\text{H}_2 = 1:2$. Форма оптических импульсов W зависела от давления и, как правило, состояла из нескольких пиков различной интенсивности, соотношение амплитуд

которых изменялось от импульса к импульсу. При этом наиболее мощные импульсы состояли из одного ярко выраженного пика, в то время как интенсивности прочих пиков были пренебрежимо малы.

В то же время вблизи основания импульсы генерации вне зависимости от количества выраженных пиков имели практически одинаковую длительность около $1 \mu\text{s}$. Во всех случаях импульс генерации возникал вблизи максимума тока индукционного разряда. При этом если оптический импульс состоял из нескольких пиков, моменты их появления так же совпадали с максимумами тока I или его производной $\frac{dI}{dt}$.

Более подробно исследования временного поведения спонтанного и лазерного излучения были проведены в диапазоне давлений от долей Торг до верхней границы горения индукционного разряда (рис. 4). При низких давлениях, менее 1 Торг, индукционный разряд зажигался на первом полупериоде осцилляций напряжения на индукторе. Отмечалась достаточно высокая стабильность зажигания индукционного разряда (примерно в одно и то же время). Лазерная генерация в данной смеси при таком давлении отсутствовала. Импульс спонтанного излучения регистрировался с момента зажигания индукционного разряда, но его наибольшая интенсивность достигалась к моменту погасания разряда, затем интенсивность довольно резко уменьшалась, оканчиваясь слабоинтенсивным послесвечением.

При повышении давления до 8–10 Торг стала заметна задержка в зажигании индукционного разряда относительно момента срабатывания высоковольтного коммутатора ТНУ и начала колебательного процесса в индукторе: индукционный разряд начинал зажигаться уже не на первом полупериоде, а на втором или третьем. Вероятно, это может быть связано с тем, что напряжения на индукторе уже недостаточно для возникновения пробоя в газе на первом полупериоде, но при этом происходит частичная ионизация газовой смеси, которая впоследствии выступает в качестве предварительной ионизации, формирующей начальную проводимость. На переднем фронте импульса спонтанного излучения замечен слабый пик лазерной генерации на длине волны 585 nm. Так же как и при более низких давлениях, наибольшая интенсивность спонтанного излучения достигалась к моменту погасания индукционного разряда, однако при таких давлениях заметно, что в ходе непосредственно горения разряда интенсивность спонтанного излучения была уже заметно ниже.

Максимальная энергия генерации на длине волны 585.3 nm регистрировалась при давлениях 17–18 Торг. В этих условиях индукционный разряд зажигался уже на третьем периоде осцилляций напряжения на индукторе, причем нестабильность зажигания приводила к тому, что индукционный разряд мог зажечься как в начале третьего периода, так и в конце. Так же как и при более низких давлениях, импульс генерации наблюдался на переднем фронте оптического импульса, при этом основ-

