

Широкоапертурный электроразрядный азотный лазер

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

Исследованы характеристики широкоапертурного азотного лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока на основе SOS-диодов, а также от генератора с емкостным накопителем энергии. Предыонизация газа осуществлялась мягким рентгеновским излучением. Размеры активного объема лазера составляли $10 \times 6 \times 100$ см. Получены максимальные для электроразрядных азотных лазеров энергия и мощность излучения на переходе $C^3P_u - V^3P_g$ ($\lambda = 337.1$ нм). В смеси $N_2 - SF_6$ энергия излучения на второй положительной системе азота достигала 110 мДж при пиковой мощности излучения 6 МВт. В смесях азота с NF_3 за счет повышения напряжения на лазерном промежутке в квазистационарной стадии разряда получена генерация с длительностью импульса до 100 нс при энергии излучения в импульсе ~ 35 мДж.

Ключевые слова: азотный УФ лазер, смеси $N_2 - SF_6$ и $N_2 - NF_3$, индуктивные и емкостные накопители энергии, максимальные энергия и мощность излучения.

1. Введение

Электроразрядный лазер на переходах молекулы азота (полоса $C^3P_u - V^3P_g$, длины волн наиболее сильных линий $\lambda = 337.1$ и 357.7 нм), созданный в 1963 г., был первым источником мощного когерентного УФ излучения [1] и до появления эксимерных лазеров интенсивно исследовался как теоретически [2, 3], так и экспериментально [3–7]. Тем не менее и в настоящее время азотный лазер благодаря дешевой и нетоксичной рабочей среде, простоте конструкции и надежности в работе продолжает привлекать внимание исследователей [8–11], а его длина волны наиболее хорошо подходит для ряда медицинских и биологических приложений [12, 13]. Поэтому увеличение энергии и мощности излучения на $\lambda = 337.1$ нм имеет научный и практический интерес.

Следует отметить, что создание азотного лазера с высокой энергией излучения достаточно сложно с технической точки зрения. Лазер на молекулах N_2 относится к лазерам на самоограниченных переходах, и для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня требуется сравнительно высокая средняя энергия электронов (более 11.7 эВ). Поэтому оптимальное значение приведенной напряженности электрического поля E/p в момент пробоя лазерного промежутка должно составлять $150 - 200$ В·см⁻¹·Тор⁻¹ [11]. Однако за счет большой скорости размножения электронов при высоких напряжениях параметр E/p после пробоя промежутка быстро уменьшается. По этой причине инверсия на переходе $C^3P_u - V^3P_g$ существует только короткое время (~ 10 нс), и за это время нужно ввести в активную среду лазера значитель-

ную удельную энергию (~ 100 Дж/л). Поэтому для получения генерации на переходе $C^3P_u - V^3P_g$ используются, как правило, высоковольтные генераторы с емкостными накопителями энергии на основе полосковых линий или LC-контуров с низким волновым сопротивлением, которые формируют короткие импульсы тока разряда. Поперечное сечение разрядного промежутка азотного лазера для уменьшения его индуктивности обычно составляет несколько квадратных сантиметров, хотя межэлектродный зазор может достигать 10 см [4]. Удельная энергия генерации азотного лазера обычно не превышает 0.1 Дж/л [3, 11].

Простое увеличение активного объема азотного лазера и накопительной емкости увеличивает индуктивность разрядного контура и длительность накачки и обычно не приводит к росту энергии генерации на $\lambda = 337.1$ нм. Частично скомпенсировать увеличение индуктивности разрядного промежутка позволяют добавки в активную среду азотного лазера таких электроотрицательных газов, как SF_6 и NF_3 , которые замедляют скорость спада напряжения на лазерном промежутке. Это позволяет увеличить время эффективной накачки и длительность существования инверсии на переходе $C^3P_u - V^3P_g$, что ведет к увеличению энергии излучения и КПД азотного лазера [5, 7, 10, 14–16].

