

А. М. Ражев, Д. С. Чуркин, Н. С. Тарасов

Институт лазерной физики СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 13/3, 630090, Новосибирск, Россия  
E-mail: razhev@laser.nsc.ru**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ ИНДУКЦИОННОГО ЛАЗЕРА  
НА МОЛЕКУЛЯРНОМ АЗОТЕ \***

Впервые создан ультрафиолетовый импульсный индукционный лазер на молекулярном азоте с длиной волны 337,1 нм и импульсной мощностью 100 кВт. Описана система возбуждения импульсного индукционного разряда цилиндрической формы в азоте и создания инверсии населенностей на самоограниченных переходах молекул азота. Получена энергия генерации 1,2 мДж с длительностью импульсов  $12 \pm 1$  нс. Лазерное излучение имело форму кольца с внешним диаметром 33 мм толщиной 1–1,5 мм. Расходимость излучения имела величину 0,3 мрад.

*Ключевые слова:* индукционный разряд, лазер, генерация, спектр излучения, азот.

В работе [1] впервые было предложено использование импульсного индукционного разряда для возбуждения индукционных газовых лазеров на электронных переходах атомов и молекул. В этой работе нами был описан первый импульсный индукционный лазер, который работал на переходах атомов фтора в области спектра 703–731 нм. Для формирования индукционного разряда в газовой смеси  $\text{He-F}_2$  и получения генерации использовалась система возбуждения, собранная по схеме L–C инвертор и хорошо зарекомендовавшая себя при создании высокоэффективных УФ эксимерных лазеров [2]. В такой конструкции была получена энергия FI-лазера 0,12 мДж и импульсной мощностью 6 кВт.

Целью данной работы было исследование возможности формирования импульсного индукционного разряда в азоте и создания инверсии населенностей на электронных переходах  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  молекул азота для достижения генерации на длине волны 337,1 нм. Под индукционным разрядом в данном случае понимается индукционно связанная плазма, созданная вихревыми электрическими токами в результате электромагнитной индукции, полученной переменным электромагнитным полем в газовой среде. В данном

случае подразумевается импульсный цилиндрический разряд в газе. Преимущества такого индукционного разряда заключаются в том, что он возникает без использования каких-либо электродов в газе и не является составной частью системы возбуждения в отличие от обычных электрических продольных и поперечных разрядов, которые являются последовательно включенными в электрическую схему элементами и неотъемлемо связанными с ней. Также изучение индукционного лазера на молекулярном азоте важно для понимания физики и возможностей возбуждения газов с помощью индукционного разряда.

Интерес к азотному лазеру на длине волны 337,1 нм вызван тем, что он является одним из наиболее популярных источников мощного УФ излучения и имеет много различных применений для накачки лазеров на красителях, полупроводниковых лазеров [3] в спектроскопии, диагностике, фотохимии, медицине и ряде других областей. Для возбуждения азотного лазера используется либо продольный электрический разряд, при этом энергия излучения не превышает 0,1–0,2 мДж, либо поперечный электрический разряд. В последнем случае энергия генерации может достигать величины, близкой

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-02-16149-а).

к 10 мДж. Традиционно используемые электрические разряды формируются в соответствии с обязательными требованиями, к которым относятся параметры  $E/P$ , плотность мощности возбуждения, обеспечивающими не только однородность объемного разряда, но и требуемый механизм образования инверсии населенностей и коэффициент усиления для достижения режима генерации. Такие разряды характеризуются распылением материала электродов, приводящим к загрязнению активной среды, возникновением катодных пятен, формированием стримеров, которые нарушают однородность и стабильность лазерного излучения. В результате наблюдается снижение ресурса работы лазеров, требующее замены не только рабочего газа, но и электродов, оптических элементов резонатора лазера.

Индукционный разряд не содержит каких-либо электродов, а следовательно, свободен от вышеперечисленных проблем, ограничивающих применение лазера. Кроме того, как показали эксперименты, индукционный разряд характеризуется высокими однородностью и воспроизводимостью, что при стабильно работающей системе возбуждения обеспечивает высокую стабильность лазерного излучения. Также преимуществом индукционного разряда является возможность создания газовых лазеров для высокотемпературных активных сред.

