

05

Импульсный индукционный лазер на $3p-3s$ -переходах нейтральных атомов неона в красной области спектра

© Д.С. Чуркин, Р.А. Ткаченко, И.А. Трунов, Е.С. Каргапольцев

Институт лазерной физики СО РАН,
Новосибирск, Россия

e-mail: tkachenkora23@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.07.2025 г.

В окончательной редакции 08.07.2025 г.

Принята к публикации 06.03.2026 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния условий накачки на характеристики генерации импульсного индукционного лазера в красной области спектра на переходах нейтральных атомов неона. Достигнут режим лазерной генерации на $3p-3s$ -переходах неона с длинами волн 607.4, 614.3, 630.4, 650.6 и 692.9 nm в оптимизированных составах газовых смесей неона с гелием, кислородом и водородом при значениях рабочего давления газовых активных сред на уровне 0.5 Torr и зарядных напряжениях в диапазоне от 24 до 28 kV. Показано влияние состава газовой смеси и геометрии разрядной трубки на спектральные и временные характеристики лазерной генерации. Проведены исследования влияния концентрации молекулярного кислорода в смесях с неонам. Показано, что формирование импульсов лазерной генерации начиналось одновременно, а их длительность увеличивалась с ростом концентрации молекулярного кислорода в двухкомпонентных смесях с неонам и могла варьировать в пределах от 8 ± 1 до 14 ± 1 ns на полувысоте. Общая энергия лазерного излучения достигала $1 \mu\text{J}$, что соответствует импульсной мощности 150 W.

Ключевые слова: импульсный индукционный лазер, неоновый лазер, продольный индукционный разряд, спектр лазерной генерации, красные линии неона.

DOI: 10.61011/OS.2026.04.63021.8366-25

Введение

Лазеры на основе газовых активных сред играют значимую роль в современной науке, технике и повседневной жизни человека [1]. Уникальные сочетания характеристик излучения делают их незаменимыми инструментами во многих областях медицины и биологии [2]. Примером таких применений в настоящее время является лазерное излучение красного диапазона длин волн, активно используемое в фотодинамической терапии благодаря удачному балансу между пиком поглощения фотосенсибилизаторов и проникающей способности [3], диагностике и лечении заболеваний в офтальмологии [4], низкоинтенсивной лазерной терапии и лазерного излучения (НИЛТ, НИЛИ) [5].

Основным фактором, определяющим эффективность лазерного воздействия на биологические ткани, является способность света проникать на достаточную глубину благодаря их оптическим свойствам, что стало ключом как для диагностических, так и для терапевтических применений лазеров [6]. Одним из таких направлений оказалась низкоинтенсивная лазерная терапия или фотобиомодуляционная терапия, являющаяся неинвазивным методом лечения болезней кожи, трофических язв и незаживающих ран различной этиологии, требующих стимуляции заживления, уменьшения болевых ощущений и степени воспалительных процессов, активации восстановительных функций биологических клеток [7,8].

При этом поглощение излучения митохондриальными хромофорами с последующей активацией процесса пролиферации происходит в клетках кожи, что делает источники лазерного излучения красного и ближнего ИК-диапазона особенно эффективными в этом аспекте [9].

В числе первых лазерных источников для терапевтического воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения применялись гелий-неоновый и рубиновый лазеры, генерирующие на длинах волн 632.8 и 694 nm соответственно [10]. Последующие исследования показали, что наибольший пролиферационный эффект возникает в „терапевтическом окне“, характеризующемся минимальным коэффициентом поглощения гемоглобина и воды, что позволяет свету проникать глубже в биологические ткани [11]. В настоящее время к практически используемым медицинским лазерам, работающим в красном диапазоне длин волн, относятся преимущественно твердотельные лазеры с диодной накачкой [12]. При этом данный тип лазеров имеет ряд недостатков, связанных с ограниченной низкой импульсной мощностью излучения (не более 50 W), необходимостью использования параметрических генераторов для преобразования частоты излучения в видимый диапазон спектра, сложностью масштабирования лазерных установок и систем охлаждения, уязвимостью к внешним воздействиям и условиям. В связи с этим поиск альтернативных источников лазерного излучения, применяемых для описанных целей, продолжает оставаться актуальным.

