

# Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер

А. М. Ражев<sup>1)</sup>, Д. С. Чуркин

Институт лазерной физики Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 31 июля 2007 г.

Создан индукционный импульсный азотный лазер с длиной волны излучения 337.1 нм и импульсной мощностью 200 кВт. Описана система возбуждения импульсного индукционного разряда цилиндрической формы в азоте. Исследованы спектральные, энергетические и временные параметры лазерного излучения. Получена энергия генерации 2.4 мДж с длительностью импульсов  $12 \pm 1$  нс. Лазерное излучение имело форму кольца с внешним диаметром 33 мм и толщиной 1–1.5 мм. Расходимость излучения имела величину 0.3 мрад.

PACS: 32.70.Fw, 42.55.Lt, 52.80.Yr

В работе [1] было предложено использование импульсного индукционного разряда для возбуждения газовых лазеров на различных переходах атомов и молекул. В этой работе был описан первый импульсный индукционный лазер, который работал на электронных переходах атомов фтора в области спектра 703–731 нм. Для формирования индукционного разряда использовалась система возбуждения, собранная по схеме L-C инвертор, хорошо зарекомендовавшая себя при создании высокоэффективных УФ эксимерных лазеров [2].

Целью данной работы было исследование импульсного индукционного разряда в азоте и получение генерации на электронном переходе  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  в ультрафиолетовой области спектра. Индукционным разрядом в данном случае мы называем индукционно связанную плазму, созданную вихревыми электрическими токами в результате электромагнитной индукции, полученной переменным магнитным полем в газовой среде. Отличие индукционного разряда от обычных электрических продольных и поперечных разрядов заключается в том, что он формируется без использования каких-либо электродов в газе.

Интерес к созданию индукционного азотного лазера вызван тем, что он работает в УФ области спектра на длине волны 337.1 нм. Этот лазер является одним из наиболее распространенных источников мощного УФ лазерного излучения и имеет много различных применений, таких как накачка лазеров на красителях [3] и полупроводниковых лазеров [4], в спектроскопии, диагностике, фотохимии [5] и медицине [6].

Для получения генерации на молекулярном азоте с длиной волны 337.1 нм используются два способа

возбуждения – продольный и поперечный импульсные электрические разряды [7]. При возбуждении азота продольным разрядом или поперечным разрядом с маленьким активным объемом энергия генерации обычно невелика и не превышает 0.1–0.2 мДж, но возможна работа с высокой частотой следования импульсов – до 10 кГц и более [8]. В поперечном разряде, с увеличенным активным объемом, энергия генерации азотного лазера значительно выше и достигает 10 мДж и более. Однако при создании такого лазера возникают определенные технические трудности, а частота следования импульсов не превышает нескольких десятков герц. Обычные импульсные электрические разряды создаются между металлическими электродами и сопровождаются 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.

Импульсный индукционный разряд формируется без использования каких-либо электродов, а следовательно, свободен от вышеперечисленных проблем, ограничивающих применение лазера. Помимо этого, импульсный индукционный разряд представляет физический интерес, связанный с селективным возбуждением и тушением отдельных состояний в молекулах.

Исследованию и созданию азотных лазеров посвящено большое количество работ, многие из которых рассмотрены в обзоре [7], где описаны различные конструкции разрядных камер. Механизм образования инверсии на переходе  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  изучен достаточно хорошо и описан в [9, 10]. Он основан на представ-