Исследованиям и созданию азотных лазеров посвящено большое количество работ [4]. В них описаны различные конструкции разрядных камер, в которых возбуждение молекул азота осуществлялось как продольным, так и поперечным разрядами с использованием разнообразных систем возбуждения. Механизм образования инверсии на рабочих переходах изучен достаточно хорошо и детально описан в [5]. Основным каналом заселения верхнего лазерного уровня  $C^3P_u$  является возбуждение прямым электронным ударом из основного состояния  $X\Sigma$ . Радиационное время жизни уровня  $C^3P_u$  составляет 40 нс, тогда как нижний лазерный уровень  $B^3P_g$  имеет большое время жизни ( $\tau_b = 9$  мкс) [6], поэтому инверсия на этих переходах может существовать лишь первые несколько наносекунд. В результате лазер имеет высокий порог возбуждения около 200 В/см тор [7] и низкий полный КПД 0,01–0,1 %. Поэтому при создании азотных

лазеров необходимо иметь параметры плазмы, в которой электроны при концентрации  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-3</sup> должны иметь энергию 12–16 эВ, а оптимальной является область энергий 14–16 эВ [8]. Таких параметров плазмы в обычном разряде можно достичь только с использованием систем возбуждения с предельно минимальной индуктивностью разрядного контура, обеспечивающей максимальные значения напряженности электрического поля в разрядном промежутке.

Описанные в литературе азотные лазеры возбуждались продольным или поперечным разрядами в широком диапазоне давлений азота и его смесей от единиц тор до нескольких атмосфер. В таких схемах возбуждения активная среда (газовая смесь, находящаяся между двумя электродами) является одним из элементов последовательной цепи, включающей в себя накопительную емкость и подводящие шины. Однородность разряда и электронные параметры плазмы находятся в прямой зависимости от параметров этой цепи, а именно от величины и индуктивности накопительной емкости, индуктивности и сопротивления подводящих шин, геометрии разрядного промежутка, давления и состава газовой смеси. Разряд формируется в электрическом поле между электродами и развивается в объеме и во времени, находясь в зависимости от перечисленных параметров всей цепи.

Исследования по созданию индукционного азотного лазера были начаты с использованием установки, описанной в [1]. Эксперименты по возбуждению азота индукционным разрядом показали неэффективность схемы возбуждения «L–C инвертор». Разряд в азоте получался при низких давлениях около 1 тор и интенсивность его была низкой, что указывало на недостаточную энергию, вложенную в индукционный разряд. В данной работе была разработана новая система формирования импульсного индукционного разряда в газах, электрическая схема которой показана на рис. 1. Эта схема включала в себя емкость  $C_1$ , в которой запасалась энергия до 30 Дж при зарядных напряжениях до 25 кВ. Посредством высоковольтного коммутатора  $SG_1$  энергия из емкости  $C_1$  через дроссель  $L_1$  передавалась в емкость  $C_2$ , соединенную с индуктором (соленоидом)  $L_2$ , находящимся на разрядной трубке, содержащей газ в качестве активной среды. Второй конец ин-

дуктора соединялся со вторым высоковольтным коммутатором  $SG_2$ , который работал в неуправляемом режиме. Таким образом, создавался разрядный контур  $C_2-L_2-SG_2$ , который обеспечивал эффективную передачу энергии из индуктора в газовую среду в виде переменного магнитного поля. В результате возникновения движения зарядов индуцировались циркулярные электрические токи, которые формировали индукционный разряд в газе. В данном случае индукционный разряд имел форму цилиндра вблизи внутренней поверхности разрядной трубки. Одной из основных задач в проводимых исследованиях было нахождение оптимального сочетания таких параметров, как внутренний диаметр разрядной трубки и характеристики индуктора (соленоида), к которым относятся длина индуктора, число секций в нем, количество витков в каждой секции, сечение провода.

Индуктор  $L_2$  представлял собой соленоид длиной 20–60 см, состоящий из набора отдельных соленоидов, выполненных в виде секций, соединенных параллельно и расположенных вдоль стеклянной трубки. Каждая из секций имела количество витков от 5 до 20, намотанных изолированным многожильным проводом сечением от 1,5 до 4,0 мм<sup>2</sup>. Величина зарядной индуктивности  $L_1$  была равна 150 мкГн и обеспечивала перезарядку емкости  $C_1$  на емкость  $C_2$  за время 1–2 мкс, а во время работы разрядного контура препятствовала процессу обратной перезарядки.

На рис. 2. показаны осциллограммы напряжения на соленоиде  $L_1$  и лазерного излучения (а), а также их более детальный вид (б). Считается, что энергия из  $C_2$  вкладывается в активную газовую среду посредством переменного магнитного поля в момент пробоя неуправляемого разрядника  $SG_2$ . Осцилляции напряжения на индукторе наблюдались в течение 2–3 периодов при оптимальном давлении 0,2–0,5 тор, соответствующем возникновению генерации. Период колебаний напряжения на индукторе был равен  $300 \pm 20$  нс и определялся величиной емкости  $C_2$  и индуктивностью разрядного контура. Импульс излучения появляется через 150 нс после пробоя разрядника  $SG_2$ , и его длительность на полувысоте оставляет  $12 \pm 1$  нс (рис. 2, б). Такое поведение излучения индукционного азотного лазера значительно отличается от поведения лазера при

накачке стандартным разрядом и требует дальнейшего изучения.