Вследствие отмеченных особенностей генерации стимулированного излучения на молекулах азота за почти полвека исследований опубликовано всего пять работ, в которых сообщалось о получении энергии излучения N_2 -лазера свыше 20 мДж при накачке от генераторов с емкостными накопителями [5, 14–17]. Некоторые параметры таких лазеров приведены в табл.1. При этом максимальная энергия излучения на $\lambda = 337.1$ нм составляла 40 мДж [15], а максимальная пиковая мощность (~ 5 МВт) была получена в импульсе длительностью 4 нс [16].

Ранее нами было показано, что накачка газовых лазеров от генератора с индуктивным накопителем энергии (ИНЭ) позволяет улучшить их излучательные харак-

И.Н.Коновалов, А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко, Е.А.Тельминов. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3;
e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Табл.1. Параметры азотных лазеров с накачкой от емкостных и индуктивных накопителей энергии.

Накопитель энергии	V (см ³)	Состав смеси	Q (мДж)	$t_{1/2}$ (нс)	P_{\max} (МВт)	Литература
Емкостной	$1.2 \times 0.5 \times 120$	$N_2:SF_6 = 100:10$ Тор	20	8.5	2.5	[5]
	$3.8 \times 1 \times 100$	$N_2:SF_6 = 28:3$ Тор	30	19	1.5	[14]
		$N_2, 31$ Тор	18	14	1.3	
	$4 \times 4 \times 25$	$N_2:SF_6 = 75:30$ Тор	40	16	2.1	[15]
	$2.5 \times 3.5 \times 50$	$He:N_2 = 740:60$ Тор	20	4	5	[16]
$He:N_2:NF_3 = 740:60:2$ Тор		25	8	3.1		
ИНЭ с SOS-диодами	$4 \times 1 \times 65$	$N_2, 60$ Тор	20.5	13	1.5	[17]
	$4 \times 2 \times 70$	$N_2:SF_6 = 75:9$ Тор	25	7.5	3.25	[10]
	$4 \times 2 \times 70$	$N_2:NF_3 = 75:3$ Тор	25	7.5	3.25	
	$4 \times 2 \times 70$	$N_2:NF_3 = 30:125$ Тор	10	40	0.25	

Примечания: V – активный объем лазера (высота \times ширина \times длина); $t_{1/2}$ – длительность импульса излучения на полувысоте; Q и P_{\max} – энергия и максимальная мощность лазерного излучения.

теристики [18]. Использование генератора с ИНЭ дает возможность существенно уменьшить длительность импульса возбуждения и поднять мощность накачки. Получено увеличение энергии и мощности излучения азотного лазера, которое было особенно заметно при увеличении размеров разрядного промежутка. При различных режимах накачки от ИНЭ и апертуре разряда 2×4 см энергия и мощность излучения на $\lambda = 337.1$ нм возрастали в 3–5 раз по сравнению с таковыми при накачке от емкостного накопителя энергии. Энергия и мощность УФ излучения достигали 25 мДж и 3.2 МВт соответственно при длительности импульса генерации до 40 нс [10]. Полученные энергия и мощность излучения N_2 -лазера близки к максимальным параметрам генерации при накачке от емкостных накопителей (см. табл.1).

Целью настоящей работы являлось исследование широкоапертурного азотного лазера с накачкой от генератора как с ИНЭ и полупроводниковым прерывателем тока на основе SOS-диодов, так и с емкостным накопителем энергии.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

В экспериментах использовался лазер с возбуждением поперечным разрядом, близкий по конструкции к широкоапертурному $HeCl$ -лазеру [19]. Предыонизация газа в активном объеме проводилась мягким рентгеновским излучением. Установка позволяла формировать объемный разряд в азоте при повышенных давлениях и оптимальных значениях параметра E_0/p (E_0 – максимальная напряженность электрического поля на разрядном промежутке перед его пробоем).

