

И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко

Стабилизация разряда в азотном УФ-лазере с накачкой продольным разрядом

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 25.11.2005 г.

Исследованы характеристики генерации и разряда в азотном лазере с накачкой продольным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и SOS-диодом. Показано, что применение катода специальной конструкции, усиливающего электрическое поле внутри лазерной трубки, позволяет получать стабильную генерацию при длине лазерной трубки ~ 49 см. Приводятся амплитудно-временные характеристики генерации при различных давлениях азота и конструкциях катода.

Введение

Электроразрядные УФ-лазеры на молекулярном азоте (вторая положительная система, электронные полосы $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$, наиболее сильные переходы: $0-0$, $\lambda = 337,1$ нм и $0-1$, $\lambda = 357,7$ нм) в настоящее время достаточно хорошо изучены [1–4]. Они сравнительно просты в изготовлении, а в качестве активной среды используется дешевый, нетоксичный и не агрессивный газ. Поэтому азотные лазеры являются удобными объектами для проверки новых систем и способов накачки.

Одним из таких сравнительно новых способов накачки для импульсных лазеров на плотных газах является накачка от генераторов с индуктивными накопителями энергии [5]. Индуктивные накопители энергии начинают все более широко использоваться для накачки импульсных газовых лазеров различных типов [6–10]. К наиболее важным факторам, определяющим развитие данного направления, можно отнести создание и совершенствование SOS-диодов [11]. Такие полупроводниковые приборы отличаются высокой надежностью и могут работать при высоких частотах следования импульсов. В [12] было показано, что при уменьшении амплитуды тока, обрываемого SOS-диодом, частота следования импульсов может достигать 12 кГц, а при малых токах до 100 кГц [13].

Для получения генерации в азоте используется накачка как поперечным [1–4], так и продольным разрядом [14–17]. Лазеры с продольным разрядом работают при больших частотах повторения без прокачки рабочего газа, но имеют ограничения на длину лазерной трубки. Так, еще в работах [14,15] было показано, что при длине разрядной трубки более 30 см мощность УФ-генерации в азоте быстро уменьшается.

Цель данной работы — найти способ увеличения активной длины разрядной УФ-трубки азотного лазера, возбуждаемого продольным разрядом, без уменьшения мощности генерации. Для решения

этой задачи были использованы генератор с индуктивным накопителем энергии, а также результаты исследований формирования разряда в неоднородном электрическом поле [18–20].

1. Экспериментальная установка и методики

Для исследований была использована установка, подобная описанной в [17]. Она состояла из импульсного генератора и лазерной трубки. Накачка осуществлялась от индуктивного накопителя энергии, схема показана на рис. 1.

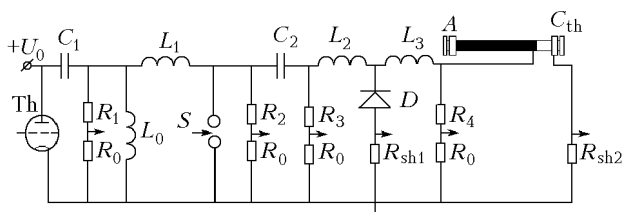


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема генератора накачки азотного лазера с индуктивным накопителем энергии на базе полупроводникового прерывателя тока: $+U_0$ — зарядное напряжение положительной полярности; Th — тиратрон ТГИ-1000/25; C_1 — первичный емкостный накопитель энергии; C_2 — вторичный накопитель энергии; L_0 — зарядная индуктивность; L_1 — линейная индуктивность 6,8 мкГн; L_2 — индуктивный накопитель энергии; L_3 — индуктивность электрических проводников; S — разрядник тригатронного типа; D — SOS-диод; $R_0 - R_4$, R_{sh} — резистивные делители напряжения и резистивный шунт; A и C_{th} — анод и катод газоразрядной лазерной камеры

Включение газового разрядника тригатронного типа осуществлялось высоковольтным импульсом в момент достижения максимального напряжения на конденсаторной батарее C_1 емкостью 5,5 нФ. Емкости C_1 и C_2 были собраны из последовательно-параллельно соединенных керамических конденса-

торов КВИ-3 (10 кВ, 3300 пФ). В качестве прерывателя тока D использовались специальные кремниевые SOS-диоды [5] с максимальным обратным напряжением 120 кВ и максимальной амплитудой обрываемого тока 4,0 кА.

Разряд возбуждался в керамических трубках с внутренним диаметром 0,7 и 0,9 см, длины которых составляли 19 и 49 см. Конструкция лазерной трубки с электродами и зеркалами показана на рис. 2.

