

А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко, А.Е. Тельминов

Азотный УФ-лазер с накачкой поперечным разрядом, формирующий двойные импульсы генерации

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 5.12.2005 г.

Исследованы характеристики генерации и разряда в азотном лазере с накачкой поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и SOS-диодами. Показано, что в смеси N_2-NF_3 удается формировать импульсы генерации на длине волны 337,1 нм, состоящие из двух отстоящих друг от друга на 12 нс импульсов, при задержке между максимумами импульсов 25 нс. Получена энергия излучения в импульсе 23 мДж.

Введение

Азотные УФ-лазеры (вторая положительная система, электронные полосы $C^3P_u-B^3P_g$, наиболее сильные переходы $0-0$, $\lambda = 337,1$ нм и $0-1$, $\lambda = 357,7$ нм) с поперечным разрядом позволяют получать энергии излучения в единицы–десятки миллиджоулей. Наибольшие энергии излучения при возбуждении самостоятельным разрядом достигаются при добавках в рабочую смесь электроотрицательных газов (SF_6 , NF_3 , F_2), а также при накачке от генераторов с индуктивными накопителями энергии (см. [1–4] и ссылки в этих работах). В работе [4] было показано, что при большой концентрации SF_6 в рабочей смеси можно получать сдвоенные импульсы генерации на $\lambda = 357,7$ нм. Задержка второго максимума на импульсе генерации относительно первого равнялась 23 нс, одновременно в первом пике наблюдалась генерация на $\lambda = 337,1$ нм с большей энергией. Общая длительность импульса излучения по основанию ~ 40 нс, суммарная энергия излучения на двух линиях $\lambda = 337,1$ нм (однопиковая генерация) и $\lambda = 357,7$ нм (двухпиковая генерация) составила 6 мДж. Энергия излучения в импульсе при этом была в три раза меньше по сравнению с энергией излучения в оптимальной смеси. Появление второго пика в [4] было объяснено увеличением параметра E/p (E – напряженность электрического поля на промежутке, p – давление азота) во время накачки за счет прилипания к электроотрицательному газу SF_6 . Однако исследования данного режима проведены не были. Отметим, что в азотных УФ-лазерах обычно наблюдается один пик генерации.

Цель данной работы – исследовать условия работы азотного электроразрядного лазера, возбуждаемого поперечным разрядом, при которых формируются импульсы генерации, состоящие из двух отдельных пиков, и получить максимальную для этого режима энергию излучения в импульсе.

1. Экспериментальная установка и методики

В экспериментах использовался лазер с возбуждением поперечным разрядом и системой предъюстизации от искровых промежутков, подобный лазер использовался в [4]. Установка позволяла формировать объемный разряд при повышенных давлениях и оптимальных значениях параметра E_0/p (E_0 – максимальная напряженность электрического поля на промежутке перед его пробоем). Для накачки применялся универсальный генератор, позволяющий осуществлять возбуждение как от индуктивного, так и от емкостного накопителей энергии (рис. 1).

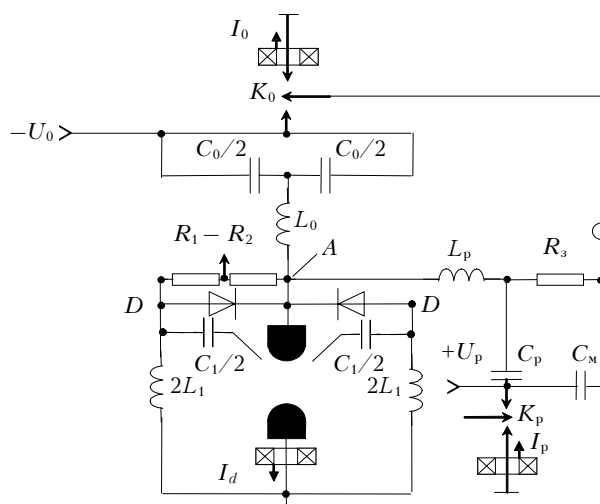


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема N_2 -лазера с накачкой от индуктивного накопителя энергии: K_0 , K_p – искровые разрядники; C_0 – первичный емкостный накопитель; C_1 – обострительные конденсаторы; C_p – емкость накачки SOS-диодов D в прямом направлении; C_m – пусковой конденсатор; L_0 , L_1 , L_p – индуктивности; U_0 , U_p – зарядные напряжения; R_1-R_2 – делитель напряжения; I_0 , I_d , I_p – пояса Роговского

Предыонизация разрядного промежутка осуществлялась от 72 искровых промежутков, равномерно расположенных с обеих сторон от анода. Величины емкостей и индуктивностей были следующие: $C_0 = 70$ нФ, $C_1 = 2,45$ нФ, $C_m = 1,5$ нФ, $C_p = 36$ или 10 нФ, $L_0 = 24,5$ нГ, $L_1 = 11$ нГ и $L_p = 0,87$ или 3,13 мГ. При накачке от индуктивного накопителя длительность тока разряда составила примерно 200 нс, а при накачке от емкостного накопителя C_0 (в этом случае отключались C_p и L_p в точке А, рис. 1) длительность импульса тока разряда возрастала до ~ 250 нс. Лазер имел активный объем $4 \times 0,6 - 1,5 \times 72$ см³.