В цилиндрической лазерной камере длиной 150 см возбуждаемый объем имеет длину 100 см, апертуру 10×6 см и ограничен двумя профилированными электродами. Анод через изолятор соединялся с генератором накачки. Тонкостенный катод был закреплен на выходном окне вакуумного диода – источника мягкого рентгеновского излучения [20]. Конструкция изолятора и обратного токопровода обеспечивала индуктивность разрядного промежутка $L_1 = 20$ нГн. Рентгеновское излучение вводилось в газ через титановую фольгу толщиной 80 мкм. Длительность импульса рентгеновского излучения с максимумом распределения квантов по энергиям в области 25 – 30 кэВ составляла 500 нс. Экспозиционная доза рентгеновского излучения в активном объеме достигала 0.15 Р. При заполнении лазерной камеры чистым азотом

до давления 55–75 Тор, начальная концентрация электронов под действием рентгеновского излучения составила 10^7 см⁻³. В смеси азота с NF_3 и SF_6 линейный коэффициент поглощения рентгеновского излучения возрастал в 4–8 раз, однако из-за прилипания электронов к галогенсодержащим молекулам начальная концентрация электронов не превышала 10^6 см⁻³.

Для накачки применялся универсальный генератор, позволяющий осуществлять возбуждение как от индуктивного, так и от емкостного накопителя энергии. Схема лазера с генератором накачки приведена на рис.1. Генератор накачки включает в себя основной и вспомогательный контуры. Основной контур состоит из накопительного конденсатора $C_0 = 45$ нФ, индуктивности $L_0 = 100$ нГн, обострительного конденсатора $C_1 = 4.27$ нФ. Конденсатор C_0 импульсно заряжался от емкости $C_{pr} = 100$ нФ за время ~ 1 мкс и затем подключался к лазерному промежутку рельсовым разрядником РР.

Вспомогательный контур формировал импульс прямого тока через диоды и состоял из конденсатора $C_D = 8.3$ нФ, искрового разрядника и индуктивности $L_D = 2.4$ мкГн. В лазере использовались 12 или 14 диодов типа SOS-120-4, установленных параллельно обострительному конденсаторам C_1 . Генератор мог работать в режиме с ИНЭ и в режиме импульсной зарядки обострительного конденсатора C_1 . В первом случае часть энергии, запасенной в конденсаторе C_0 , передавалась в индуктивность основного контура L_0 . Во втором случае вспомогательный контур с конденсатором C_D не использовался. Длительность импульса тока объемного разряда составляла ~ 150 нс.

Характеристики объемного разряда и лазерной генерации изучались при заполнении лазерной камеры чистым азотом и смесями N_2 с NF_3 и SF_6 до давления 100 Тор. В оптическом резонаторе в качестве глухого зеркала использовалось плоское зеркало с алюминиевым покрытием, а на выходе резонатора устанавливалась плоскопараллельная кварцевая пластинка.

Энергия излучения лазера измерялась калориметром OPHIR с сенсорной головкой FL-250A. Лазерное излучение со всей апертуры разряда собиралось на измерительную головку телескопом, состоящим из двух кварцевых линз. Форма импульса излучения измерялась в дальней зоне с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 СПУ, на который направлялась часть лазерного излучения, отраженного от внешней линзы телескопа. Для работы фотодиода в линейном режиме излучение на его входе ослаблялось набором металлических сеток.