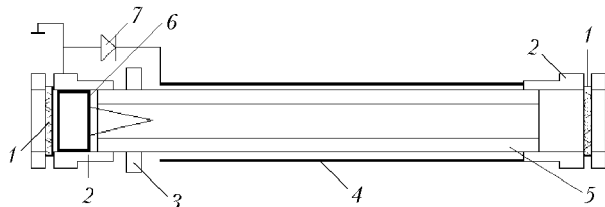


Рис. 2. Схематическое представление лазерной камеры: 1 – зеркала лазерного резонатора; 2 – латунные электроды; 3 – изолятор; 4 – медная оплетка; 5 – керамическая трубка; 6 – медное кольцо с Y-образным катодом; 7 – SOS-диод

На внешней поверхности трубки со стороны потенциального электрода устанавливался металлический экран. Зазор между экраном и заземленным корпусом равнялся 75 мм, а керамическая трубка была углублена в корпус на 15 мм. Для стабилизации пробоя разрядного промежутка внутрь трубки вставлялся Y-образный электрод, направленный острием к аноду и соединенный с катодом, длина которого относительно торца керамической трубки изменялась от 2 до 130 мм. Эксперименты также проводились и без Y-образного электрода. Частота повторения импульсов обычно составляла 10 Гц. Лазер также включался и при частотах следования импульсов 8, 30, 50 и 100 Гц.

Резонатор был образован плоским зеркалом с Al напылением и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Энергия и средняя мощность излучения измерялись калориметром ИМО-2Н, форма импульса излучения регистрировалась фотодиодом ФЭК-22 СПУ. Осциллограммы напряжения и тока регистрировались с помощью омических делителей напряжения и токовых шунтов или поясов Роговского. Электрические сигналы записывались скоростным цифровым осциллографом TDS3032.

2. Экспериментальные результаты

В работах [14, 15] по исследованию азотных лазеров с накачкой продольным разрядом, как мы уже отмечали, при увеличении длины лазерной трубки более 30 см наблюдалось быстрое уменьшение импульсной и средней мощности излучения. Испытания двух трубок длиной 19 и 49 см дали подобные результаты. Энергия в импульсе с трубкой длиной 19 см составила в оптимальных условиях $\sim 0,2$ мДж, и лазер стабильно работал в импульсно-периодическом режиме с частотой до 100 Гц. Оптимальное давление азота составило 21 торр.

При использовании лазерной трубки длиной 49 см генерация была очень нестабильной и имела

даже в лучших импульсах малую энергию излучения в импульсе. Отметим, что для накачки обеих трубок мы использовали генератор с индуктивным накопителем энергии. Это позволяло иметь амплитуду импульса напряжения на промежутке более 100 кВ. Характерные осциллограммы тока, протекающего через SOS-диод, и импульса напряжения на лазерной камере показаны на рис. 3.

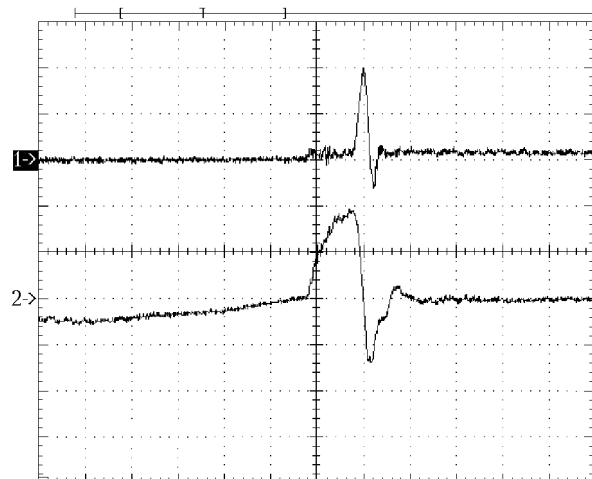


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1) на аноде лазерной головки (вертикальная развертка 65 кВ/дел) и тока (2), протекающего через SOS-диод и шунт R_{sh1} (вертикальная развертка 620 А/дел) в режиме холостого хода. Горизонтальная развертка 50 нс/дел

Видно, что ток обрыва SOS-диода составляет около 1,2 кА, а напряжение на разрядном промежутке достигает примерно 130 кВ. Основной причиной нестабильности генерации и малой энергии излучения в импульсе являются времена запаздывания пробоя газа в длинной лазерной трубке при давлениях, которые соответствовали оптимальным значениям параметра E_0/p (E_0 – напряженность электрического поля при пробое промежутка, p – давление азота). Стабильный пробой лазерной трубки можно было осуществить только при давлениях азота существенно ниже оптимального. Установка внутри керамической трубки Y-образного электрода, соединенного с катодом, позволила решить эту проблему. Так как Y-образный электрод был изготовлен из проволоки малого диаметра (0,3 мм) и находился с одной стороны лазерной трубки, то он практически не влиял на распределение мощности излучения в выходном пучке. Отметим, что излучение в выходном пучке обычно имело форму кольца.