В качестве активной лазерной среды, позволяющей генерировать излучение в обозначенной спектральной области, может выступать инертный газ неон, возбуждаемый электрическим разрядом, обладающий относительно большим количеством электронных переходов в красном диапазоне длин волн [13]. В качестве добавок к рабочему газу неону могут использоваться различные тушащие частицы и буферные газы, позволяющие оказывать влияние как на спектральные, так и на энергетические характеристики лазерного излучения. Упомянутое влияние было показано в том числе при накачке неона импульсным индукционным разрядом, формируемым за счет изменения магнитного потока в контуре соленоида, индуцирующего электродвижущую силу в газовой среде. Импульсный индукционный разряд как метод накачки газообразных сред низкого давления позволяет достигать режима лазерной генерации в различных активных средах на десятках лазерных переходов [14], в том числе и вблизи интересующего спектрального диапазона — на переходах $3p \rightarrow 3s$ нейтральных атомов неона с длиной волны 614.3 нм [15]. Обширный набор переходов неона в упомянутом выше „терапевтическом окне“, на которых может быть получена лазерная генерация, и в особенности условий возбуждения активной среды неона импульсным индукционным разрядом обуславливают отдельный научный и практический интерес к данному методу формирования активных сред.

В связи с этим целью настоящей работы являлся поиск условий формирования инверсии населённостей и достижения режима лазерной генерации на переходах нейтральных атомов неона в красной области спектра при накачке импульсным индукционным продольным разрядом.

Экспериментальная установка

В настоящей работе экспериментальные исследования проводились при использовании системы формирования импульсного индукционного разряда, выполненной по типу схемы Блюмляйна (рис. 1), зарекомендовавшей себя благодаря технической простоте и стабильности работы.

Индукционный лазерный излучатель DT представлял собой стеклянную трубку с замкнутым разрядным контуром, позволяющую формировать в газовой активной среде импульсный индукционный продольный разряд. Трубка включала в себя рабочий участок с длиной активной зоны 300 мм, имеющий внутренний и внешний диаметры 3 и 5 мм соответственно. Для замыкания пути протекания тока индукционного разряда трубка имела обводной канал с внешним диаметром 20 мм. Данное соотношение диаметров позволяло увеличить плотность тока разряда в рабочем участке при относительно небольших потерях энергии в обводном канале. На трубке размещался индуктор L , состоящий из 8 многожильных проводов-антенн (провод ПВ-3 сечени-

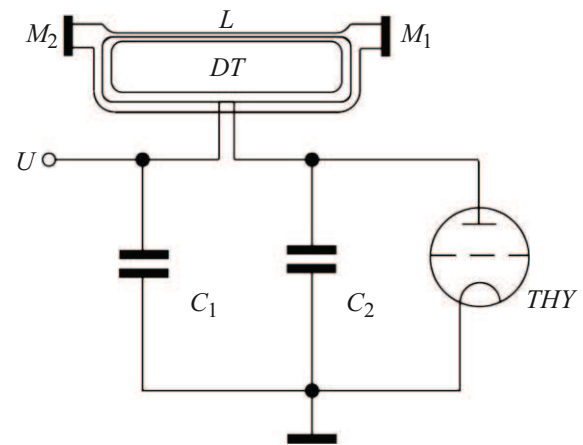


Рис. 1. Электрическая схема накачки активной среды неона импульсным индукционным продольным разрядом: U — зарядное напряжение, $C_1 = 7.8$ нФ, $C_2 = 13$ нФ, THY — тиратрон ТПИ1-10к/20, DT — разрядная трубка, L — индуктор-антенна, выполненный из провода ПВ-3, M_1 и M_2 — герметизирующая пластина из CaF_2 и плотное алюминиевое зеркало соответственно.

ем 4 mm^2), расположенных по 4 штуки в двух смежных контурах с каждой стороны трубки. В качестве резонатора выступали герметизирующая пластина из CaF_2 с $R \sim 8\%$ и плотное алюминиевое зеркало. В отдельных экспериментах применялась трубка с похожими линейными размерами, но имеющая увеличенный диаметр рабочего участка до 8 мм.

