

Исследование УФ излучения индукционного азотного лазера*

А.М.Ражев, Д.С.Чуркин, А.А.Жушков

При возбуждении молекул азота импульсным индукционным разрядом тороидальной формы получена генерация на длинах волн 337.1 и 357.7 нм. Описана система формирования импульсного индукционного разряда для возбуждения газовых лазеров. Зарегистрированы и интерпретированы спектры спонтанного излучения плазмы индукционного разряда в азоте и генерации азотного лазера. Изучена зависимость энергии и длительности импульсов генерации от добротности резонатора и уровня накачки. Достигнута энергия генерации индукционного азотного лазера 4.5 мДж при длительности импульсов на полувывоте 15 ± 1 нс. Генерация с большой импульсной мощностью (300 кВт) впервые получена при низком (около 1 Тор) давлении чистого азота. Исследовано пространственное распределение интенсивности лазерного излучения в поперечном сечении разрядной трубки. Сечение пучка излучения индукционного азотного лазера имело форму кольца с внешним диаметром 34 мм и шириной около 4 мм, а его расходимость составляла около 0.8 мрад. При частоте следования импульсов 30 Гц получена средняя мощность генерации 120 мВт.

Ключевые слова: импульсный индукционный разряд, азотный лазер.

1. Введение

Впервые о создании импульсного индукционного УФ лазера на молекулярном азоте сообщалось в 2007 г. в [1]. При возбуждении молекулярного азота импульсным индукционным разрядом тороидальной формы была получена энергия генерации 2.4 мДж при давлении 0.6 Тор на длине волны 337.1 нм.

Цель данной работы – показать, что импульсный индукционный разряд является эффективным альтернативным способом возбуждения газовых лазеров, имеющим ряд преимуществ по сравнению с поперечным и продольным электрическим разрядом. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных, временных и энергетических характеристик УФ излучения индукционного азотного лазера. Основной задачей было исследование особенностей излучения молекулярного азота в импульсном индукционном разряде и увеличение энергии генерации этого лазера.

Импульсным индукционным разрядом в данном случае мы называем индуктивно связанную плазму, созданную вихревыми электрическими токами в результате полученной переменным магнитным полем в газовой среде электромагнитной индукции. Отличие индукционного разряда от продольного и поперечного электрических разрядов заключается в том, что он формируется в газе без использования каких-либо электродов.

Интерес к азотному лазеру вызван его широким при-

менением, связанным с 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, используемого для накачки лазеров на красителях [2] и полупроводниковых лазеров [3], в спектроскопии, фотохимии [4] и медицине [5], а также для целей диагностики.

Для получения генерации на молекулярном азоте с длиной волны излучения 337.1 нм используются два наиболее распространенных способа возбуждения азота и его смесей с другими газами – с помощью продольного и поперечного импульсных электрических разрядов [6]. Хотя при возбуждении небольших активных объемов (до 10 см^3) энергия генерации невелика (0.1–0.2 мДж), можно создавать лазеры с высокой частотой следования импульсов – 10 кГц и более [7]. Использование поперечного разряда для возбуждения азотного лазера позволяет увеличить активный объем до 30–100 см^3 . В таких лазерах энергия генерации значительно выше и может достигать 10 мДж [8] и более [9]. Рабочее давление чистого азота в этих лазерах составляет 20–50 Тор, а в смесях азота с другими газами (He, Ar, SF₆, NF₃ и др.) – от 100 Тор до нескольких атмосфер. Вследствие этого при создании азотного лазера возникают технические трудности, связанные с разработкой систем возбуждения, в которых должен быть реализован объемный однородный разряд в азоте, являющийся активной средой лазера. Характеристики разряда сильно влияют на такие параметры лазера, как его выходная энергия, длительность импульсов, стабильность генерации и ресурс газовой среды. Как следствие, в поперечном разряде частота следования импульсов не превышает нескольких десятков герц. В связи с тем, что импульсные электрические разряды создаются между металлическими электродами, во время работы лазера происходит распыление материала электродов, приводящее к возникновению катодных пятен, формированию стримеров и в результате – к срыву генерации. Таким образом, требуется замена не только рабочего газа, но и электродов, а также оптических элементов лазерного резонатора.

*Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

А.М.Ражев, Д.С.Чуркин. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: razhev@laser.nsc.ru
А.А.Жушков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3

Поступила в редакцию 9 февраля 2009 г., после доработки – 14 мая 2009 г.