Генерация на электронных переходах молекулярного азота была получена при возбуждении чистого азота при давлениях от 0,1 до 1,5 тор. Максимальная энергия излучения достигалась при давлении 0,4–0,7 тор и составила 1,2 мДж в трубке с внутренним диаметром 33 мм. Длина индуктора и, следовательно, активной среды была 600 мм. Оптический резонатор был образован задним плоским диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 99 % и передним выходным плоским диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения около 50 %. Разрядная трубка герметизировалась двумя кварцевыми плоскопараллельными пластинами, которые были установлены перпендикулярно к оптической оси. Азот прокачивался вдоль разрядной трубки с небольшой скоростью – менее 0,1 л/мин. Генерация была получена и в отсутствие выходного зеркала, однако энергия генерации в этом случае была значительно ниже. Лазерное излучение имело форму кольца с внешним диаметром 33 мм толщиной 1–1,5 мм.

Спектры спонтанного излучения и генерации индукционного азотного лазера показаны на рис. 3. Спектры регистрировались в диапазоне от 250 до 800 нм. Излучение присутствовало только в диапазоне 280–420 нм и соответствовало второй положительной системе полос перехода  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ . Наибольшая интенсивность была зарегистрирована в полосах (1,0) – 310,5 нм, (0,0) – 337,1 нм, (0,1) – 357,7 нм и (0,2) – 380,4 нм (рис. 3, а). Максимальную интенсивность имела полоса (0,0) с длиной волны в канте 337,1 нм. На этой длине волны была полу-

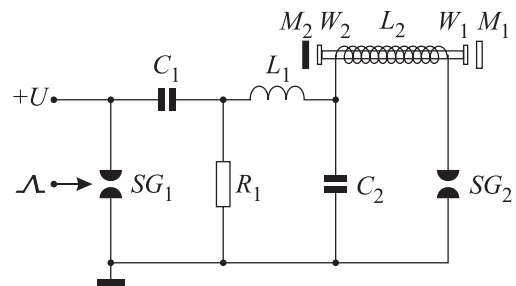


Рис. 1. Электрическая схема системы возбуждения индукционного лазера:  $U$  – 25 кВ;  $SG_1$  – управляемый высоковольтный разрядник;  $SG_2$  – неуправляемый высоковольтный разрядник;  $C_1 = 100$  нФ;  $C_2 = 18$  нФ;  $L_1 = 150$  мкГн;  $L_2 = 120$  нГн – индуктор;  $W_1, W_2$  – окна;  $M_1, M_2$  – зеркала резонатора

чена генерация, спектр которой представлял собой одну узкую линию (рис. 3, б). Спектрометр фирмы SOLAR, модель S-150, имел низкое спектральное разрешение 0,66 нм, поэтому детальные исследования структуры спектра генерации в этих экспериментах не проводились и являются предметом наших дальнейших исследований. Также была измерена расходимость лазерного излучения путем сравнения размеров пучка на выходе лазера и на расстоянии 10 м. Расходимость излучения составила 0,3 мрад.

В экспериментах отмечалась высокая однородность индукционного разряда. Это проявилось при изучении работы азотного лазера в импульсно-периодическом режиме. Частота следования импульсов в этих первых экспериментах изменялась в диапазоне от 1 до 25 Гц и была ограничена только возможностями источника питания лазера. Зависимость средней мощности генерации от частоты следования импульсов в этом диапазоне была линейной. В экспериментах отмечалась высокая воспроизводимость от импульса к импульсу амплитуды генерации, которая объяснялась нами как одно-

родностью и воспроизводимостью цилиндрического индукционного разряда, так и стабильностью работы электрической системы возбуждения. Этот факт был подтвержден одновременной регистрацией импульсов напряжения на индукторе и импульсов генерации при различных частотах следования импульсов. Поскольку активная среда непосредственно прилегает к внутренней поверхности разрядной трубки и имеет малую толщину – примерно 1,5 мм, то газ в зоне индукционного разряда эффективно охлаждается стенкой трубки. Это позволяет рассчитывать на увеличение средней мощности генерации индукционного азотного лазера до 200 мВт при увеличении частоты следования импульсов возбуждения до  $\sim 10^2$  Гц.