В лазере использовались профилированные электроды, которые существенно уменьшали неоднородности электрического поля (локальное усиление поля на электродах и в разрядном промежутке). Электроды изготавливались из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор d равнялся 4 см. Активный объем в различных экспериментальных условиях менялся из-за изменения ширины разрядной области, которая зависела от зарядного напряжения, состава и давления смеси. Характеристики разряда и генерации изучались в чистом азоте и смесях азота с NF_3 при давлениях 10–150 торр.

Энергия излучения измерялась калориметром ОРНИР с сенсорными головками FL-250А, РЕ-50ВВ. Для регистрации временного профиля импульса излучения использовался вакуумный фотодиод ФЭК-22 СПУ, на который при помощи светоделительной пластинки направлялась часть лазерного излучения. Спектр излучения азотного лазера регистрировался при помощи спектрометра StellarNet EPP2000-C25 с разрешением 2 нм. Для ослабления лазерного и спонтанного излучения использовалась специальная оптическая схема. Излучение азотного лазера отражалось двумя алюминиевыми зеркалами для увеличения расстояния от разрядной области и после дополнительного ослабления направлялось в спектрометр. Ослабление осуществлялось с помощью последовательности металлических сеток и зеркал с диэлектрическим покрытием. Такая оптическая схема позволяла при снятии спектра регистрировать только лазерное излучение.

Напряжение на электродах лазера и ток разряда определялись с помощью делителя напряжения и пояса Роговского. Электрические сигналы подавались на осциллографы TDS-220 или TDS-224. Чтобы отсесть шумовую компоненту в сигнале, осциллографы размещались в экранированной комнате. Питание осциллографов осуществлялось через разделительный трансформатор.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вначале была проведена оптимизация энергии излучения в импульсе по составу и давлению смеси. Максимальные энергии были получены при давлении азота ~ 75 торр и $NF_3 \sim 3$ торр. В дальнейших экспериментах обычно использовалась рабочая смесь $N_2/NF_3 = 75/3$ торр. Основные результаты приведены на рис. 2–4.

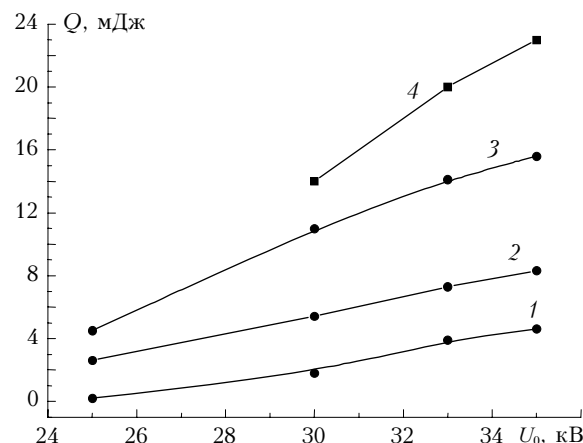


Рис. 2. Зависимость выходной энергии азотного лазера от зарядного напряжения: 1 – накачка от генератора с емкостным накопителем чистого азота; 2 – накачка от генератора с индуктивным накопителем чистого азота при $C_p = 36$ нФ, $U_p = 20$ кВ; 3 – накачка от генератора с индуктивным накопителем при $C_p = 36$ нФ, $U_p = 20$ кВ, смесь $N_2 + NF_3$; 4 – накачка от генератора с индуктивным накопителем при $C_p = 10$ нФ, $U_p = 20$ кВ, смесь $N_2 + NF_3$

При работе на выбранной смеси увеличение напряжения приводило к росту энергии излучения в импульсе как для емкостного накопителя энергии (кривая 1), так и для генератора с индуктивным накопителем энергии (кривые 2–4). Переход от емкостного накопителя к индуктивному накопителю позволял значительно увеличить энергию излучения в импульсе (кривые 1, 2). Применение смеси с электроотрицательным газом по сравнению с чистым азотом давало дополнительно двукратное увеличение энергии излучения (кривые 2, 3). Максимальная энергия излучения в импульсе 23 мДж была получена при использовании индуктивного накопителя энергии, смеси с NF_3 и при уменьшении энергии в конденсаторе C_p (кривая 4).