Спектральные измерения проводились при помощи спектрометра S-150 производства компании Solar Laser Systems, в который излучение заводилось при помощи длиннофокусной линзы. Рабочий спектральный диапазон прибора составлял 190–1160 нм, а его разрешение достигало 0.44 нм. В качестве детектора применялся линейный датчик Toshiba TCD 1304AP с длиной светочувствительной области 29 мм. Согласно технической документации, погрешность работы спектрометра не превышала $\pm 3\%$.

Для анализа временных характеристик излучения использовался коаксиальный фотоэлемент ФЭК-15, обладающий спектральной чувствительностью в диапазоне 380–1200 нм. Данный детектор позволял регистрировать короткие оптические импульсы с длительностью до 0.5 нс. Исследование спонтанного и вынужденного излучения также проводилось при помощи кремниевого полупроводникового фотодиода ФД-24К с областью спектральной фоточувствительности от 400 до 1100 нм. Импульсы колебаний напряжения на емкостях системы накачки регистрировались при помощи высоковольтных щупов Tektronix P6015A и АКТАКОМ АСА-6039, сигналы с которых подавались на цифровой многоканальной осциллограф Rigol MSO5354 с полосой пропускания 350 МГц. Энергетические параметры излучения оцени-

вались с помощью портативного измерителя энергии фирмы Ophir.

Частота следования импульсов лазера регулировалась в пределах от 1 до 50 Hz, что обеспечивало возможность исследования процессов в широком диапазоне режимов генерации. Зарядное напряжение U изменялось от минимального предела 16 kV, при котором индукционный разряд стабильно зажигался, до 28 kV, ограниченных электротехническими возможностями системы накачки.

Результаты и обсуждение

Исследование спектральных характеристик спонтанного излучения неона при накачке импульсным индукционным продольным разрядом показало наличие в спектре большого количества линий в красной области, максимум интенсивности которых наблюдался при давлениях около 30 Torr. При понижении давления ниже 3 Torr возникала лазерная генерация на длине волны 614.3 nm, которая ранее также была получена при накачке неона импульсным индукционным разрядом цилиндрического типа [15]. Оптимальное давление, соответствующее максимальной интенсивности излучения данной линии, находилось вблизи 0.5 Torr. Также было отмечено, что интенсивность лазерного излучения на этой линии возрастает с увеличением зарядного напряжения, и максимум достигается при зарядном напряжении 28 kV. Кроме вышеописанной линии, в спектре генерации регистрировалось излучение с длиной волны 1114.3 nm, соответствующее $4s \rightarrow 3p$ -переходу Ne I, однако его интенсивность была значительно меньше и не превосходила интенсивность излучения с длиной волны 614.3 nm во всём диапазоне варьируемых параметров накачки. Различия в наблюдаемых распределениях интенсивностей излучения между линиями могут быть вызваны различием энергий возбуждения верхних лазерных уровней данных переходов в неоне (рис. 2), а также существенными различиями между значениями сечений их возбуждения [16].

Одной из самых распространенных добавок к неону является инертный газ гелий, который применялся и в наших исследованиях. Гелий позволяет эффективно возбуждать некоторые из переходов неона в результате резонансной передачи энергии в неупругих столкновениях, минимизируя потери энергии на сторонние процессы в плазме из-за высокого потенциала ионизации. Помимо гелия в настоящей работе использовались и другие газовые компоненты, такие как аргон, ксенон, криптон, однако их использование не приводило к улучшению характеристик генерации на длинах волн 614.3 и 1114.3 nm или появлению новых линий в спектре генерации. При этом наилучшие результаты были получены при использовании двухкомпонентных и трехкомпонентных смесей неона с гелием, а также с молекулярным кислородом или водородом.