<sup>1)</sup>e-mail: razhev@laser.nsc.ru

лении о прямом возбуждении молекулы азота электронным ударом из основного состояния  $X^1\Sigma_g^+$ , при котором преимущественное заселение верхних рабочих уровней происходит в соответствии с принципом Франка-Кондона. Радиационное время жизни молекулы азота на верхнем уровне  $C^3\Pi_u$  составляет  $\tau_C \approx 38$  нс [11] и определяется в основном переходом на нижний уровень  $B^3\Pi_g$ , имеющий время жизни  $\tau_B \approx 9$  мкс [11], то есть  $\tau_C \ll \tau_B$ . С уровня  $B^3\Pi_g$  переход возможен только на метастабильный уровень  $A^3\Sigma_u^+$ . Поэтому, в обычных условиях скорость расщеления уровня  $B^3\Pi_g$  в результате столкновений молекулы азота с другими частицами сравнительно мала и на переходе  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  не может быть стационарной инверсии. Получение инверсии возможно лишь в нестационарном режиме на фронте импульса возбуждения при условии, что скорость возбуждения верхнего уровня выше, чем нижнего. Такие переходы называются самоограниченными. В описанных в литературе азотных лазерах для создания объемного однородного электрического разряда и получения генерации на переходах второй положительной системы полос молекулярного азота необходимо выполнение условия  $E/p \geq 200$  В/см·торр ( $E = U/d$ , где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам, между которыми создается разряд;  $d$  – расстояние между электродами;  $p$  – давление азота) [12]. В отличие от продольного и поперечного электрических разрядов индукционный разряд формируется в отсутствие каких-либо электродов в результате магнитной индукции и параметр  $E/p$  становится неопределенным. Однако общая концепция создания УФ азотных лазеров предполагалась неизменной, и в нашем случае необходимо было создать индукционно-связанную плазму с электронными параметрами, обеспечивающими реализацию механизма образования инверсии, описанного выше, а именно, достижение в начальной стадии разряда концентрации электронов  $10^{14} - 10^{15}$  см $^{-3}$  с энергией 12–16 эВ [13].

В данной работе использовалась система возбуждения импульсного индукционного цилиндрического разряда в газе, собранная по схеме, показанной на рис.1. Эта система возбуждения отличалась от описанной нами в работе [1] и обеспечивала более эффективную передачу энергии из накопительной емкости  $C_1$  в емкость  $C_2$ , а затем в активную среду. В созданной установке емкость  $C_1$  заряжалась от внешнего импульсного источника питания до напряжения 20–25 кВ (в данном случае была использована модель АЛЕ 152А фирмы Lambda EMI). Это соответствовало запасаемой энергии 18–30 Дж. В момент достижения максимума напряжения на емкости  $C_1$ , на

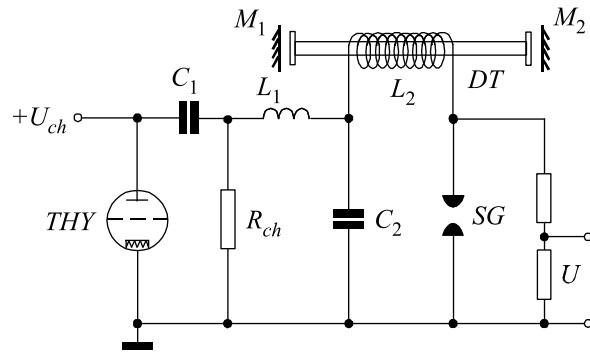


Рис.1. Электрическая схема системы возбуждения  $N_2$ -лазера импульсным индукционным цилиндрическим разрядом. ТНУ – тиристорный коммутатор ТПИ1-10к/20, SG – неуправляемый искровой газонаполненный разрядник,  $L_1$  – зарядный дроссель,  $L_2$  – соленоид,  $C_1 = 100$  нф,  $C_2 = 20$  нф, DT – разрядная трубка

высоковольтный коммутатор ТНУ (тиристорный коммутатор модели ТПИ 10к/20) подавался пусковой импульс, и емкость  $C_1$  перезаряжалась в емкость  $C_2$  через дроссель  $L_1$  с оптимизированной индуктивностью, равной 120 мкГн. Перезарядка осуществлялась за время 1.5–2.0 мкс. Осциллограмма импульса напряжения показана на рис.2а. Результаты исследований, представленные в данной статье, были получены при зарядном положительном напряжении  $U_{ch} = 23$  кВ. В этих условиях на емкости  $C_2$  достигалось отрицательное напряжение  $U = 40$  кВ, что соответствовало энергии 16 Дж, запасенной в этой емкости. Такое же напряжение  $U$  через соленоид  $L_2$ , располагавшийся на стеклянной (керамической) трубке с азотом, подавалось на искровой самопробиваемый разрядник  $SG$ , который в данном случае был необходим для разрядки емкости  $C_2$  через соленоид  $L_2$  с максимальной скоростью и обеспечения переменного магнитного поля в газе. Таким образом, энергия из соленоида передавалась в газ для получения индукционного разряда с использованием магнитной индукции. В результате возникновения движения зарядов в переменном магнитном поле индуцировались циркулярные электрические токи, которые формировали индукционный разряд в азоте. При давлениях, соответствующих режиму генерации азотного лазера, индукционный разряд приобретал форму цилиндра и концентрировался вблизи внутренней поверхности разрядной трубки  $DT$ . Трубка герметизировалась плоскопараллельными окнами из кварца, расположенными по торцам перпендикулярно оси трубки. С внешней стороны вблизи окон располагались плоские диэлектрические зеркала. Заднее зеркало имело коэффициент отражения 99% на длине волны 337 нм,