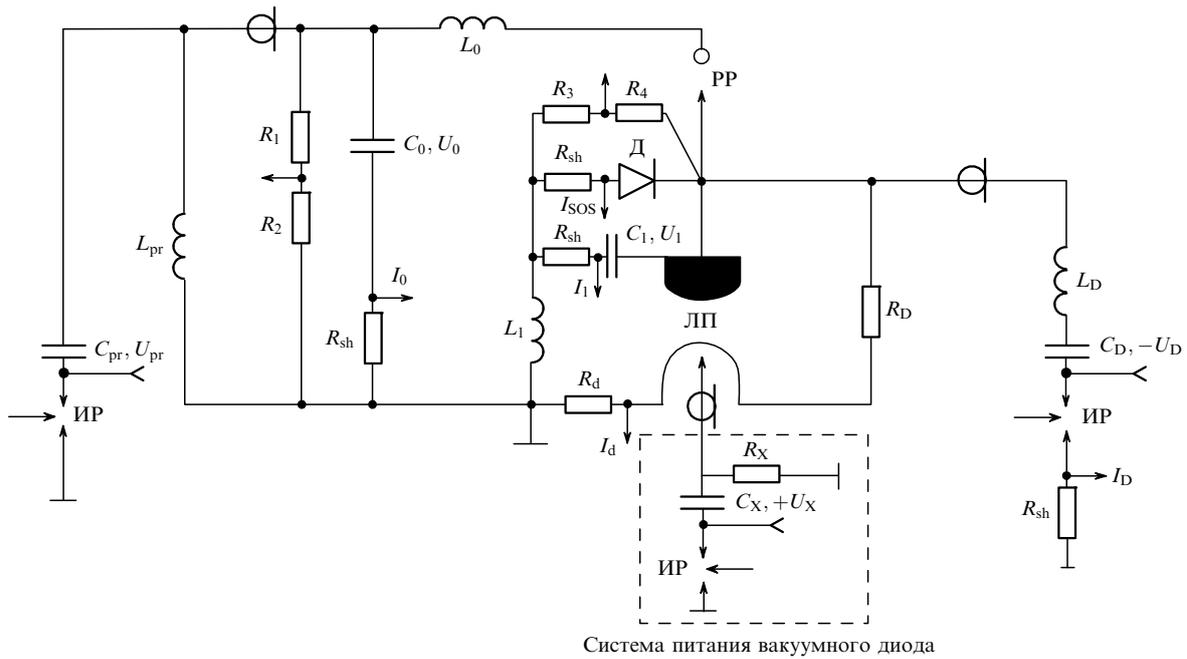


Рис.1. Схема широкоапертурного азотного лазера: ЛП – лазерный промежуток; Д – SOS-диоды; PP – рельсовый разрядник; ИП – искровые разрядники; $R_1 - R_2$ и $R_3 - R_4$ – делители напряжения; R_{sh} – токовые шунты.

В экспериментах с помощью шунтов R_{sh} измерялись токи I_0 и I_1 в цепях разряда накопительного и обострительного конденсаторов, токи I_{SOS} и I_d через SOS-диоды и лазерный промежуток, а с помощью резистивных делителей напряжения $R_1 - R_2$ и $R_3 - R_4$ – напряжения U_0 и U_1 на конденсаторах C_0 и C_1 и на SOS-диодах. Электрические сигналы записывались цифровыми осциллографами TDS-220 и TDS-3014.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Первые эксперименты были проведены при использовании в качестве активной среды чистого азота. При давлении азота 55–75 Тор получен однородный объемный разряд с апертурой до 10×7 см, но из-за недостаточной плотности тока разряда энергия излучения не превышала 1–2 мДж. Добавки в активную среду электроотрицательных газов приводили к уменьшению ширины разрядной области на 1–1.5 см и увеличению пробивного напряжения разрядного промежутка. Как следствие, увеличивалась мощность накачки лазера и заметно возрастала энергия излучения. Полученные результаты приведены на рис.2–4. На рис.2 показаны зависимости энергии излучения лазера при различных режимах накачки от зарядного напряжения на накопительном конденсаторе C_0 . При одинаковых зарядных напряжениях и накачке лазера от генератора с ИНЭ энергия излучения на $\lambda = 337.1$ нм заметно увеличивалась по сравнению с энергией при накачке лазера от LC-контура. Однако из-за большой индуктивности между SOS-диодами и разрядным промежутком длительность импульса напряжения на SOS-диодах превышала допустимую, что приводило к их выходу из строя после нескольких десятков импульсов. Поэтому при максимальных зарядных напряжениях эксперименты проводились только с использованием емкостного накопителя энергии.

В смесях $N_2 - NF_3$ была получена энергия излучения в импульсе 35 мДж. При работе лазера на смеси $N_2 - SF_6$

энергия излучения в импульсе достигала 80 мДж. Полная длительность лазерного импульса составляла 30 нс при длительности на полувысоте 14 нс. Это соответствует пиковой мощности излучения ~ 6 МВт. При этом КПД азотного лазера по энергии, запасенной в конденсаторе C_0 , достигал 0.065 %.