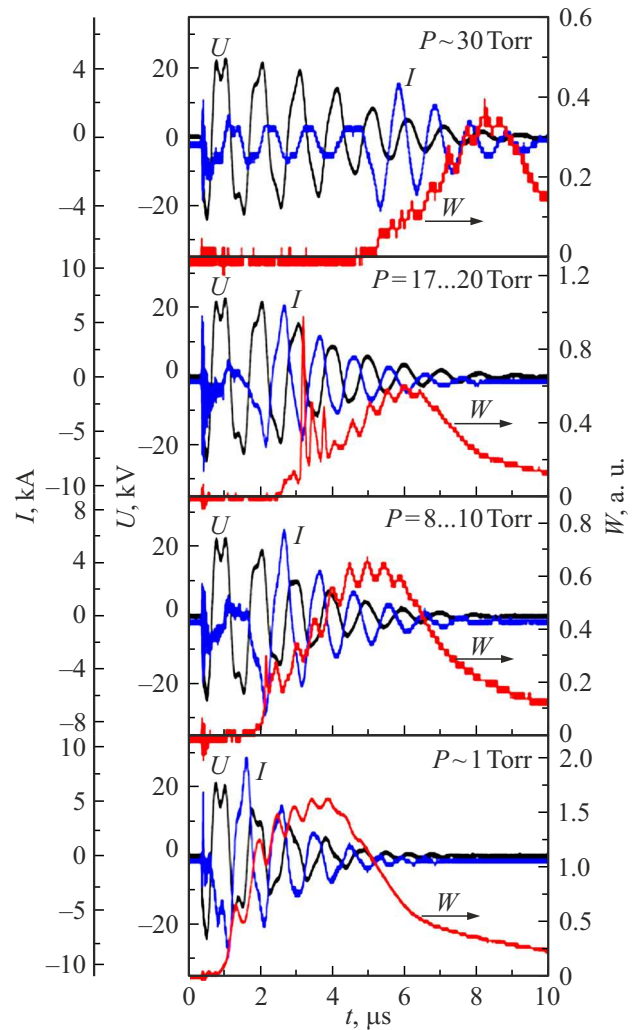


Рис. 4. Осциллограммы импульсов: напряжения на индукторе U , тока индукционного разряда I и спонтанного и лазерного излучения W при различных давлениях P смеси $\text{Ne}:\text{H}_2$ — 1:2.

ная часть импульса спонтанного излучения наблюдалась уже в послесвечении.

Дальнейшее повышение давления приводило к срыву генерации. Индукционный разряд зажигался после значительной задержки и нескольких осцилляций напряжения на индукторе. Спонтанное излучение регистрировалось преимущественно в послесвечении разряда.

Как было отмечено выше, импульсы генерации формировались вблизи максимума тока индукционного разряда I или его производной $\frac{dI}{dt}$ в случае импульсов сложной формы, состоящей из нескольких пиков. Кроме того, в данных условиях накачки также была отмечена модуляция амплитуды оптических импульсов спонтанного излучения, соответствующая удвоенной частоте осцилляций напряжения на индукторе (и тока индукционного разряда), и временная сдвигка пиков осцилляции оптических импульсов относительно пиков напряжения на индукторе и тока индукционного разряда. Подобное амплитудно-временное поведение спонтанного излу-

ния может быть связано с изменением температуры электронов в результате их участия в кинетических процессах с частицами активной среды. В работе [18] проводились теоретические исследования режимов горения индукционного разряда при различных рабочих (несущих) частотах. Авторы выделили три основных режима — квазистационарный, динамический и высокочастотный, отличающиеся соотношением несущей частоты $\omega = 2\pi f$ и характерных частотных параметров индукционного разряда, таких как ν_a и ν_e . Параметр ν_a соответствует характерному времени дрейфа ионов к стенкам $\tau_a = \nu_a^{-1}$, а параметр ν_e соответствует характерному времени релаксации энергии электронов $\tau_e = \nu_e^{-1}$. Таким образом, квазистационарный режим соответствует низкочастотному случаю ($\omega < \nu_a$), когда плотность плазмы значительно изменяется в течение периода осцилляций тока, а электрическое поле и электронная температура имеют сильно нелинейное временное поведение. На высоких частотах, когда ($\omega > \nu_e$), функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) и температура электронов постоянна в течение периода и определяется электрическим полем $E = E_0(1 + \omega^2/\nu_{\text{eff}}^2)^{1/2}$, где E_0 — электрическое поле в плазме постоянного тока при аналогичной геометрии разрядного промежутка и давлении газа, а ν_{eff} — эффективная частота столкновения электронов. Промежуточный случай ($\nu_a < \omega < \nu_e$) соответствует так называемому „динамическому режиму“, при котором плотность плазмы слабо меняется за период осцилляций, в то время как температура электронов, скорость ионизации и вид ФРЭЭ могут в течение периода изменяться значительно. Анализ результатов, проведенных в настоящей работе расчетов, позволяет утверждать, что в диапазоне частот 0.5–1 МГц, соответствующих нашим условиям накачки, реализуется динамический режим, и в течение периода осцилляций электрического поля, температура электронов может меняться в пределах 20%–30% при том, что в целом концентрация электронов остается практически постоянной.

Схожая картина была отмечена в работе [19], в которой достижение максимальных значений температур электронов в плазме индукционного разряда с ферромагнитным усилением происходило одновременно с достижением максимальных величин напряженности электрического поля, а минимальных — при переходе напряженности электрического поля через нулевое значение. При этом, так же, как и в работе [18], наблюдалось запаздывание положения минимумов температуры электронов относительно нулевого значения напряженности электрического поля. Это связано с тем, что колебания температуры электронов в плазме обусловлены потерями энергии при упругих и неупругих соударениях с атомами плазмообразующего газа и для компенсации потерь электронами энергии относительно небольших значений поля недостаточно, соответственно, температура электронов продолжает уменьшаться при переходе напряженности электрического поля через ну-

левое значение. Таким образом, можно констатировать, что наблюдаемое нами временное поведение спонтанного излучения в целом отражает процессы, характерные для индуктивно связанной плазмы.