На рис. 4 приведена зависимость средней мощности излучения в экспериментах с Y-образным электродом от его длины d относительно уровня заземленного корпуса, который охватывал керамическую трубку.

Видно, что на этой зависимости есть два оптимума примерно с одинаковой средней мощностью излучения. На рис. 5 показаны зависимости средней мощности излучения лазера от давления азота.

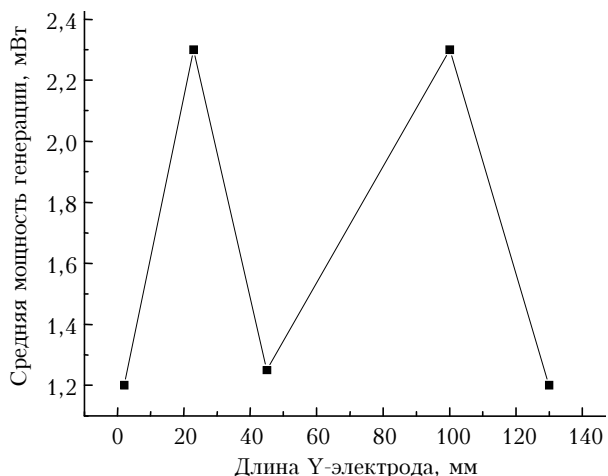


Рис. 4. Зависимость средней мощности излучения азотного лазера с накачкой продольным разрядом от длины Y-образного катода. Импульсно-периодический режим с частотой повторения импульсов 10 Гц

Применение Y-образного электрода позволило существенно расширить область рабочих давлений данного лазера (до 50 торр). Причем при увеличении d наблюдается увеличение оптимального давления (рис. 5).

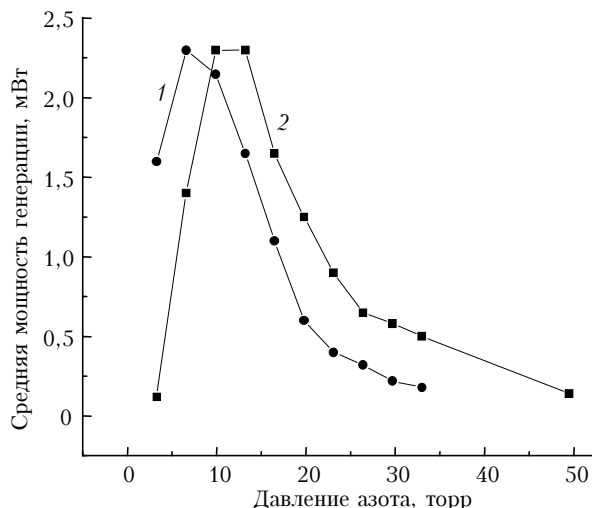


Рис. 5. Зависимости средней мощности излучения азотного лазера с накачкой продольным разрядом от давления активной среды для двух Y-образных катодов различной длины: 1 – $d = 23$ мм; 2 – 100 мм. Импульсно-периодический режим с частотой повторения импульсов 10 Гц

Влияние давления и местоположения Y-образного электрода на форму импульса генерации иллюстрирует рис. 6.