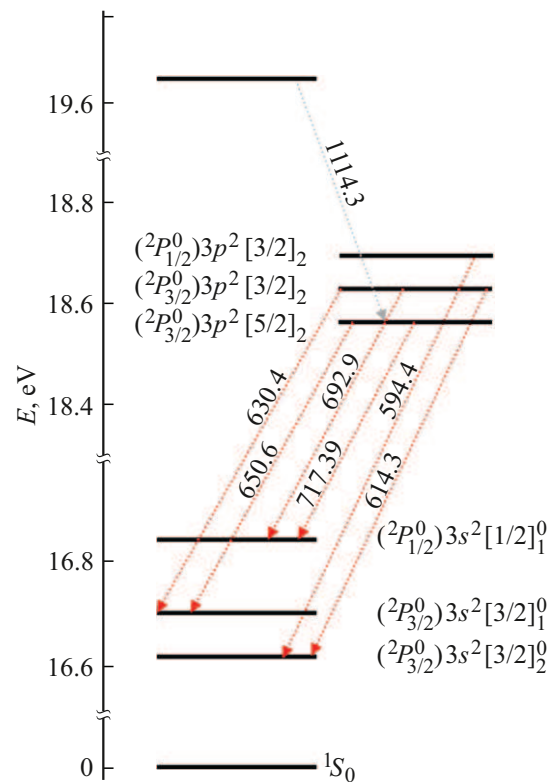


Рис. 2. Некоторые лазерные переходы нейтральных атомов неона [13].

Добавки гелия к неону при возбуждении импульсным индукционным продольным разрядом в трубке с внутренним диаметром 3 mm оказали негативное влияние на интенсивность излучения обеих спектральных линий генерации, вплоть до полного исчезновения излучения с $\lambda = 1114.3$ nm, начиная с малых добавок гелия — от 5% от общего давления. Похожий эффект был отмечен в работе [17], в которой увеличение парциального давления гелия в двухкомпонентной смеси приводило к увеличению вероятности трехчастичных столкновений, играющих доминирующую роль в расселении уровней неона. В свою очередь в смесях неона с молекулярным кислородом была получена лазерная генерация, также относящаяся к $3p \rightarrow 3s$ -переходам нейтральных атомов неона, но с другими значениями длин волн: 607.4, 630.4, 650.6, 692.9 nm (рис. 3, a), причём лазерное излучение на длине волны 607.4 nm получено впервые. При этом лазерного излучения с длиной волны 614.3 nm, испускаемого чистым неоном и смесями неона с гелием, в смесях Ne-O₂ с преобладающим содержанием кислорода замечено не было. Такое изменение спектральных характеристик лазерного излучения неона в смесях с кислородом, имеющим большое количество колебательных и вращательных переходов, может говорить в том числе и о снижении средней энергии электронов, а также об изменении населенностей лазерных уровней неона. Данные процессы, в свою очередь, могут приводить