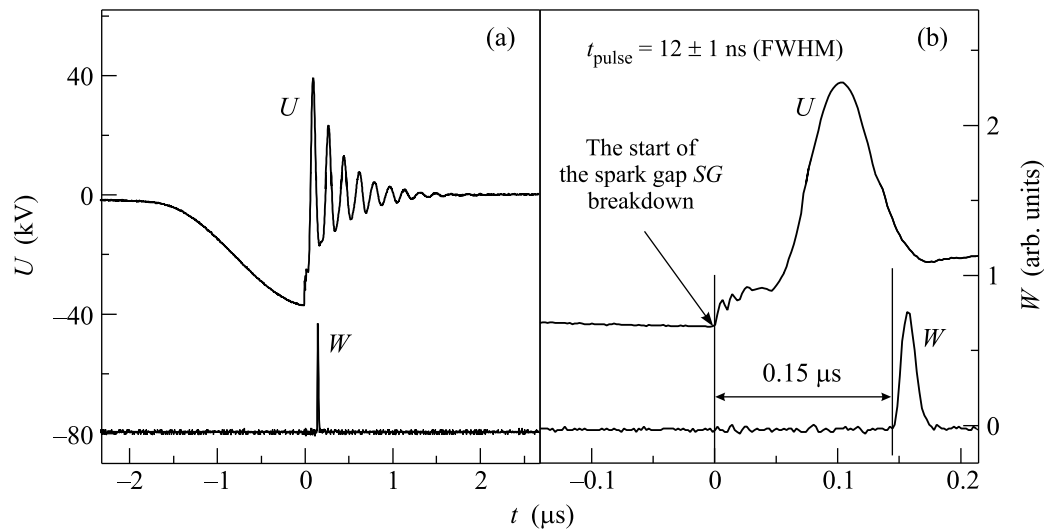


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на индукторе  $L_1$  и генерации азотного лазера (а). Детальный вид положения импульса генерации  $N_2$ -лазера относительно момента пробоя разрядника  $SG$  (b)

а выходное заменялось в ходе экспериментов, для чего использовались зеркала с коэффициентом отражения от 15 до 90%. В экспериментах исследовалась интенсивность излучения индукционного разряда в зависимости от параметров системы возбуждения и конструкции соленоида  $L_2$ . В соленоиде использовалось различное количество секций, намотанных изолированным многожильным проводом сечением от 1.5 до 6 мм<sup>2</sup>. Число витков в каждой секции изменялось от 3 до 20. Длина соленоида определяла длину активной среды и изменялась от 40 до 60 см. В экспериментах использовались трубки с различным внутренним диаметром от 18 до 33 мм. В связи с тем, что максимальная энергия генерации была получена в трубке с внутренним диаметром 33 мм, все представленные ниже результаты относятся к лазеру, собранному на основе этой трубки.

Типичная форма импульса напряжения на емкости  $C_2$  показана на рис.2а. Более подробно центральная часть этого импульса вблизи момента пробоя разрядника  $SG$  представлена на рис.2b. Видно, что через 100 нс после пробоя разрядника  $SG$  на емкости  $C_2$  происходит смена полярности напряжения с амплитудой от  $-40$  кВ до  $+40$  кВ. В дальнейшем наблюдался затухающий колебательный процесс в течение 1.5 мкс. Представленная осциллограмма импульса напряжения была получена в трубке с активной длиной 60 см. Трубка была заполнена чистым азотом при давлении 0.4 торр.