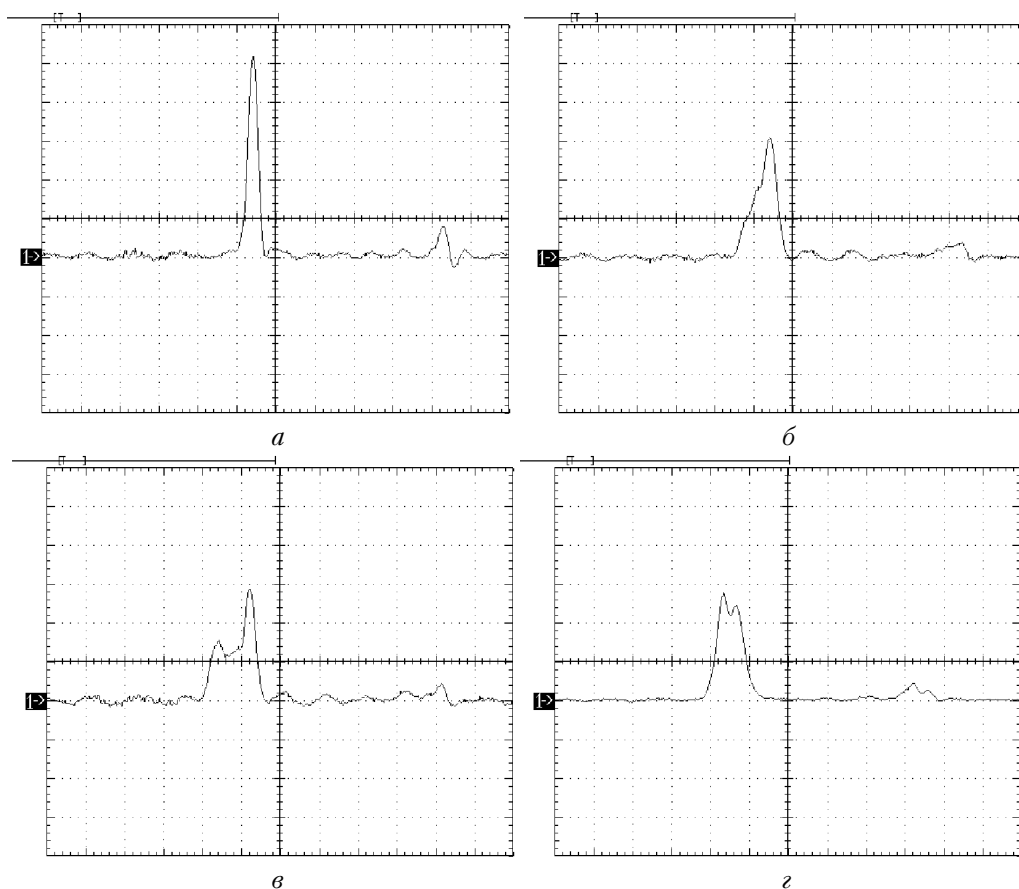


Рис. 6. Осциллограммы импульсов генерации азотного лазера. Длина Y-образного катода 100 мм. Давление в лазерной кювете: 6,6 торр (а); 11,6 (б); 18 (в); 49,5 (г). Вертикальная развертка: 32 В/дел (а, б); 16 (в); 64 (г); а–в – для ослабления сигнала использовалась рассеивающая линза; г – линза не применялась из-за низкой чувствительности регистратора. Горизонтальная развертка 10 нс/дел

При оптимальном и более низких давлениях регистрируется форма импульса излучения из одного пика, что характерно для азотного лазера с малой длиной лазерной трубки. При повышенных давлениях обычно наблюдаются два пика, амплитуда и местоположение которых зависят от давления азота и длины Y-образного электрода.

3. Обсуждение результатов

Азотный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах и требует сравнительно высокой средней энергии электронов, необходимой для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня ($> 11,7$ эВ). Поэтому на разрядный промежуток подается импульсное напряжение, которое в несколько раз больше статического пробивного напряжения, при этом оптимальное значение параметра E_0/p должно составлять 150–200 В/(см·торр) [3]. Однако в длинных трубках при низких давлениях азота, соответствующих оптимальным значениям параметра E/p , время запаздывания разрядного промежутка увеличивается и пробой наблюдается на спаде импульса напряжения или на последующих импульсах напряжения с меньшей амплитудой. Это приводит к нестабильной работе лазера, а также к уменьшению энергии излучения в импульсе из-за более низкого напряжения на промежутке.

Применение Y-образного электрода позволяет увеличить электрическое поле внутри лазерной камеры. При малых d это происходит за счет усиления электрического поля на кончике электрода, которое, как мы предполагаем, приводит в данных условиях к появлению быстрых электронов [18–20] и предыонизации ими части разрядного промежутка. При больших d достигается еще большее усиление электрического поля между кончиком Y-образного электрода и внешним экраном, окружающим керамическую трубку. В результате вначале формируется барьерный разряд между Y-образным электродом и внутренней поверхностью трубки, который является объемным при повышенном давлении. Плазма барьерного разряда расширяется в сторону потенциального электрода, стимулируя пробой всего промежутка.