В результате проведенных исследований была разработана и экспериментально изучена система формирования импульсного индукционного цилиндрического разряда в газах. Впервые исследованы спектральные и временные характеристики излучения импульсного индукционного разряда в азоте. Впервые получена генерация на электронных переходах молекулярного азота при

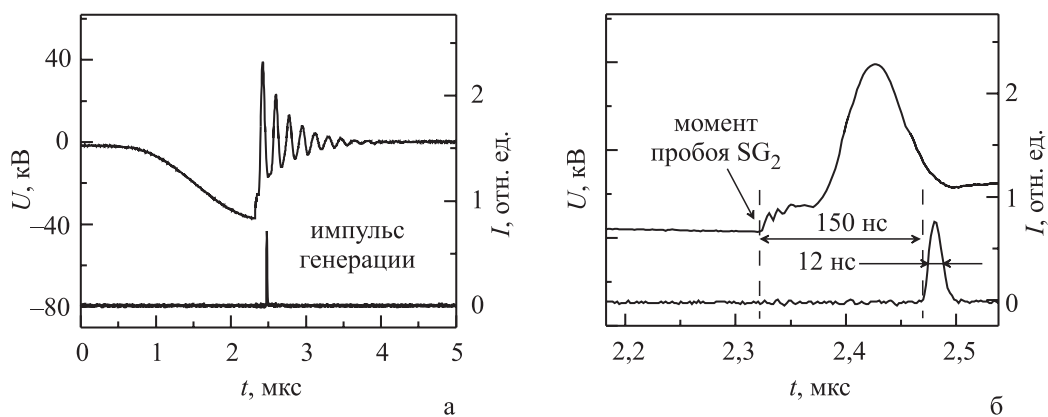


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на соленоиде  $L_1$  и лазерного излучения

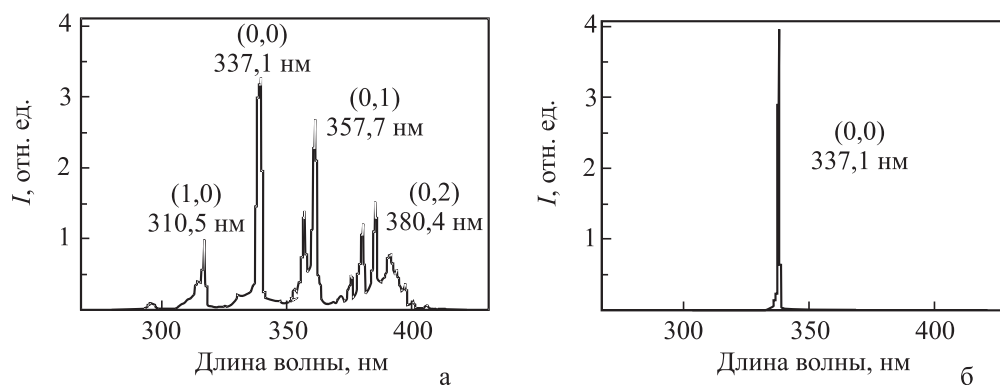


Рис. 3. Спектральные линии спонтанного (а) и лазерного (б) излучения азота

давлениях 0,1–1,5 тор. Максимальная энергия генерации достигалась при давлении 0,4–0,7 тор и была равна 1,2 мДж. Длительность импульсов излучения, измеренная на полувысоте, составила  $12 \pm 1$  нс. Таким образом, импульсная мощность генерации оказалась равной 100 кВт. В поперечном сечении световой пучок имел форму кольца с внешним диаметром 33 мм толщиной 1–1,5 мм. Расходимость излучения была 0,3 мрад.

#### Список литературы

1. Ражев А. М., Мхитарян В. М., Чуркин Д. С. FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // Письма ЖЭТФ. 2005. Т. 82, вып. 5. С. 290–294.
2. Razhev A. M., Zhupikov A. A. Excimer ArF laser with an output energy of 1.3 J at 2.0 % efficiency on the He : Ar : F<sub>2</sub> mixture // Applied Physics. 2005. В 81. P. 1113–1117.
3. Седова И. В., Сорокин С. В., Торпов А. А. и др. Лазерная генерация в гетероструктурах Cd(Zn)Se / ZnMgSSe при накачке

излучением азотного и InGaN / GaN лазеров // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 9. С. 1135–1140.

4. Ражев А. М., Телегин Г. Г. Импульсные ультрафиолетовые лазеры на молекулярном азоте // Зарубежная радиоэлектроника. 1978. Т. 3. С. 76–94.
5. Gerry E. T. Pulsed-molecular-nitrogen laser theory // Applied Physics. 1965. Vol. 7. No. 1. P. 6–8.
6. Jeunehomme M., Duncan A. B. F. Lifetime measurements of some excited states of nitrogen, nitric oxide, and formaldehyde // J. Phys. C. 1964. Vol. 41. No. 6. P. 1692–1699.
7. Leonard D. A. Saturation of the molecular nitrogen second positive laser transition // Applied Physics. 1965. Vol. 7. No. 1. P. 4–6.
8. Cartwright D. C. Total cross sections for the excitation of the triplet states in molecular nitrogen // Phys. Rev. A. 1970. Vol. 2. No. 4. P. 1331–1348.

Материал поступил в редколлегию 02.05.2007