Поскольку импульсный индукционный разряд формируется без использования каких-либо электродов, он свободен от перечисленных проблем, ограничивающих применение лазера. Кроме того, импульсный индукционный разряд, который является индуктивно связанной плазмой, создаваемой вихревыми токами, представляет самостоятельный физический интерес как способ создания активной лазерной среды и реализации различных механизмов достижения инверсии на переходах атомов и молекул. Интересен механизм формирования импульсного индукционного разряда, т. к. в данном случае нет определенных представлений о таком параметре, как E/p ($E = U/d$, где U – напряжение, приложенное к электродам, между которыми создается разряд; d – расстояние между электродами; p – давление азота [10]), играющем принципиальную роль при создании электроразрядных азотных лазеров. Поэтому проблема исследования импульсного индукционного УФ азотного лазера является актуальной.

Исследованию УФ азотного лазера посвящено большое количество работ, многие из которых рассмотрены в обзоре [6]. Механизм образования инверсии на переходе $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$ молекулярного азота изучен достаточно хорошо и описан в [11, 12]. Он состоит в прямом возбуждении молекул 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 τ_C на верхнем лазерном уровне C^3P_u составляет ~ 38 нс [13] и определяется, в основном, переходом на нижний лазерный уровень B^3P_g с временем жизни $\tau_B \approx 9$ мкс [13] ($\tau_C \ll \tau_B$). С уровня B^3P_g радиационный переход возможен только на метастабильный уровень $A^3\Sigma_u^+$. Поэтому в обычных условиях скорость расселения уровня B^3P_g в результате столкновений молекулы азота с другими частицами сравнительно мала и на переходе $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$ 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⁻¹·Тор⁻¹. В индукционном разряде вследствие отсутствия каких-либо электродов параметр E/p становится неопределенным. Однако общая концепция УФ азотных лазеров предполагалась неизменной, и в данном случае необходимо было создать индуктивно связанную плазму с электронными параметрами, обеспечивающими реализацию описанного выше механизма образования инверсии, а именно получить в плазме электроны с концентрацией $10^{14} - 10^{15}$ см⁻³ и энергией 12–16 эВ [14].

2. Экспериментальная установка

В данной работе для формирования цилиндрического индукционного тороидального разряда в азоте использовалась система возбуждения, собранная по представленной на рис.1 схеме. Эта система возбуждения отличалась от описанной нами в работе [1] и обеспечивала более эффективную передачу энергии из накопительной емко-

сти C_1 в активную среду. Для повышения напряжения на индукторе и увеличения энерговклада в газ в схему была включена дополнительная емкость C_3 . Система возбуждения работала следующим образом. Емкость C_1 (80 нФ) заряжалась от импульсного источника питания (модель ALE 152A, Lambda EMI) до напряжения 20–27 кВ положительной полярности. При этом в емкости запасалась энергия 16–30 Дж. В момент достижения максимума напряжения на емкости C_1 на высоковольтный коммутатор ВК (тиратрон модели ТПИ 10к/20) подавался пусковой импульс. При срабатывании тириатрона емкость C_1 начинала разряжаться, на дросселе L_1 возникало отрицательное напряжение, а энергия передавалась в емкости C_2 и C_3 . Обе емкости заряжались за время 1.5–2.0 мкс до напряжения пробоя искрового разрядника ИР. Емкость C_3 и разрядник ИР представляли собой малоиндуктивный контур, в котором после срабатывания разрядника емкость C_3 начинала разряжаться немного раньше, чем емкость C_2 . При разрядке последней через индуктор L_2 протекал переменный ток, который формировал в разрядной трубке индукционный разряд. Момент зажигания индукционного разряда определялся по появлению спонтанного излучения азота в разрядной трубке.