В экспериментах исследовался спектральный состав излучения азота в индукционном разряде. Для

регистрации спектров использовался спектрометр фирмы SOLAR LS, модель S-150 с разрешением 0.66 нм. Регистрация спонтанного излучения проводилась в отсутствие зеркал резонатора в диапазоне от 250 до 800 нм, однако излучение наблюдалось только в диапазоне 280–420 нм. Спектр этого излучения показан на рис.3а. Интерпретация спектра показала, что он соответствует второй положительной системе полос перехода  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  молекулярного азота. Наибольшую интенсивность излучения имели полосы (0.0) – 337.1 нм и (0.1) – 357.7 нм. При установке оптического резонатора впервые была получена генерация на азоте в индукционном разряде на длине волны 337.1 нм, спектр которой состоял из одной узкой линии, показанной на рис.3b. Положение линии генерации во временном масштабе относительно импульса напряжения на емкости  $C_2$  и момента пробоя разрядника показано на рис.2а и рис.2b.

Исследовались энергетические характеристики генерации индукционного азотного лазера. Было получено, что генерация возникала при относительно небольших для этого лазера давлениях азота, а именно, в диапазоне 0.1–1.5 торр (рис.4). Энергия лазерного излучения измерялась измерителем импульсной энергии фирмы Ophir Optronics, модель PE50-V2-SH. При зарядном напряжении 23 кВ максимальная энергия генерации была получена при давлении 0.6 торр и оказалась равной 2.4 мДж. В этом случае в резонаторе использовалось выходное зеркало с отражением 50%.

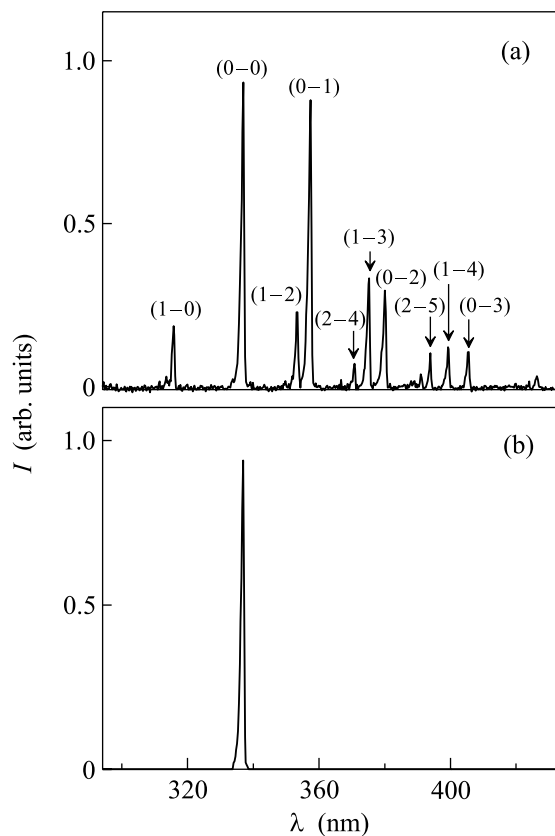


Рис.3. Спектры спонтанного (а) и лазерного (б) излучений  $N_2$  в импульсном индукционном цилиндрическом разряде.  $U_{ch} = 23$  кВ

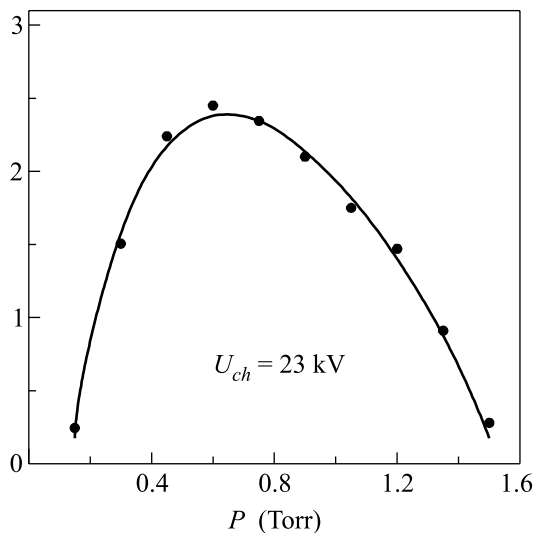


Рис.4. Зависимость энергии генерации  $N_2$ -лазера от давления азота.  $U_{ch} = 23$  кВ

Генерация имела форму кольца с внешним диаметром 33 мм толщиной 1–1.5 мм. Измерения расходимости генерации показали, что она равна 0.3 мрад.