Наличие двух характерных пробоев (ограниченного барьером и заверщенного) приводит к появлению двух пиков на импульсе генерации (рис. 6, в, г). Причем как при высоком, так и при низком давлении может наблюдаться только один пик на импульсе генерации. При высоком давлении величина параметра E/p при развитии заверщенного пробоя мала и порог генерации не достигается, а при низком и оптимальном давлении основной энерговод в активную среду при оптимальной величине параметра E/p осуществляется во время заверщенного пробоя промежутка. Данные результаты подтверждают наличие быстрых электронов в объемных импульсных разрядах при неоднородном электрическом поле [18–20].

Заключение

В данной статье показано, что применение катода специальной конструкции, усиливающего электрическое поле внутри лазерной трубки, позволяет осуществить стабильную УФ-генерацию в азоте при большой длине разрядного промежутка (в наших экспериментах — 49 см). Полученные результаты подтверждают наличие быстрых электронов в объемных импульсных разрядах, формируемых при неоднородном электрическом поле. Использование Y-образного электрода, направленного острием к аноду и соединенного с катодом длиной 100 мм, привело к достижению порога генерации при давлении азота ~ 50 торр и $E_0/p \sim 50$ В/(см·торр). Оптимальные значения параметра E/p при этом достигались при пробое между острием Y-образного электрода и внутренней поверхностью керамической трубки (в барьерном разряде).

Работа поддержана МНТЦ, проект № 2596.

1. Godar B. A Simple High Power Large-Efficiency N₂ Ultraviolet Laser // IEEE J. Quantum Electron. 1974. V. 10. N 2. P. 147–153.
2. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. A High Power N₂-Laser of Long Pulse Duration // Appl. Phys. 1980. V. 23. P. 341–344.
3. Тарасенко В.Ф. Эффективность азотного УФ-лазера с накачкой самостоятельным разрядом // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 6. С. 489–494.
4. Алексеев С.Б., Бакут Е.Х., Костыря И.Д., Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. УФ-лазеры на смесях N₂–SF₆ и N₂–NF₃ с накачкой поперечным и продольным разрядом // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 11. С. 1033–1039.
5. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. Discharge Lasers Pumped by Generators with Inductive Energy Storage // IEEE J. Quantum Electron. 1999. V. 35. N 3. P. 261–266.
6. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. N₂-лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 5. С. 441–442.
7. Бакут Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Эффективный длинноимпульсный XeCl-лазер с предимпульсом, формируемым индуктивным накопителем энергии // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 6. С. 506–508.
8. Костыря И.Д., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф., Шиянов Д.В. Лазер на парах меди с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 10. С. 864–866.
9. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Matsunaga T., Goto T. Long-Pulse-Discharge XeF and KrF Lasers Pumped by Generator with Inductive Energy Storage // Jap. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. Part 1. N 6A. P. 3701–3703.
10. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. Спектральные характеристики нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 4. С. 320–324.
11. Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // Приборы и техн. эксперим. 1999. № 4. С. 5–36.

12. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. О возможности применения генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока для накачки лазеров на парах металлов // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 722–724.
13. Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Ксеноновая эксилампа, возбуждаемая от трансформатора и индуктивного накопителя энергии // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 286–287.
14. Ericsson G., Lidholt R. Generation of short light pulses by superradiance in gases // Arkiv for fysik. 1968. V. 37. N 35. P. 557–568.
15. Theiss F.J. Dependence of peak power and pulse width from N₂ superradiant pulses on operating conditions in coaxial laser device // Opt. Commun. 1973. V. 9. N 1. P. 25–27.
16. Бакирт Е.Х., Визирь В.А., Куниц С.Э., Орловский В.М., Панченко А.Н., Рукин С.Н., Тарасенко В.Ф. Накачка импульсных лазеров с продольным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 3. С. 243–249.
17. Kostyrya I.D., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Goto T. Pulsed repetitive CO₂-laser pumped by longitudinal discharge // Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 29–34.
18. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Объемный импульсный разряд в неоднородном электрическом поле при высоком давлении и коротком фронте импульса напряжения // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007–1010.
19. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Роль быстрых электронов в формировании объемного импульсного разряда при повышенных давлениях // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 10. С. 31–38.
20. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. High-power subnanosecond beams of runaway electrons generated in dense gases // Phys. scripta. 2005. V. 72. N 1. P. 41–67.

I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko. Discharge stabilization in UV nitrogen laser pumped by a longitudinal discharge.

Characteristics of generation and discharge in the nitrogen laser pumped by a longitudinal discharge from a generator with an inductive energy accumulator and SOS-diode are investigated. It is shown that application of cathode of a special design, augmenting the electric field inside laser tube, allows a stable generation at a laser tube length of about 49 cm. The generation amplitude-time characteristics at different nitrogen pressures and cathode designs are presented.