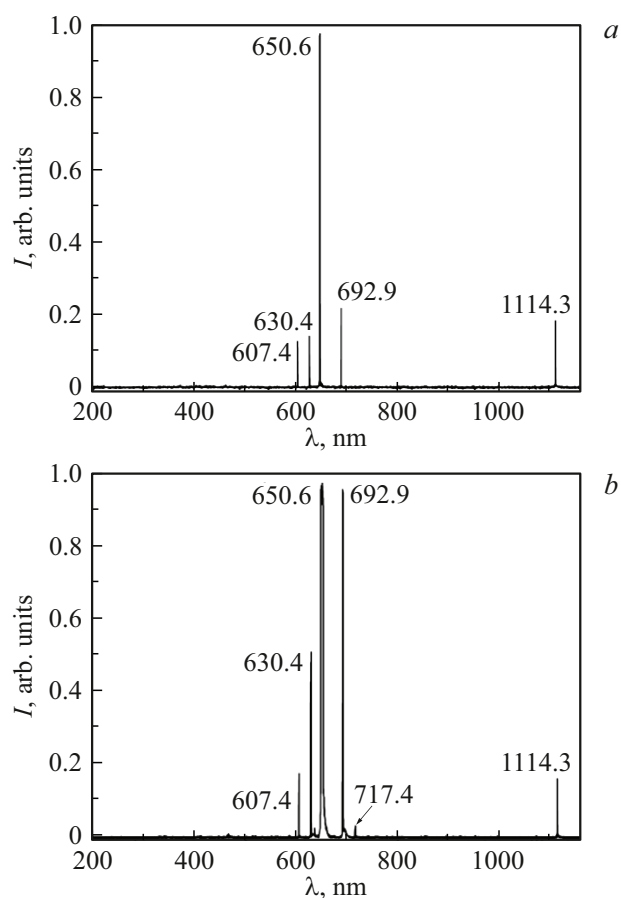


Рис. 3. Спектр излучения нейтральных атомов неона при накачке импульсным индукционным продольным разрядом смеси: (а) $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:5$ в трубке с внутренним диаметром 3 мм; (б) $\text{Ne}:\text{Ne}:\text{H}_2 = 30:1:0.01$ в трубке с внутренним диаметром 8 мм.

к изменению концентрации и функции распределения электронов по энергиям, что может являться причиной регистрации новых линий излучения в спектре.

Оптимальным двухкомпонентным составом с максимальной интенсивностью излучения каждой из линий являлась газовая смесь $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:5$. Дальнейшее увеличение содержания кислорода приводило к перераспределению интенсивности излучения между зарегистрированными спектральными компонентами и их последующему исчезновению, начиная с составов $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:10$. Также было замечено уменьшение оптимального зарядного напряжения в смесях с кислородом при увеличении его содержания. К примеру, в смеси $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:1$ оптимальное зарядное напряжение представлено 28 кВ против 24 кВ для смеси $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:5$. Данный процесс может быть вызван изменением температуры и концентрации электронов в плазме импульсного индукционного разряда в результате увеличения доли реакций, протекающих с участием молекулярного и атомарного кислорода, благодаря большим значениям сечений реакций неупругих столкновений.

В свою очередь использование трубки с ббльшим внутренним диаметром при накачке двухкомпонентных смесей неона с гелием, напротив, позволило достичь режима излучения на длинах волн 607.4, 630.4, 650.6, 692.9 нм в смесях $\text{He}:\text{Ne} = (5-130):1$. Эффект совместного увеличения внутреннего диаметра разрядной трубки и парциального давления гелия в смесях с неонам наблюдался и ранее в работе [18]. В настоящей работе авторы показали, что средние скорости протекания реакций, влияющих на населенность лазерных уровней неона, быстро увеличиваются при росте соотношения He/Ne , в то время как скорость процессов девозбуждения Ne^* , напротив, уменьшается с ростом данного соотношения. Вместе с тем было получено, что по мере увеличения внутреннего диаметра разрядной трубки до некоторого определенного значения увеличивается и максимально достижимая инверсия населенностей на лазерных переходах неона. В нашем случае максимальная интенсивность излучения указанных ранее спектральных линий достигалась в смеси $\text{He}:\text{Ne} = 30:1$ при зарядном напряжении 28 кВ и давлении вблизи 0.5 Торг. Данное оптимальное соотношение газовых компонент также было получено и авторами работы [18]. В свою очередь помимо параметров плазмы разряда в индукционном излучателе большого диаметра изменяются однородность и градиенты напряженности электрических полей, индуцируемых протекающим по индукторам током, а также теплодиффузионные процессы, что может приводить к изменению эффективности заселения лазерных уровней. К тому же при увеличении диаметра разрядной трубки уменьшается отношение площади внутренней поверхности к объему, что приводит к снижению вероятности столкновений возбужденных частиц со стенками трубки и уменьшению влияния процессов дезактивации возбужденных состояний атомов неона.

Добавление третьих компонент в виде гелия и молекулярного водорода (в большой и малой концентрации соответственно) в составы активных сред $\text{Ne}-\text{O}_2$ и $\text{He}-\text{Ne}$ для разрядных трубок разного диаметра положительно сказалось на стабильности работы данных лазеров, а также привело к небольшому перераспределению энергии между спектральными линиями (например, рис. 3, б). Помимо этого в спектре лазерного излучения исследуемого лазера можно было наблюдать малоинтенсивные линии со значением длин волн 638.3 и 717.4 нм, относящиеся к $3p-3s$ -переходам нейтральных атомов неона (рис. 3, б). Максимальная энергия лазерного излучения на всех зарегистрированных переходах нейтральных атомов неона достигала $1 \mu\text{J}$, что соответствует импульсной мощности 150 W.