Спектры спонтанного излучения индукционного разряда в азоте, а также спектр лазерной генерации регистрировались спектрометром S-150 (SOLAR LS) с разрешением 0.66 нм в спектральном диапазоне 200–1100 нм и спектрографом-монокроматором SpectraPro-500 (Acton Research Corp.) с разрешением 0.025 нм в спектральной области 180–700 нм. Энергия лазерного излучения измерялась пирозлектрическим измерителем PE50-BB (OPHIR). Временные параметры электрических импульсов регистрировались высоковольтными пробниками P6015A и осциллографом Tektronix TDS-2024 с полосой 200 МГц. Для регистрации временных характеристик оптических импульсов применялся коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22 с разрешением 10^{-10} с. Для предотвращения искажений формы импульсов фотоприемником интенсивность излучения регулировалась с помощью светофильтров типа УФС-1, УФС-6 и др. Пространственное распределение интенсивности лазерного излучения по сечению трубки и профиль светового пучка анализировались с использованием цифровой видеокамеры WinCamD-UCM (Data Ray Inc.).

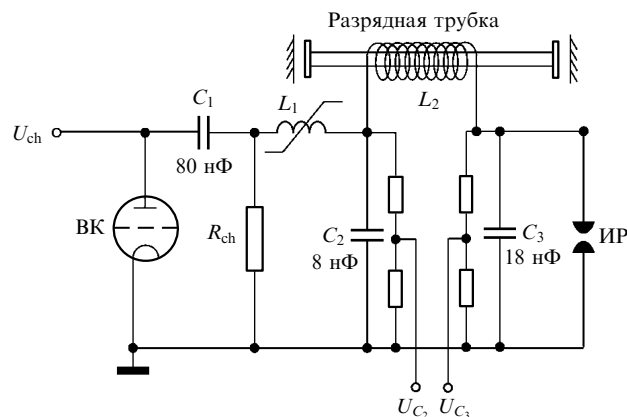


Рис.1. Электрическая схема системы возбуждения N_2 -лазера импульсным индукционным цилиндрическим разрядом: ВК – высоковольтный коммутатор (тиратрон ТПИ1-10к/20); ИР – неуправляемый искровой газонаполненный разрядник; L_1 – зарядный дроссель; L_2 – индуктор.

В работе [1] при исследовании индукционного азотного лазера было выяснено, что энергия генерации пропорциональна диаметру разрядной трубки, т. е. чем больше диаметр трубки, тем больше КПД лазера и энергия генерации. Поэтому в описанных ниже экспериментах использовалась керамическая разрядная трубка с внутренним диаметром 34 мм и внешним диаметром 40 мм. Трубка герметизировалась плоскопараллельными кварцевыми окнами, расположенными перпендикулярно или под углом Брюстера к ее оси (рис.1). Оптический резонатор был образован внешними плоскими диэлектрическими зеркалами. Заднее зеркало имело коэффициент отражения $R_1 = 99\%$ в области спектра 300–380 нм. Коэффициент отражения выходного зеркала в ходе экспериментов оптимизировался с целью достижения максимальной энергии генерации. Использовались зеркала с коэффициентами отражения от 8% до 93%.

Индуктор L_2 состоял из отдельных секций, представлявших собой соленоиды из многожильного провода сечением 4 мм². Представленные в данной статье результаты были получены с использованием индуктора, содержащего 20 секций по 5 витков в каждой. Соленоиды соединялись между собой параллельно, общую длину индуктора (~60 см) мы считали длиной активной среды азотного лазера. Из газовой системы в трубку напускался азот или его смеси с другими газами в диапазоне давлений 0.1–10 Тор. В ходе экспериментов осуществлялась продольная прокачка газов.

3. Результаты и их обсуждение

Эксперименты по получению индукционного разряда в чистом азоте показали, что диапазон давлений, в котором существует индуктивно связанная плазма, невелик: 0.1–10 Тор. При визуальном наблюдении с использованием различных светофильтров был отмечен тот факт, что индукционный разряд в трубке имел хорошую однородность, которая не изменялась во всем диапазоне давлений. Никаких искр и стримеров при индукционном разряде в чистом азоте и его смесях с другими газами не наблюдалось. Судя по полученным осциллограммам напряжений на емкостях C_2 и C_3 , с ростом давления азота энергозатрат в индуктивно связанную плазму уменьшались. При минимальных давлениях азота (менее 0.1 Тор) индукционный разряд почти полностью заполнял разрядную трубку по всей длине индуктора и ее поперечному сечению. С дальнейшим увеличением давления (свыше 0.2 Тор) в центральной части трубки интенсивность свечения индукционного разряда начинала быстро уменьшаться. Разряд принимал тороидальную форму и сосредоточивался вблизи внутренней стенки трубки. Визуально разряд представлял собой светящийся цилиндр, толщина стенки которого уменьшалась с ростом давления. При давлениях азота, превышающих 4 Тор, интенсивность свечения разряда уменьшалась, и при давлении около ~10 Тор индукционный разряд скачкообразно прекращался. На внутренней поверхности разрядной трубки регистрировался слабый по интенсивности свечения электрический разряд, который мы считали емкостным. Исследования спектра спонтанного излучения плазмы импульсного индукционного разряда в азоте проводились в отсутствие зеркал оптического резонатора и при установке герметизирующих окон под углом к оси трубки, близким к углу Брюстера. Результаты регистра-