На рис.3 и 4 приведены характерные осциллограммы напряжения на обострительном конденсаторе, тока разряда и излучения на $\lambda = 337.1$ нм. Осциллограммы были получены при накачке азотного лазера от генераторов как с емкостным, так и с индуктивным накопителем энергии. Применение ИНЭ приводит к увеличению пробивного напряжения лазерного промежутка, тока разряда на стадии спада напряжения на промежутке после зажигания разряда и длительности импульса излучения. Эти факторы обуславливают рост энергии и мощности излучения азотного лазера при накачке от ИНЭ. Эффект от использования ИНЭ был наиболее заметен при низких зарядных напряжениях на накопительном конденсаторе

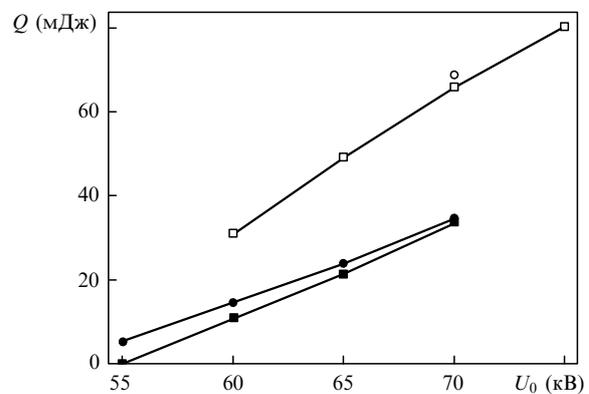


Рис.2. Зависимости энергии излучения Q азотного лазера на смесях $N_2 : NF_3 = 55 : 1.5$ Тор (■, ●) и $N_2 : SF_6 = 55 : 3$ Тор (□, ○) от напряжения U_0 на конденсаторе C_0 . Накачка от емкостного (■, □) и индуктивного (●, ○) накопителей энергии.

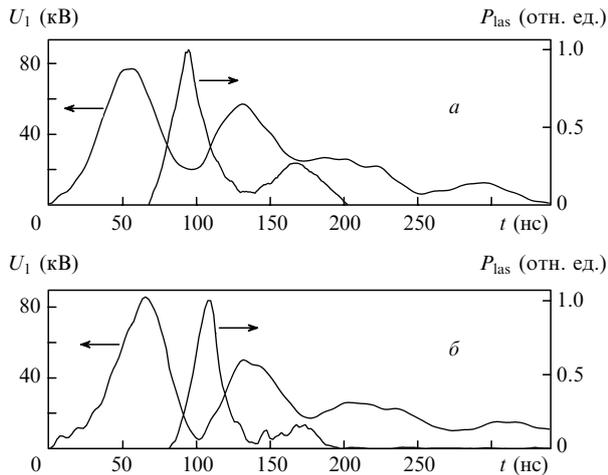


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения (U_1) на обострительном конденсаторе и лазерного излучения (P_{las}) на $\lambda = 337.1$ нм, полученные при использовании генераторов накачки с емкостным (а) и индуктивным (б) накопителями энергии. Смесь $N_2:NF_3 = 55:1.5$ Тор, $U_{pr} = 45$ кВ.

C_0 . Это связано с тем, что ток обрыва в SOS-диодах в наших экспериментах составил ~ 10 кА, тогда как при максимальном зарядном напряжении U_0 ток разряда достигал ~ 50 кА. Поэтому при росте U_0 все меньшая доля энергии передавалась в индуктивный накопитель, что снижало его влияние на выходные параметры азотного лазера.