Исследование временных характеристик излучения импульсного индукционного неоновго лазера проводилось в разрядной трубке с внутренним диаметром 3 мм в различных смесях неона с молекулярным кислородом при зарядном напряжении 24 кВ. При оптимальных для достижения режима лазерной генерации рабочих

давлениях проводилась интегральная регистрация оптических импульсов излучения на всех длинах волн в диапазоне работы коаксиального фотоэлемента из-за невозможности их спектральной селекции. Однако, согласно рис. 3, *a, b*, основная доля энергии излучения была заключена в двух линиях 650.6 и 692.9 nm. При этом форма оптических импульсов не обладала ярко выраженными особенностями, что говорит об одновременности их появления. Длительность импульсов лазерной генерации W изменялась в диапазоне от 8 ± 1 ns (на полувысоте) в активной среде чистого неона без добавок и до 14 ± 1 ns (на полувысоте) при увеличении парциального давления молекулярного кислорода с 50 до 80%. Причиной увеличения длительности импульсов излучения могут служить протекающие в плазме разряда процессы захвата молекулярным кислородом свободных электронов, приводящие к образованию отрицательных ионов и „затягиванию“ тока разряда. В трехкомпонентных смесях неона с гелием значение длительности оптических импульсов достигало меньшего значения 12 ± 1 ns (на полувысоте). Форма некоторых импульсов генерации была представлена несколькими пиками с общим основанием, разделенными временным интервалом в несколько наносекунд, которые могли быть обусловлены как многократным проходом излучения в резонаторе, так и периодическим изменением населенностей энергетических уровней вследствие колебаний электронной температуры в разряде.

Исследование влияния концентрации молекулярного кислорода в двухкомпонентных составах с неона на временные характеристики спонтанного и вынужденного излучения проводилось с применением кремниевое фото диода (см. „Экспериментальная установка“). При этом данный детектор с постоянной времени $\sim 10 \mu s$ не обладал возможностью разрешать короткие оптические импульсы, однако позволял регистрировать момент времени, соответствующий возникновению излучения, и, как следствие, появлению начальной проводимости в разрядном промежутке с последующим зажиганием импульсного индукционного разряда. Излучение, фокусируемое при помощи линзового телескопа, расположенного на оптической оси лазера на расстоянии 5 cm от лазерного излучателя, заводилось в волоконный световод, подключенный к фотодиоду.

Регистрация импульсов спонтанного и вынужденного излучения проводилась в активных средах чистого неона и его смесях с молекулярным кислородом $Ne:O_2 = 1:(1-9)$ в диапазоне давлений рабочей газовой смеси от 0.5 до 12 Torr. Исследования показали, что при давлениях вблизи 9–12 Torr, при которых лазерная генерация отсутствовала, наибольшая амплитуда интенсивности спонтанного излучения, регистрируемого фотодиодом, наблюдалась при накачке чистого неона, при этом амплитуда интенсивности излучения смесей с соотношениями $Ne:O_2 = 1:(1-9)$ была примерно в два раза ниже. Однако, начиная с рабочего давления 6 Torr, интенсивность излучения в чистом неоне и его

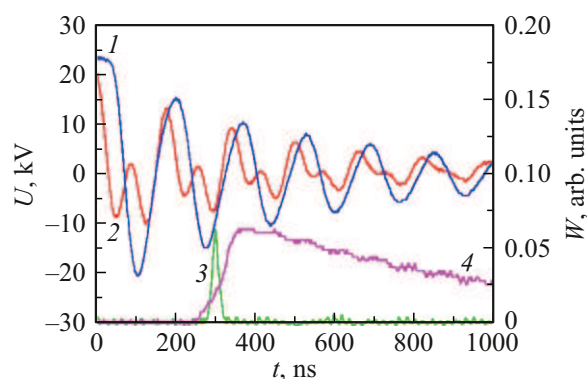


Рис. 4. Оптический импульс излучения неонowego лазера с накачкой импульсным индукционным продольным разрядом газовой смеси $Ne:Ne:O_2 = 20:1:5$ при зарядном напряжении 24 kV и рабочем давлении 0.5 Torr: синяя (1) и красная (2) линии — напряжение на батареях конденсаторов с общим значением емкости C_1 и C_2 соответственно (рис. 1); зеленая линия (3) — характерное положение оптического импульса лазерной генерации; фиолетовая линия (4) — характерное положение импульса спонтанного излучения.