ции спектра показали, что все линии излучения сосредоточены во второй положительной системе полос молекулярного азота в спектральном диапазоне 300–400 нм (рис.2,а). Отношение интенсивностей линий в спектре зависело от давления азота. При давлениях 0.2–3.0 Тор выделялись две наиболее интенсивные линии, которые соответствовали полосам (0–0) на $\lambda_1 = 337.1$ нм и (0–1) на $\lambda_2 = 357.7$ нм.

После установки диэлектрических зеркал и настройки оптического резонатора при возбуждении азота импульсным индукционным разрядом в области давлений от 0.3 до 3 Тор была получена УФ генерация на переходах молекулярного азота. Максимум интенсивности генерации был зарегистрирован при давлениях 0.5–0.8 Тор. Исследования колебательной структуры спектра генерации азотного лазера показали, что, в отличие от результатов работы [1], лазерное излучение наблюдалось не на одной, а на двух линиях и соответствовало двум наиболее интенсивным линиям спонтанного излучения, т. е. полосам (0–0) на $\lambda_1 = 337.1$ нм и (0–1) на $\lambda_2 = 357.7$ нм (рис.2,б). В отличие от спонтанного спектра отношение интенсивностей этих линий оказалось достаточно большим. Интенсивность линии 337.1 нм превышала интенсивность линии 357.7 нм более чем в 100 раз. Интересным является тот факт, что об одновременной генерации на этих двух длинах волн в чистом азоте, причем при низком давлении (1–2 Тор), сообщалось лишь в единственной публикации [15]. В экспериментах, проводимых в этой работе, азот возбуждался продольным электрическим разрядом длительностью 1.5 мкс в трубке длиной 90 см с внутренним диаметром 3 мм. В [15] был исследован только спектр генерации, об энергетических и временных характеристиках лазерного излучения ничего не сообщалось. Результаты [15] оказались полезными для нашей работы и были использованы для интерпретации вращательной структуры спектров генерации индукционного лазера в полосах (0–0) и (0–1), поскольку вследствие не-

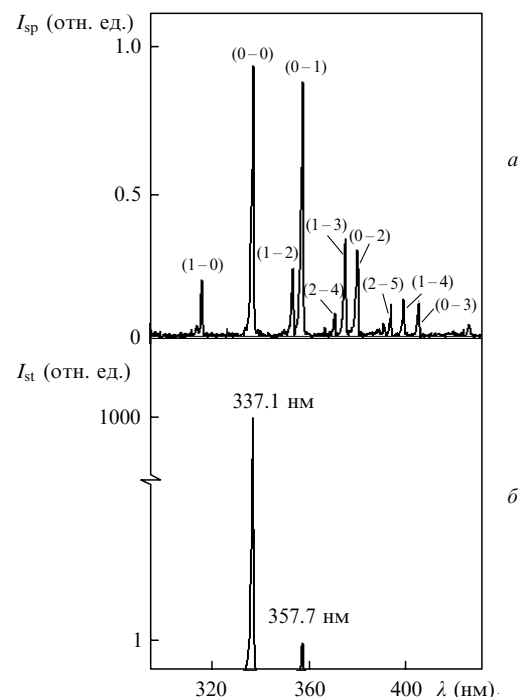


Рис.2. Спектры спонтанного излучения индукционного разряда в азоте (а) и генерации индукционного азотного лазера (б); $U_{ch} = +25$ кВ.