Характерной особенностью работы лазера на смеси азота с NF_3 является заметное увеличение длительности импульса генерируемого излучения по сравнению с его длительностью в обычных режимах работы N_2 -лазера (см. рис.3 и табл.1). Ранее в смесях с NF_3 при апертуре разряда 2×4 см и накачке от ИНЭ мы наблюдали импульс излучения на $\lambda = 337.1$ нм, состоящий из двух пиков, длительностью около 50 нс [10]. При увеличении апертуры разряда также наблюдается импульс излучения, состоящий из двух пиков, но его длительность возрастает и составляет более 100 нс. Увеличение длительности импульса генерации связано с существенным ростом напряжения на лазерном промежутке в квазистационарной

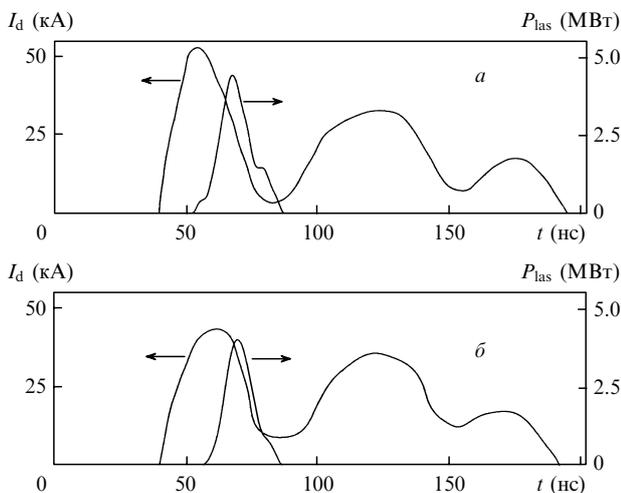


Рис.4. Осциллограммы импульсов тока объемного разряда (I_d) и лазерного излучения (P_{las}) на $\lambda = 337.1$ нм, полученные при накачке азотного лазера от генераторов с индуктивным (а) и емкостным (б) накопителями энергии. Смесь $N_2:SF_6 = 55:3$ Тор, $U_{pr} = 55$ кВ.

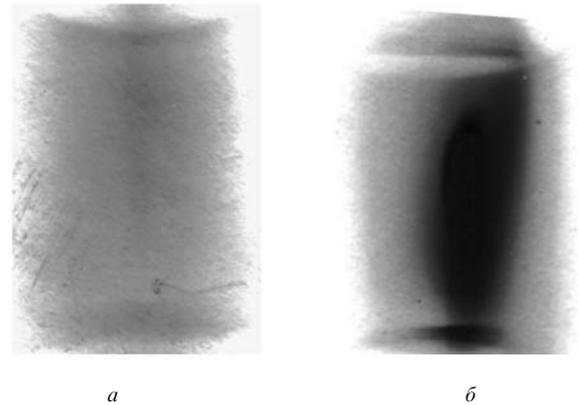


Рис.5. Автографы излучения N_2 -лазера на фотобумаге при ширине области подсветки 5.5 см и межэлектродном расстоянии 10 см (а) и соответственно 2 и 8 см (б). Накачка от LC-контура, $U_0 = 70$ кВ, смесь $N_2:SF_6 = 55:6$ Тор.

стадии горения объемного разряда из-за большой скорости прилипания электронов к молекулам NF_3 . Кроме того, в квазистационарной стадии имеются еще и колебания напряжения на промежутке в результате обмена энергией между емкостями C_1 и C_0 . При этом в смесях с NF_3 значение E/p во втором максимуме напряжения составляет ~ 100 В·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$, что достаточно для создания в активной среде азотного лазера большой инверсии населенностей уровней на переходе $C^3P_u - B^3P_g$. В этом случае длительность импульса генерации примерно равна периоду колебаний напряжения.

Обычно в мощных азотных лазерах плотность тока разряда составляет от нескольких сотен до ~ 1 кА/см 2 [5, 10, 14–17]. В нашем случае при ширине разрядной области 5.5–6 см плотность тока разряда была меньше 100 А/см 2 . Поэтому уменьшение поперечного сечения разрядной области должно было привести к росту энергии излучения на $\lambda = 337.1$ нм. Для повышения плотности тока разряда можно уменьшить ширину области подсветки газа рентгеновским излучением и (или) увеличить обострительную емкость. Были проведены эксперименты с окном для вывода рентгеновского излучения шириной 2 см и профилированным катодом с меньшим радиусом кривизны. При этом расстояние между электродами, образующими лазерный промежуток, уменьшилось до 8 см.