Спектр спонтанного излучения смеси Ne:H₂ — 1:2 состоял из большого количества линий, преимущественно в красной и сине-ультрафиолетовых областях спектра (рис. 5). В красной области спектра наиболее сильными были линии, которые были отнесены к $3p \rightarrow 3s$ переходам неона. В синей и ультрафиолетовой областях можно отметить присутствие линий, относящихся к $4p \rightarrow 3s$ переходу неона, а также несколько линий, относящихся к $4d \rightarrow 3p$ и $3p \rightarrow 3s$ переходам ионов Ne⁺. Также в спектре присутствовали довольно интенсивные линии серии Бальмера H _{α} , H _{β} и H _{γ} . При повышении давления от 1 Торт спектральный состав спонтанного излучения практически не изменялся, фактически наблюдалось плавное снижение интенсивности всех линий. В то же время снижение давления ниже 1 Торт приводило к появлению довольно мощной генерации на длине волны 1114.3 нм, соответствующей переходу $4s^2[3/2]_1^0 \rightarrow 3p^2[5/2]^2$ неона. Энергия генерации на этой линии превышала 0.01 мДж, однако ее длительность измерить не удалось из-за недостаточной чувствительности приборов в данной спектральной области. При давлении менее 0.1 Торт возникала генерация на красных линиях неона с длинами волн 630.4 нм и 650.6 нм соответственно. Для подробного исследования генерации в данной области планируется организация отдельных экспериментов. Стоит отметить, что лазерная генерация в красной области на вышеупомянутых линиях возникала только в присутствии добавок, причем, наибольшее влияние оказывала добавка гелия к чистому неону или смеси Ne–H₂. В однокомпонентной неоновой среде лазерная генерация в данной системе накачки на этих линиях не возникала.

Помимо прямой регистрации лазерного и спонтанного излучения неона, произведена регистрация спектра спонтанного излучения сбоку от прозрачной трубки-капилляра. В данных экспериментах (с поправкой на вероятное поглощение УФ излучения материалом трубки) в активной среде чистого неона при оптимальных давлениях 17–20 Торт спектр излучения состоял преимущественно из красных линий, относящихся к $3p \rightarrow 3s$ переходам Ne. Добавление водорода приводило практически к полному исчезновению этих линий, при регистрации излучения сбоку в спектре были различимы только линии, относящиеся к серии Бальмера. Полученные результаты соотносятся с выводами работы [9], авторы которой заключают, что добавки водорода снижают населенность не только нижнего, но и верхнего лазерного уровня, в то время как появление лазерной генерации на длине волны 585.3 нм возможно только при определенных соотношениях смеси Ne–H₂.

Для классического продольного электрического разряда и разряда с полым катодом были проведены подробные исследования механизмов формирования ин-