Такая форма пучка является особенностью импульсных индукционных лазеров с цилиндрическим индукционным разрядом. Однако это, на наш взгляд, не является недостатком, а наоборот, может иметь определенные преимущества при использовании таких пучков. Кольцевое излучение с малой расходимостью хорошо фокусируется с распределением энергии по сечению пучка в фокусе, подобным гауссову. Такая форма излучения может быть использована аналогично бездифракционным бесселевым пучкам [14].

Исследовались временные характеристики генерации индукционного азотного лазера. С использованием коаксиального фотоэлемента ФЭК-22 и осциллографа TDS 2024 с полосой 200 МГц измерялась длительность импульсов. На полувысоте она оказалась равной  $12 \pm 1$  нс, тогда как по основанию длительность превышала 35 нс. Относительно момента срабатывания разрядника  $SG$  импульс генерации был задержан на 150 нс. Таким образом, как следует из рис.2б, момент появления генерации приходится на задний фронт первого положительного полупериода колебаний напряжения на соленоиде. Отсюда следует, что и индукционный разряд возникает в этот же момент времени, так как согласно механизму образования инверсии в обычном электроразрядном азотном лазере, основанному на возбуждении молекул азота прямым электронным ударом, задержка генерации относительно начала импульса тока имеет очень малую величину. Однако следует отметить, что этот вывод нуждается в дополнительной проверке, так как механизмы формирования обычного электрического разряда между двумя электродами и индукционного разряда посредством индукции магнитного поля могут быть различны. Следовательно, могут различаться электронные параметры плазмы и возникать особенности в процессах создания и разрушения инверсии.

В экспериментах исследовалась возможность работы индукционного азотного лазера в импульсно-периодическом режиме. Частота следования импульсов изменялась в диапазоне от 0.1 до 25 Гц и была ограничена возможностями источника питания лазера. Было получено, что при увеличении частоты следования импульсов средняя мощность генерации увеличивалась по линейному закону. Таким образом, при частоте следования 25 Гц и энергии генерации азотного лазера 2.4 мДж была получена средняя мощность 60 мВт. При небольшой частоте следования импульсов (1–10 Гц) воспроизводимость амплитуды от импульса к импульсу составила  $\pm 2\%$ . При более высоких частотах следования нестабильность амплитуды

ды увеличивалась. Поскольку индукционный разряд, представляет собой полый цилиндр с малой толщиной разряда, который сосредотачивается вблизи внутренней поверхности разрядной трубки, то при использовании керамических трубок можно рассчитывать на хорошее охлаждение активной среды стенкой и получить линейный рост средней мощности азотного лазера при увеличении частоты следования импульсов до 100–500 Гц. Это позволит создать индукционный азотный лазер со средней мощностью порядка 1 Вт.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект # 06-02-16149-а.

1. А. М. Ражев, В. М. Мхитарян, Д. С. Чуркин, Письма ЖЭТФ **82**, 259 (2005).
2. А. М. Razhev and A. A. Zhupikov, Appl. Phys. B **81**, 1113 (2005).

3. G. Veith and A. J. Schmidt, J. Phys. E **11**, 833 (1978).
4. И. В. Седова, С. В. Сорокин, А. А. Торопов и др., Физика и техника полупроводников **38**, 1135 (2004).
5. Х. Курниаван, А. Н. Чумаков, Чунг Жи Ли и др., ЖПС **71**, 5 (2004).
6. В. Г. Аверин, Г. С. Баронов, Ф. Е. Чукреев, Физическое образование в ВУЗах **9**, 136 (2003).
7. А. М. Ражев, Г. Г. Телегин, Зарубежная электроника **3**, 76 (1978).
8. В. В. Атежев, С. К. Вартапетов, А. К. Жигалкин и др., Кв. электроника **34**, 790 (2004).
9. E. T. Gerry, Appl. Phys. Lett. **7**, 6 (1965).
10. A. W. Ali, Appl. Opt. **8**, 993 (1969).
11. M. Jeunehomme and A. B. F. Duncan, J. Chem. Phys. **41**, 1692 (1964).
12. D. C. Cartwright, Phys. Rev. A **2**, 1331 (1970).
13. D. A. Leonard, Appl. Phys. Lett. **7**, 4 (1965).
14. D. McGloin and K. Dholakia, Contemporary Physics **46**, 15 (2005).