На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока разряда и импульсов генерации для оптимальных условий возбуждения. Видно, что при обоих генераторах регистрируются импульсы генерации, состоящие из двух пичков. Задержка между максимумами импульсов генерации составила ~ 25 нс. В данных экспериментах, в отличие от [4], наблюдалась пауза между отдельными импульсами (пичками). Длительность паузы составила около 12 нс. Кроме того, в данной работе, благодаря оптимизации лазера, удалось получить двухпичковую генерацию при максимальных энергиях излучения, реализованных при наибольших зарядных напряжениях в оптимальной рабочей смеси. С уменьшением зарядного напряжения отношение амплитуд первого пика генерации ко второму увеличивалось, а при малых зарядных напряжениях второй пик исчезал.

Анализ осциллограмм тока и напряжения на рис. 3, а также наблюдения за характером разряда показывают, что применение генератора с индуктивным накопителем энергии позволило улучшить однородность разряда и работать со смесями, содержащими большее парциальное давление $NF_3 \sim 7,5$ торр.

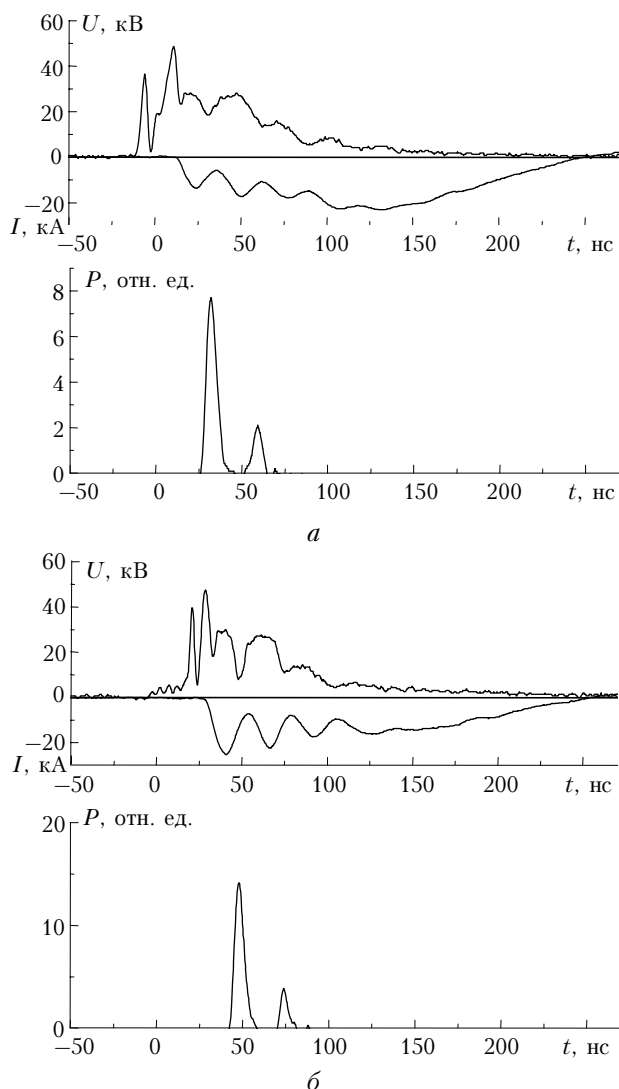


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и лазерного излучения: смесь $N_2/NF_3 = 75/3$ торр; $C_p = 10$ нФ; $C_0 = 70$ нФ; $C_1 = 2,45$ нФ; $U_p = 27$ кВ; $U_0 = 35$ кВ; а – лазер с емкостным накопителем энергии; б – лазер с индуктивным накопителем энергии

В этом режиме генерация состояла из одного пика, а энергия излучения уменьшилась всего до 15,5 мДж. Однако при большой концентрации NF_3 ток разряда обрывался через 40 нс и часть энергии оставалась в конденсаторе C_0 , что уменьшало вложенную в газ энергию. Расчет кпд лазера от вложенной в разряд энергии в этом режиме дал величину 0,17%. Это достаточно высокий кпд для азотного лазера, который обычно не превышает 0,1%. Эксперименты при больших концентрациях NF_3 в смеси не проводились из-за сильного уменьшения энергии излучения в импульсе, отсутствия пробоя промежутка или/и контрагирования разряда.

На рис. 4 приведены спектрограммы импульса генерации. В данных условиях, в отличие от [4], основной является линия с длиной волны 337,1 нм. Видно, что ей принадлежит более 95% энергии. Также наблюдалась слабая генерация на $\lambda = 357,7$ и 316 нм (переход 1–0).