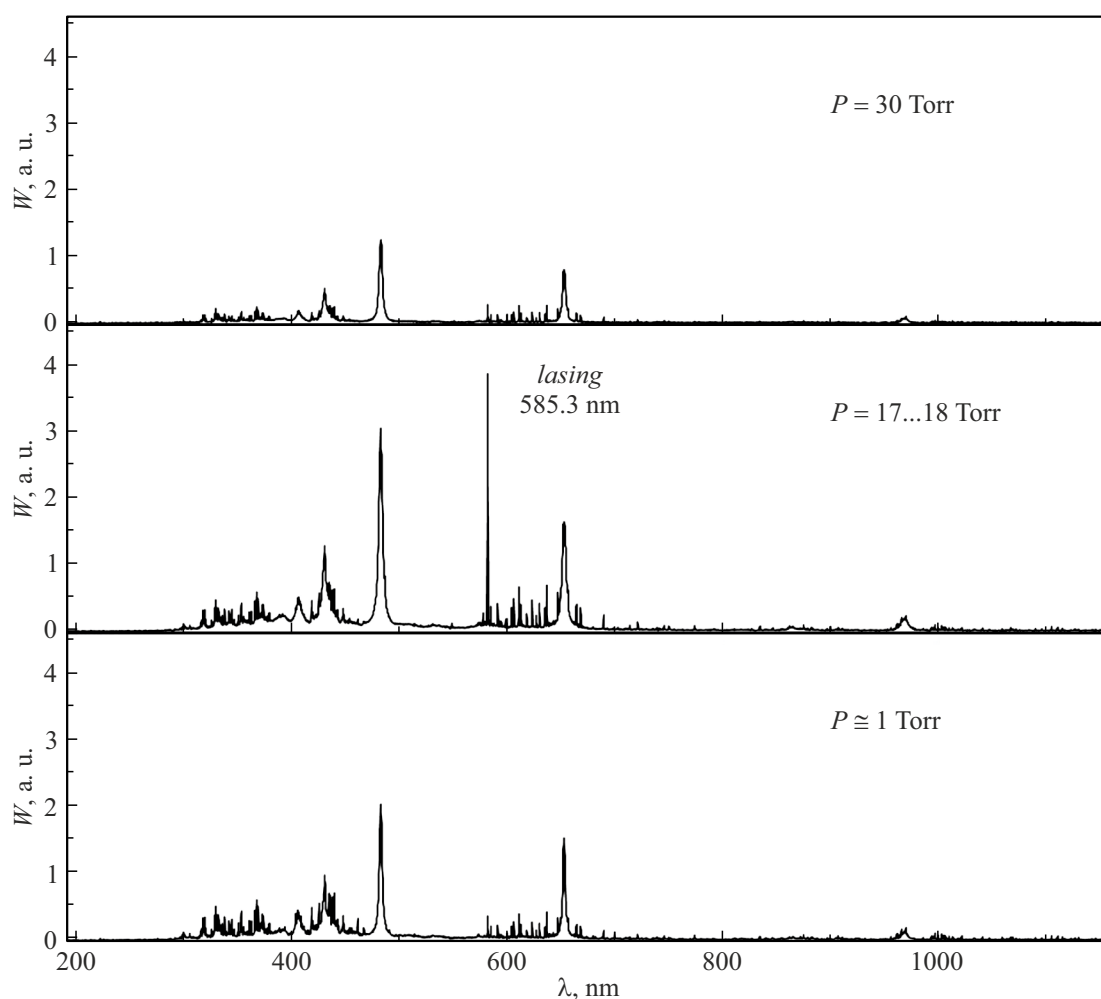


Рис. 5. Спектры излучения смеси Ne-H_2 — 1:2 в импульсном индукционном продольном разряде при различных давлениях P от 1 до 30 Torr.

версии населенностей на переходе $3p^2[1/2]_0 \rightarrow 3s^2[1/2]_1^o$ неона, которые представлены в статье [20]. В ней были рассмотрены различные режимы работы, в основном отличающиеся амплитудой и длительностью тока разряда. При малых (менее $1 \mu\text{s}$) длительностях тока разряда лазерная генерация на длине волны 585.3 nm наблюдалась преимущественно в послесвечении, в то время как при больших длительностях и амплитудах тока накачки, лазерная генерация могла возникать и во время горения разряда. В этом случае накачка верхнего лазерного уровня может осуществляться электронным ударом. В то же время появление лазерной генерации в послесвечении при возбуждении неона в продольном электрическом разряде и разряде с полым катодом преимущественно обусловлено накачкой верхнего лазерного уровня за счет тройной рекомбинации ионов неона. Также авторами был установлен селективный характер очистки нижнего лазерного уровня за счет реакции Пеннинга при столкновениях неона с молекулами водорода. В нашем случае для детальных исследований плазмохимических реакций в импульсной индуктивно-связанной

плазме планируется организация теоретических исследований и дополнительные эксперименты. На основании уже полученных экспериментальных результатов мы можем предположить, что лазерная генерация на длине волны 585.3 nm в импульсном индукционном продольном разряде возникает в результате заселения верхнего лазерного уровня электронным ударом, с пеннинговской очисткой нижнего лазерного уровня молекулами водорода.

В поперечном сечении лазерный пучок имел форму, близкую к круговой (см. желтый цвет, рис. 6) с максимумом интенсивности в центральной части, что дает возможность управления пространственными характеристиками пучка путем применения различных типов резонаторов. Величина расходимости определялась как $\theta = \arctg((d_L - d_0)/L)$ (где L — расстояние от выходного зеркала, d_L — диаметр сечения на полувысоте для данного расстояния L , d_0 — диаметр сечения на полувысоте вблизи переднего зеркала M_1 (рис. 1). Результаты проведенных таким образом измерений показали, что расходимость составляет $(2 \pm 0.2) \text{ mrad}$.