достаточного спектрального разрешения использованных приборов детальную вращательную структуру спектра этих линий зарегистрировать не удалось. Согласно измерениям ширины обеих линий таковы: $\Delta\lambda' = 4.5 \text{ \AA}$ для $\lambda_1 = 337.1 \text{ нм}$ и $\Delta\lambda'' = 4.5 \text{ \AA}$ для $\lambda_2 = 357.7 \text{ нм}$. Следуя [15], мы определили, что в нашем спектре генерации в полосе (0–0) присутствуют 32 линии, за которые ответственны 46 вращательных переходов (в основном Р-ветви) с длинами волн от 336.6912 до 337.1437 нм. В полосе (0–1) излучение вызвано 12 вращательными переходами Р-ветви и состоит из четырех линий с длинами волн от 357.6112 до 357.695 нм.

В экспериментах изучались временные зависимости импульсов возбуждения, спонтанного излучения и генерации индукционного азотного лазера. На рис.3 показаны осциллограммы импульсов напряжения U_{C_2} и U_{C_3} на емкостях C_2 и C_3 соответственно. С этими осциллограммами были сопоставлены осциллограммы импульсов спонтанного УФ излучения I_{sp} индукционного разряда в азоте и лазерной генерации I_{st} . Видно, что, в отличие от электроразрядных азотных лазеров, в индукционном азотном лазере начало импульса лазерной генерации I_{st} не совпадает по времени с началом импульса спонтанного излучения I_{sp} . Лазерная генерация возникает и протекает в период времени, соответствующий максимальному градиенту напряжения на емкости C_2 . Спонтанное излучение I_{sp} также возникает в этот период времени, но на 60–70 нс раньше генерации, и имеет значительно большую длительность (в 3–4 раза). На основе анализа полученных осциллограмм мы пришли к выводу, что первый небольшой максимум на осциллограмме спонтанного излучения I_{sp} объясняется возникновением емкостного разряда в азоте на внутренней поверхности трубки. Через 50–60 нс зажегся индукционный разряд и одновременно появлялся основной (максимальный по амплитуде и длительности) пик спонтанного УФ излучения азота, соответствующий возникновению и развитию во времени индукционного разряда в разрядной трубке. Осциллограмма основного пика спонтанного излучения I_{sp} , по нашему мнению, отражает форму импульса тока индукционного разряда в азоте. Индукционный и емкостный разряды в дальнейшем развивались во времени совместно до момента прекращения индукционного разряда. Емкостный разряд существовал в течение всего

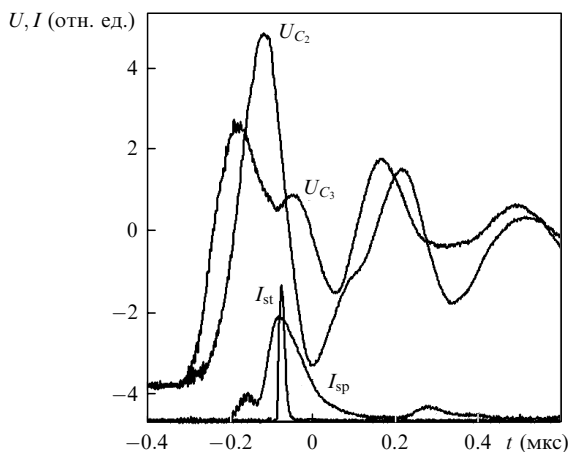


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на емкостях C_2 и C_3 , а также импульсов спонтанного излучения плазмы индукционного разряда в азоте I_{sp} и генерации азотного лазера I_{st} ; $U_{ch} = +25 \text{ кВ}$.

времени перезарядки емкости C_2 , а следовательно, существования переменного тока в индукторе L_2 .

Для увеличения энергии генерации индукционного азотного лазера по сравнению с энергией, полученной в [1], осуществлялась оптимизация добротности оптического резонатора. Результаты этой оптимизации показаны на рис.4. Из него следует, что максимальная энергия лазерного излучения (4.5 мДж) достигается при $R_2 = 60\%$. Длительность импульсов генерации, измеренная на полувысоте, была при этом равна $15 \pm 1 \text{ нс}$. Дальнейшее увеличение коэффициента отражения выходного зеркала приводило к снижению энергии генерации. Однако длительность импульсов генерации при этом увеличивалась от $13 \pm 1 \text{ нс}$ для $R_2 = 16\%$ до $18 \pm 1 \text{ нс}$ для $R_2 = 93\%$. Это больше, чем в электроразрядных азотных лазерах, где аналогичные значения не превышают 5–15 нс [8,9]. Длительность по основанию импульсов УФ излучения в плотном резонаторе превышала 55 нс.