На рис.5 приведены отпечатки излучения широкоапертурного азотного лазера на фотобумаге, полученные при различной ширине области подсветки в смесях азота с SF_6 . При ширине окна для вывода рентгеновского излучения 5.5 см наблюдалась достаточно равномерная засветка фотобумаги по всей апертуре лазерного пучка. При ширине окна 2 см общая ширина области засветки не изменилась, но ее интенсивность в середине отпечатка, обусловленная лазерным излучением из центральной области разряда, где есть рентгеновское излучение, была более высокой. Уменьшение эффективной ширины разрядной области привело к заметному увеличению энергии излучения азотного лазера. При зарядном напряжении $U_0 = 75$ кВ энергия излучения достигала 95 мДж. Увеличение обострительной емкости C_1 до 8.6 нФ привело к возрастанию энергии генерации до 110 мДж. Полная длительность лазерного импульса составила 40 нс при длительности на полувысоте 18 нс и пиковой мощности излучения ~ 6 МВт. При этом КПД азотного ла-

зера по энергии, запасенной в конденсаторе C_0 , достигал 0.09 %.

4. Заключение

Исследованы характеристики широкоапертурного азотного лазера при различных режимах накачки. Показано, что использование генератора с ИНЭ и полупроводниковым прерывателем тока на основе SOS-диодов приводит к увеличению энергии и мощности излучения на $\lambda = 337.1$ нм за счет роста пробивного напряжения лазерного промежутка и тока разряда на стадии спада напряжения. Получены максимальные на сегодняшний день энергия и мощность излучения электроразрядного азотного лазера. В смеси азота с SF_6 в активном объеме с поперечным сечением до 6×10 см энергия лазерного излучения достигала 110 мДж при пиковой мощности излучения ~ 6 МВт и КПД по запасаемой энергии 0.09 %. В смесях азота с NF_3 за счет повышения напряжения в квазистационарной стадии разряда получена генерация с длительностью импульса ~ 100 нс при энергии излучения до ~ 35 мДж.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 2596).

1. Heard H.G. *Nature*, **200**, 667 (1963).
2. Ali A.W., Kolb A.C., Anderson A.D. *Appl. Opt.*, **6**, 2115 (1967).
3. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **2**, 2047 (1975).
4. Shipman J.D., Jr. *Appl. Phys. Lett.*, **10**, 3 (1967).
5. Levatter J.I., Lin S.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 703 (1974).
6. Woodward B.W., Ehlers V.J., Lineberger W.C. *Rev. Sci. Instr.*, **44**, 882 (1973).
7. Willet C.S., Litynski D.M. *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 118 (1975).
8. Fellows C.E., Rodegheri C.C., Tauber U., Tsui K.H., de Castro M.P.P., Carvalho C.E.M. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **78**, 421 (2004).
9. Rahimian K., Ghoreyshi S., Hariri A. *Laser Phys.*, **16**, 447 (2006).
10. Panchenko A.N., Tel'minov A.E., Tarasenko V.F. *Изв. Вузов. Сер. Физика*, **49**, Приложение, 476 (2006).
11. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 489 (2001).
12. Dube A., Jayasankar K., Prabakaran L., Kumar V., Gupta P.K. *Lasers Med. Sci.*, **19**, 52 (2004).
13. Dadgea W.J., Krishnamurthy V.N., Aiyera R.C. *Sensors Actuator B: Chem.*, **113**, 805 (2006).
14. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. *Appl. Phys. A: Mat. Sci. Process.*, **23**, 341 (1980).
15. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 161 (1990).
16. Armandillo E., Kearsley A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 611 (1982).
17. Sanz F.E., Perez J.M.G. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **52**, 42 (1991).
18. Panchenko A.N., Tarasenko F.V. *Laser Phys.*, **16**, 23 (2006).
19. Басов В.А., Коновалов И.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 787 (1996).
20. Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Коновалов И.Н., Сак К.Д., Червяков В.В. *ПТЭ*, № 4, 112 (1994).