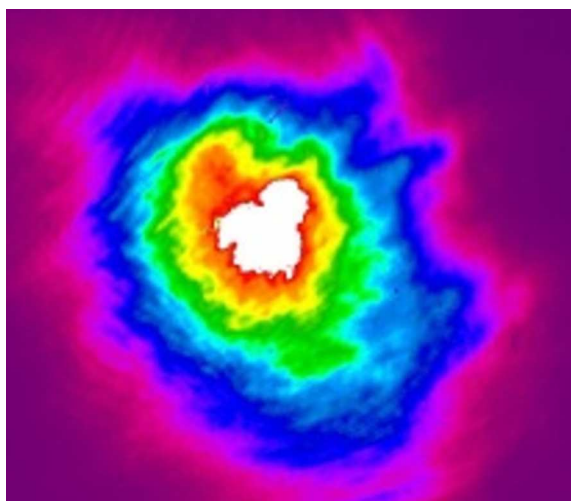


Рис. 6. Профиль пучка пеннинговского индукционного неоновго лазера ($\lambda = 585.3 \text{ nm}$) в поперечном сечении.

Проводились отдельные исследования работы лазера в импульсно-периодическом режиме. Для описанной системы накачки при увеличении частоты следования импульсов до 10 Hz, максимальная энергия генерации практически не менялась и оставалась на уровне 0.14 mJ/imp. Дальнейшее увеличение частоты приводило к снижению энергии генерации, а также росту нестабильности работы индукционного неоновго лазера, что может быть связано с перегревом лазерной трубки. Отрицательное влияния данного фактора было учтено при разработке аналогичной высоковольтной схемы (рис. 1) с тем же индукционным излучателем и высоковольтным коммутатором, но с уменьшенными емкостями, что позволило снизить величину запасаемой энергии. В данных условиях энергия генерации уменьшалась до 1.5–2 μJ , однако ее величина оставалась практически неизменной вплоть до частоты следования импульсов 100 Hz. Таким образом, последующая оптимизации условий накачки данной лазерной системы приведет к возможности создания малогабаритных желтых лазеров для практических применений.

Заключение

В результате проведенных исследований была продемонстрирована возможность накачки активной среды пеннинговского неоновго лазера импульсным индукционным продольным разрядом. Лазерная генерация в желтой области спектра ($\lambda = 585.3 \text{ nm}$) была получена в смесях неона с молекулярным водородом при различных соотношениях. Основным механизмом возникновения лазерной генерации на длине волны 585.3 nm в импульсном индукционном продольном разряде предполагается заселение верхнего лазерного уровня электронным ударом, с пеннинговской очисткой нижнего лазерного уров-

ня молекулами водорода. Энергия генерации достигала величины 0.14 mJ с мощностью излучения 700 W при длительности оптических импульсов генерации 200 ns на полувывоте, что соответствует максимальным результатам, достигнутым в электрическом разряде. Лазерный пучок в поперечном сечении имел форму, близкую к кругу, с расходимостью не более 2 mrad. Реализован импульсно-периодический режим работы лазера со средней мощностью до 0.2 mW.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121033100059-5).