Попытки использования каких-либо добавок к азоту с целью увеличения длительности и мощности генерации индукционного азотного лазера, а также получения генерации на других полосах второй положительной системы или других систем полос не дали никаких результатов. При добавлении к азоту инертных газов He, Ne, Ar и галогеносодержащих газов F_2 , NF_3 , SF_6 , CF_2Cl_2 было обнаружено, что при их небольших концентрациях (в диапазоне 1%–10%) от концентрации азота никаких изменений во временных, энергетических и спектральных характеристиках лазерного излучения не происходило. При больших концентрациях этих газов во всех случаях фиксировалось снижение энергии генерации. Можно предположить, что, поскольку в индукционном лазере активная среда не является последовательным элементом разрядной электрической цепи, добавление к азоту других газов не может повлиять на работу системы возбуждения и условия формирования индукционного разряда. Оно может повлиять лишь на кинетические процессы, связанные с возбуждением и тушением различных уровней молекулы азота, а также с поглощением излучения на различных переходах. Однако в условиях низкого полного давления влияние добавок сводится, по-видимому, к столкновительному тушению верхнего лазерного уровня и к разрушению инверсии. По этой причине все результаты, полученные в данной работе, относятся к возбуждению индукционным разрядом чистого азота.

На рис.5 показана зависимость энергии генерации E индукционного азотного лазера от зарядного напряже-

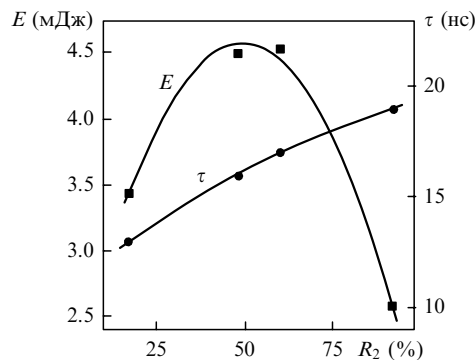


Рис.4. Зависимости энергии генерации E и длительности импульсов на полувысоте τ индукционного азотного лазера от коэффициента отражения выходного зеркала R_2 ; коэффициент отражения заднего зеркала $R_1 = 99\%$. $U_{ch} = +27 \text{ кВ}$.

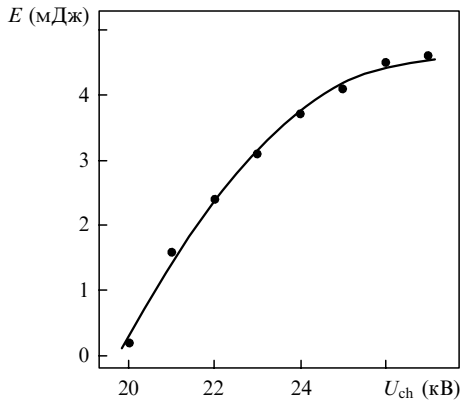


Рис.5. Зависимость энергии генерации E индукционного азотного лазера от зарядного напряжения U_{ch} ; $\tau = 15 \pm 1$ нс, $p = 0.5 - 0.8$ Тор.

ния U_{ch} . Видно, что генерация возникает при напряжениях, превышающих 20 кВ. В дальнейшем энергия генерации увеличивается с ростом зарядного напряжения, но не пропорционально ему. При напряжениях свыше 24 кВ скорость роста энергии замедляется. Во время измерений энергии при различных зарядных напряжениях давление азота оптимизировалось для каждого значения напряжения. С увеличением зарядного напряжения от 20 до 27 кВ оптимальное давление возрастало от 0.5 до 0.8 Тор. Максимальная энергия 4.5 мДж была получена при максимальном напряжении 27 кВ. При длительности импульсов 15 нс это соответствовало импульсной мощности лазерного излучения 300 кВт. Важно отметить, что такая большая импульсная мощность никогда ранее в азотном лазере при низких давлениях (порядка 1 Тор) не достигалась. Этот результат свидетельствует об особенностях работы индукционного азотного лазера, к которым относятся и соответствующий этому режиму возбуждения богатый вращательными линиями спектр генерации, и большая длительность импульсов с относительно пологим передним фронтом (около 7 нс). Полный КПД лазера, полученный как отношение энергии генерации E при максимальном напряжении к энергии, запасенной в емкости C_1 , был равен около 0.02 %. Согласно измерениям, нестабильность амплитуды генерации от импульса к импульсу составила ± 1 %.