смесях становилась одинаковой. При дальнейшем уменьшении давления активной среды до 3 Torr (и ниже) интенсивность спонтанного излучения кислородсодержащих составов превосходит значение, регистрируемое в однокомпонентной среде. Увеличение концентрации молекулярного кислорода при давлениях, близких к оптимальным, также приводило и к увеличению задержки между стартом колебательного процесса на батареях конденсаторов, и к зажиганию индукционного разряда с появлением оптического импульса излучения (рис. 4). Величина данной задержки изменялась от 80 ns в смесях $Ne:O_2 = 1:(1-2)$ до 600 ns в смеси $Ne:O_2 = 1:9$. При этом оптимальное давление, соответствующее максимальной интенсивности вынужденного излучения, практически не изменялось.

Момент формирования импульсов вынужденного излучения изменялся в зависимости от состава активной среды и регистрировался между вторым и пятым полупериодом осцилляций напряжения на батареях конденсаторов системы накачки. А именно формирование импульса излучения в чистом неоне регистрировалось на фронте второго полупериода осцилляций тока и напряжения на индукторе. При этом в двухкомпонентных составах с молекулярным кислородом увеличение концентрации O_2 с 50% до 80% также приводило и к увеличению временной задержки между стартом колебательных процессов в системе возбуждения, и, появлению оптического импульса лазерной генерации. Данные временные исследования спонтанного и вынужденного излучения могут подтверждать сделанные ранее выводы в отношении изменения функции распределения электронов по энергиям в результате „охлаждения“ электронов, что приводит к образованию отрицательных ионов и

снижению коэффициента ударной ионизации. Помимо этого, скорость реакции диссоциативного прилипания электронов к молекулярному кислороду с последующим образованием атомарного кислорода, приводящим к формированию дополнительных каналов диссипации энергии разряда, в достаточно широком диапазоне приведенных электрических полей превосходит константу скорости ионизации, что может дополнительно уменьшать коэффициент Таунсенда и увеличивать время зажигания разряда. При этом формирование инверсии населенностей, вероятнее всего, происходит в результате электронных ударов, а не благодаря процессам неупругих столкновений молекулярных ионов кислорода с нейтральными атомами неона.

Заключение

В ходе проведенных экспериментальных исследований достигнут режим лазерной генерации на переходах $3p \rightarrow 3s$ нейтральных атомов неона на длинах волн 607.4, 630.4, 650.6, 692.9 нм при накачке импульсным индукционным продольным разрядом. Впервые при накачке импульсным индукционным разрядом получена лазерная генерация на длине волны 607.4 нм. Исследование влияния состава газовой смеси показало, что увеличение парциального давления молекулярного кислорода в двухкомпонентных смесях с неоном способствует расширению спектра лазерной генерации. Добавление третьих газовых компонент в смеси с неоном и молекулярным кислородом, таких как гелий и молекулярный водород, положительно сказалось на стабильности работы лазера и поспособствовало перераспределению энергии между спектральными линиями. Измерение и анализ временных характеристик излучения показали, что форма импульса излучения может быть представлена несколькими пиками с общим основанием, длительность которых увеличивается с ростом содержания кислорода в активной среде лазера и может варьировать от 8 ± 1 нс (на полувысоте) в чистом неооне до 14 ± 1 нс (на полувысоте) в смеси $\text{Ne}:\text{O}_2 = 1:4$. Также было установлено, что момент начала формирования лазерного импульса зависит от состава активной среды и может регистрироваться на разных фазах колебательного процесса в системе накачки. Общая энергия лазерной генерации достигала $1 \mu\text{J}$, что соответствует импульсной мощности 150 W.