Список литературы

- [1] A.F. Yusupov, Sh.A. Djamalova, Z.A. Makhmudova. *Adv. Ophthalmology*, **3** (3), 189 (2023). DOI: 10.57231/j.ao.2023.3.3.044
- [2] E. Özmert, S. Demirel, Ö. Yanık, F. Batioğlu. *J. Ophthalmology*, **2016** (1), 1 (2016). DOI: 10.1155/2016/3513794
- [3] V. Kapoor, V. Karpov, C. Linton, F.V. Subach, V.V. Verkhusha, W.G. Telford. *Cytometry Part A*, **73A** (6), 570 (2008). DOI: 10.1002/cyto.a.20563
- [4] V. Kapoor, F.V. Subach, V.G. Kozlov, A. Grudinin, V.V. Verkhusha, W.G. Telford. *Nat. Methods*, **4** (9), 678 (2007). DOI: 10.1038/nmeth0907-678
- [5] W.G. Telford, T. Hawley, F. Subach, V. Verkhusha, R.G. Hawley. *Methods*, **57** (3), 318 (2012). DOI: 10.1016/j.ymeth.2012.01.003
- [6] M.K. Adam, B.M. Weinstock, K.K. Sundeep, D.S. Ehmann, J. Hsu, S.J. Garg, A.C. Ho, A. Chiang. *Ophtalmol Retina*, **2** (2), 91 (2018). DOI: 10.1016/j.oret.2017.05.012
- [7] K.E. Gosteva, N.N. Gosteva. *Laser Medicine*, **25** (3S), 70 (2021). DOI: 10.37895/2071-8004-2021-25-3S-70
- [8] А.А. Асратян, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, И.В. Пономарев, В.И. Сачков, Х. Ли. *Лазерные системы на основе паров металлов для применений в медицине* (РАН, М., 2017). DOI: 10.15518/isjaec.2018.31-36.097-120
- [9] D. Schmieder, D.J. Brink, T.I. Salamon, E.G. Jones. *Opt. Commun.*, **36** (3), 233 (1981). DOI: 10.1016/0030-4018(81)90362-X
- [10] M.I. Lovaev, V.F. Tarasenko. *Sov. J. Quant. Electron.*, **18** (10), 1237 (1988). <https://www.mathnet.ru/eng/qe12468>
- [11] М.И. Ломаев, Д.Ю. Нагорный, В.Ф. Тарасенко, А.В. Феденев, Г.В. Кириллин. *Квант. электрон.*, **16** (10), 2053 (1989). [M.I. Lomaev, D.Yu. Nagornyi, V.F. Tarasenko, A.V. Fedenev, G.V. Kirillin. *Sov. J. Quant. Electron.*, **19** (10), 1321 (1989). DOI: 10.1070/QE1989v019n10ABEH009234]
- [12] А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко. *Квант. электрон.*, **17** (1), 32 (1990). [A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko. *Sov. J. Quant. Electron.*, **20** (1), 24 (1990). DOI: 10.1070/QE1990v020n01ABEH004783]

- [13] Ф.В. Бункин, В.И. Держиев, Г.А. Месяц, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко. Квант. электрон., **12** (2), 245 (1985). [F.V. Bunkin, V.I. Derzhiev, G.A. Mesyats, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. Sov. J. Quantum Electron., **15** (2), 159 (1985). DOI: 10.1070/QE1985v015n02ABEH006095]
- [14] П.А. Бохан, Д.Э. Закревский, В.И. Мали, А.М. Шевнин, А.М. Янчарина. Квант. электрон., **16** (6), 1110 (1989). [P.A. Bokhan, D.E. Zakrevskii, V.I. Mali, A.M. Shevnin, A.M. Yancharina. Sov. J. Quant. Electron., **19** (6), 719 (1989). DOI: 10.1070/QE1989v019n06ABEH008116]
- [15] И.И. Муравьев, Е.В. Черникова, А.М. Янчарина. Квант. электрон., **16** (2), 189 (1989). [I.I. Murav'ev, E.V. Chernikova, A.M. Yancharina. Sov. J. Quant. Electron., **19** (2), 123 (1989). DOI: 10.1070/QE1989v019n02ABEH007733]
- [16] А.М. Бойченко, А.Н. Панченко, А.Е. Тельминов, А.А. Феденев. Сообщения по физике ФИАН, **5**, 20 (2008). [I.M. Boichenko, A.N. Panchenko, A.E. Telminov, A.A. Fedenev. Bull. Lebedev Phys. Inst., **35** (5), 142 (2008). DOI: 10.3103/S1068335608050047]
- [17] A.M. Razhev, D.S. Churkin, R.A. Tkachenko. Laser Phys. Lett., **18** (9), 1 (2021). DOI: 10.1088/1612-202X/ac1609
- [18] V.I. Kolobov, V.A. Godyak. Plasma Sources Sci. Technol., **26**, art. 075013 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa7584
- [19] М.В. Исупов, В.А. Пинаев. Прикладная механика и техническая физика, **64** (5), 27 (2023). DOI: 15372/PMTF202315321
- [20] Е.Л. Латущ, М.Ф. Сэм, Г.Д. Чеботарев. Квант. электрон., **17** (11), 1418 (1990). [E.L. Latush, M.F. Sem, G.D. Chebotarev. Sov. J. Quant. Electron., **20** (11), 1327 (1990). DOI: 10.1070/QE1990v020n11ABEH007496]