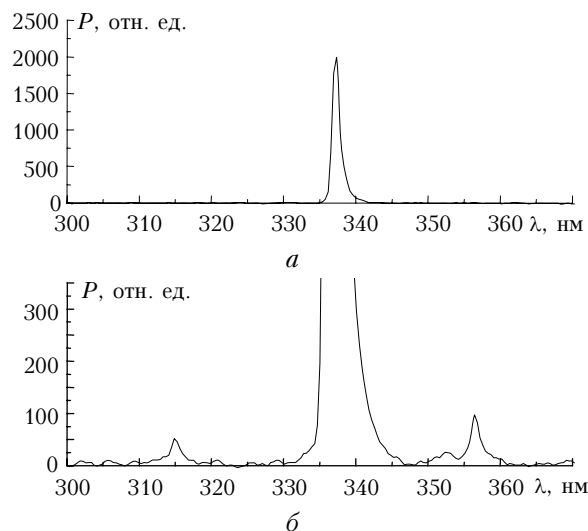


Рис. 4. Спектр излучения азотного лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии: смесь $N_2/NF_3 = 75/3$ торр, $U_0 = 35$ кВ, $C_p = 10$ нФ, $U_p = 25$ кВ; а – с ослаблением 250 раз; б – с ослаблением 50 раз

Благодаря оптимальному давлению рабочей смеси и применению профилированных электродов (расширяющих область разряда при увеличении зарядного напряжения), удалось сохранить оптимальную мощность возбуждения и реализовать генерацию преимущественно на $\lambda = 337,1$ нм. Как было показано в [4], генерация на $\lambda = 357,7$ нм появляется при более высоких мощностях накачки и при увеличении концентрации электроотрицательного газа SF_6 в смеси.

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 промежутке подается импульсное напряжение в несколько раз больше статического пробивного напряжения. Оптимальное значение параметра E_0/p при этом должно составлять 150–200 В/(см·торр) [3]. Однако за счет лавинного размножения электронов при высоких напряжениях величина параметра E/p после пробоя промежутка быстро уменьшается и генерация прекращается. Добавки электроотрицательных газов приводят к уменьшению скорости спада напряжения на промежутке и позволяют увеличить длительность импульса генерации [1–4].

В данном лазере за счет применения NF_3 , в котором большой коэффициент прилипания при высоких значениях параметра E/p [5], и модуляции полного тока разряда током обострительного конденсатора C_1 на импульсе напряжения формировались два пика с $E/p > 90$ В/(см·торр) (см. рис. 3). Причем при увеличении E/p в данной схеме генератора наблюдалось и увеличение тока разряда. Данной величины E/p хватало для нагрева электронов до энергии, необходимой для преимущественного возбуждения верхнего лазерного уровня, а мощность накачки за счет увеличения тока разряда была достаточна для повторного достижения порога генерации.

Заключение

Таким образом, в данной работе реализован режим двухпиковой генерации на длине волны 337,1 нм при накачке от генератора как с индуктивным, так и с емкостным накопителями энергии. Показано, что второй импульс генерации формируется благодаря повторному увеличению параметра E/p во время импульса накачки и модуляции полного тока разряда током обострительного конденсатора. Данный режим работы азотного лазера может найти практическое применение в работах, требующих воздействия на объект двумя импульсами УФ-излучения.

Работа поддержана Международным научно-техническим центром, проект № 2596.

1. *Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G.* A High Power N_2 -Laser of Long Pulse Duration // *Appl. Phys.* 1980. V. 23. P. 341–344.
2. *Armandillo E., Kearsley A.J.* High-power nitrogen laser // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 41. N 7. P. 611–613.
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., Бакиш Е.Х., Костыря И.Д., Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* УФ-лазеры на смесях N_2-SF_6 и N_2-NF_3 с накачкой поперечным и продольным разрядом // *Квант. электрон.* 2004. Т. 34. № 11. С. 1033–1039.
5. *Калужная А.Г., Рябцев А.В., Щедрин А.И.* Особенности функции распределения электронов в тлеющем разряде с полым катодом в смесях азота с электроотрицательными газами // *Ж. техн. физ.* 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 42–45.

A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, A.E. Tel'minov. **UV nitrogen lasers pumped by transverse discharges forming double pulses of laser generation.**

Laser parameters of nitrogen laser pumped by transverse discharges from inductive pumping generator were studied. It was shown that in the mixture N_2-NF_3 it is possible to obtain two laser pulses at $\lambda = 337,1$ nm spaced by 12 ns with a lag between pulse maxima of 25 ns. Laser output of 23 mJ was obtained.