С использованием цифровой видеокамеры было изучено пространственное распределение интенсивности лазерного излучения на выходе разрядной трубки. В поперечном сечении световой пучок имел форму кольца с внешним диаметром около 34 мм. Исследования профиля пучка показали, что по внешней границе кольца интенсивность лазерного излучения минимальна. По направлению к центру кольца интенсивность генерации увеличивалась и достигала максимума на расстоянии около 1 мм от внешней границы. Затем она убывала почти до нуля на расстоянии около 4 мм от нее. Это значение можно считать шириной кольца. Расходимость генерации, определяемая путем измерений размеров кольца лазерного излучения на разных расстояниях от лазера (0.1 – 10 м), составила ~ 0.8 мрад. Кольцевая форма пучка является особенностью импульсных индукционных лазеров с цилиндрическим индукционным разрядом. При использовании таких пучков кольцевое излучение с малой расходимостью может иметь определенные преимуще-

ства, т.к. хорошо фокусируется с распределением энергии, подобным таковому при фокусировке бесселевых пучков.

В наших экспериментах исследовалась возможность работы индукционного азотного лазера в импульсно-периодическом режиме. Частота следования импульсов изменялась в диапазоне 1 – 30 Гц. Было получено, что при увеличении частоты следования импульсов средняя мощность генерации увеличивалась по линейному закону. При частоте следования 30 Гц и энергии генерации азотного лазера 4 мДж средняя мощность составила 120 мВт. Неизменность энергии генерации с ростом частоты объясняется охлаждением активной среды стенкой керамической трубки, т.к. область генерации непосредственно прилегает к ней.

4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований импульсного УФ индукционного лазера был выявлен ряд отличительных особенностей, обусловленных различиями в электронных параметрах индуктивно связанной плазмы и плазмы поперечного и продольного электрических разрядов. К таким особенностям относится генерация на двух длинах волн в чистом азоте ($\lambda_1 = 337.1$ нм и $\lambda_2 = 357.7$ нм). Впервые получены большие импульсная мощность (300 кВт) и энергия (4.5 мДж) лазерного излучения при низком давлении азота (около 1 Тор). Большая длительность импульсов генерации (18 нс на полувысоте) с относительно пологим передним фронтом (около 7 нс) свидетельствует об отличии индукционного разряда от электрического с точки зрения возбуждения лазерных уровней молекулярного азота. Следует отметить соответствующий этому режиму возбуждения богатый вращательными линиями спектр генерации, отсутствие влияния на этот спектр, а также на мощность и длительность генерации каких-либо добавок к азоту. Характерной особенностью является кольцевая форма лазерного пучка. Индукционный азотный лазер отличается малой расходимостью (0.8 мрад) лазерного излучения и нестабильностью его интенсивности от импульса к импульсу в пределах ± 1 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-02-16149-а).

1. Ражев А.М., Чуркин Д.С. *Письма ЖЭТФ*, **86**, 479 (2007).
2. Veith G., Schmidt A.J. *J. Phys. E*, **11**, 833 (1978).
3. Седова И.В., Сорокин С.В., Торопов А.А. и др. *Физика и техника полупроводников*, **38**, 1135 (2004).
4. Курниаван Х., Чумаков А.Н., Чунг Жи Ли и др. *ЖПС*, **71**, 5 (2004).
5. Аверин В.Г., Баронов Г.С., Чукреев Ф.Е. *Физическое образование в вузах*, **9**, 136 (2003).
6. Ражев А.М., Телегин Г.Г. *Зарубежная электроника*, **3**, 76 (1978).
7. Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жигалкин А.К. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 790 (2004).
8. Shipman J.D. *Appl. Phys. Lett.*, **10**, 8 (1967).
9. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 161 (1990).
10. Cartwright D.C. *Phys. Rev. A*, **2**, 1331 (1970).
11. Gerry E.T. *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 6 (1965).
12. Ali A.W. *Appl. Opt.*, **8**, 993 (1969).
13. Jeunehomme M., Duncan A.B.F. *J. Chem. Phys.*, **41**, 1692 (1964).
14. Leonard D.A. *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 4 (1965).
15. Каслин В.М., Петраш Г.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **3**, 88 (1966).