Таким образом, результаты работы демонстрируют возможность создания компактного источника лазерного излучения в красном диапазоне длин волн на основе неоновых газовых смесей, возбуждаемых импульсным индукционным продольным разрядом. Полученные в рамках описываемых экспериментальных исследований результаты открывают перспективы для дальнейшего совершенствования подобных лазерных систем и их применения в медицине.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O. Svelto. *Principles of Lasers*, 5th ed. (Springer, N.Y., 2010). DOI: 10.1007/978-1-4419-1302-9
- [2] T. Vo-Dinh. *Biomedical Photonics Handbook*, 1st ed. (CRC Press, Boca Raton, 2003). DOI: 10.1201/9780203008997
- [3] P. Agostinis, K. Berg, K.A. Cengel, T.H. Foster, A.W. Girotti, S.O. Gollnick, S.M. Hahn, M.R. Hamblin, A. Juzeniene, D. Kessel, M. Korbelik, J. Moan, P. Mroz, D. Nowis, J. Piettem B.C. Wilson, J. Golab. *CA Cancer J. Clinic.*, **61** (4), 250 (2011). DOI: 10.3322/caac.20114
- [4] K. Koev, L. Avramov, E. Borissova. *J. Phys. Conf. Ser.*, **992** (1), 012060 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/992/1/012060
- [5] С.В. Москвин, Г.Н. Пономаренко. *Лазерная терапия аппаратами серии „Матрикс“ и „Лазмик“* (ООО „Изд-во „Триада“, Тверь, 2015).
- [6] S.L. Jacques. *Phys. Med. Biol.*, **58** (11), R37 (2013). DOI: 10.1088/0031-9155/58/11/R37
- [7] T. Karu. *Health Phys.*, **56** (5), 691 (1989). DOI: 10.1097/00004032-198905000-00015
- [8] P. Avci, A. Gupta, M. Sadasivam, D. Vecchio, Z. Pam, N. Pam, M.R. Hamblin. *Semin. Cutan. Med. Surg.*, **32** (1), 41 (2013).
- [9] A. Gupta, T. Dai, M.R. Hamblin. *Lasers Med. Sci.*, **29** (1), 257 (2013). DOI: 10.1007/s10103-013-1319-0
- [10] N.F. Gamaleya. *Laser Biomedical Research in the USSR* (Plenum Press, N.Y., 1977), p. 1–173. DOI: 10.1007/978-1-4615-7326-5_1
- [11] T.I. Karu. *Photochem. Photobiol.*, **84** (5), 1091 (2008). DOI: 10.1111/j.1751-1097.2008.00394.x
- [12] В.О. Свинок, А.И. Шевчук, А.Н. Смирнов, Д.В. Макеева, Е.В. Соловьева. *Опт. и спектр.*, **130** (10), 1590 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.10.53631.3709-22
- [13] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team. *NIST Atomic Spectra Database* (version 5.12) [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.nist.gov/asd>.
- [14] A.M. Razhev, E.S. Kargapol'tsev, I.A. Trunov. *Opt. Spectrosc.*, **130** (3), 336 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.03.53559.2836-21
- [15] A.M. Razhev, D.S. Churkin, R.A. Tkachenko. *Appl. Phys. B.*, **127** (152), 1 (2021). DOI: 10.1007/s00340-021-07698-3
- [16] E. Carbone, W. Graef, G. Hagelaar, D. Boer, M.M. Hopkins, J.C. Stephens, B.T. Yee, S. Pancheshnyi, J. van Dijk, L. Pitchford. *Atoms*, **9** (1), 16 (2021). DOI: 10.3390/atoms9010016
- [17] J.H. Parks, A. Javan. *Phys. Rev.*, **139** (5A), A1351 (1965). DOI: 10.1103/physrev.139.a1351
- [18] Y. Mao, J. Hu, H. Ji, S. Guan, D. Chen, Q. Gong, W. Liu, X. Long, Z. Tan. *Photonics*, **11** (3), 276 (2024). DOI: 10.3390/photonics11030276