

# Влияние добавок $SF_6$ и $NF_3$ на режимы УФ и ИК генерации в азоте

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

*Изучены режимы генерации азотного лазера на переходе  $C^3P_u - V^3P_g$  с большой энергией и длительностью импульса излучения при накачке поперечным разрядом смесей  $N_2 - SF_6$  ( $NF_3$ ) от генераторов с полупроводниковым прерывателем тока. Получены лазерные импульсы с двумя пиками и управляемой задержкой между ними. Показано, что в смесях  $N_2 - NF_3$  расстояние между пиками может превышать 50 нс. Определены условия достижения эффективной УФ генерации с длительностью лазерного импульса по основанию более 50 нс. Показана возможность разгрузки нижнего уровня перехода  $C^3P_u - V^3P_g$  вынужденными переходами первой положительной системы  $V^3P_g - A^3\Sigma_u^+$ , что позволило увеличить длительность излучения на  $\lambda = 337.1$  нм до 100 нс. Получены наибольшие для азотных лазеров с искровой предыонизацией энергия и мощность излучения в ИК и УФ областях спектра.*

**Ключевые слова:** УФ и ИК азотные лазеры, прерыватель тока, эффективная генерация, добавки  $NF_3$ ,  $SF_6$ .

## 1. Введение

Азотный лазер является лазером на самоограниченных переходах и позволяет получать на  $\lambda = 337.1$  нм импульсы излучения наносекундной длительности. Благодаря невысокой стоимости газа, простоте конструкции и надежности в работе азотные лазеры, несмотря на малую энергию излучения в импульсе, продолжают использоваться [1–4]. Кроме того, лазер на переходах молекулярного азота применяется для изучения новых методов получения инверсии и различных режимов накачки [5–10]. Результаты многочисленных исследований (см. [5–17] и ссылки в этих работах) дают основания считать, что азотный лазер генерирует короткие импульсы излучения, а для его накачки следует использовать генераторы на основе конденсаторов и полосковых линий с низким импедансом, формирующие короткие импульсы возбуждения. При этом наибольшая энергия излучения (40 мДж) на полосе  $C^3P_u - V^3P_g$  получена в [14] при накачке объемным поперечным разрядом с УФ предыонизацией, а наибольшая энергия излучения (5 мДж) на полосе  $V^3P_g - A^3\Sigma_u^+$  при пиковой мощности излучения 0.4 МВт – в [17].

Отметим, что для получения инверсии на УФ переходе пороговая напряженность электрического поля  $E_0/p = U_0/(pd)$  на лазерном промежутке, определяемая приложенным напряжением  $U_0$ , расстоянием между электродами  $d$  и давлением газа  $p$ , должна быть не менее  $100 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$  [11]. При накачке азотного лазера поперечным разрядом с использованием традиционных генераторов с емкостными накопителями энергии инверсия может поддерживаться только в течение очень короткого (не более 5 нс)

интервала времени на стадии спада напряжения на лазерном промежутке. Добавление к азоту электроотрицательных газов  $NF_3$ ,  $F_2$  и  $SF_6$  замедляет скорость спада напряжения на промежутке [11–17] и увеличивает параметр  $E/p$  в установившейся стадии разряда [6, 10, 18]. Однако в смесях азота с электроотрицательными газами при накачке емкостными генераторами сформировать объемный разряд достаточно сложно, и полная длительность УФ генерации не превышает  $\sim 30$  нс [13–16]. Исключением являются работы [19, 20], где сообщалось о получении на  $\lambda = 337.1$  нм импульса генерации длительностью более 100 нс. Однако отсутствие в этих работах осциллограмм импульсов напряжения на лазерном промежутке и данных по энергии генерации затрудняет анализ полученных результатов.

Нами было показано, что использование для накачки смесей азота с электроотрицательными газами генераторов с прерывателями тока (ГПТ) позволяет существенно увеличить длительность и энергию генерации азотного лазера [6, 10]. При накачке поперечным разрядом был реализован двухпиковый режим работы азотного лазера и получены импульсы УФ генерации с длительностью около 50 нс [6]. В настоящей статье приведены результаты исследований данных режимов работы азотного лазера на первой и второй положительных системах азота при накачке ГПТ, цель которых – достижение максимальных энергий генерации и поиск новых возможностей управления формой и длительностью импульса излучения.

## 2. Экспериментальные установки и методики измерений

В экспериментах использовались лазеры с возбуждением поперечным разрядом от ГПТ и длиной активной среды  $L = 72$  или 90 см, подобные описанным в [6, 8, 10]. Их эквивалентная электрическая схема приведена на рис. 1. Генератор накачки лазеров включал в себя основной и вспомогательный контуры. Основной контур был сформирован накопительным конденсатором  $C_0$  (70 или 160 нФ),

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

Поступила в редакцию 14 июля 2010 г., после доработки – 10 февраля 2011 г.

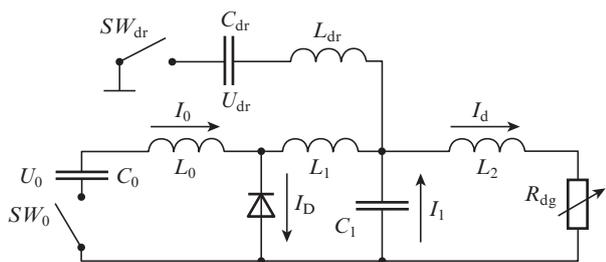


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема азотного лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии:

$SW_0, SW_{dr}$  – управляемые искровые разрядники;  $C_0$  – первичный емкостный накопитель;  $C_1$  – обостряющие конденсаторы;  $C_{dr}$  – емкость накачки SOS-диодов в прямом направлении (10 нФ);  $L_0, L_1, L_2, L_D$  – индуктивности контуров;  $R_{dg}$  – сопротивление разрядного промежутка;  $U_0, U_{dr}$  – зарядные напряжения;  $I_i$  – токи в контурах.

индуктивностью  $L_0$  и искровым разрядником  $SW_0$ . Вспомогательный контур предназначался для прямой накачки полупроводникового прерывателя тока (ППТ), в качестве которого использовались 10 SOS-диодов типа SOS-50-2, установленных параллельно обостряющим конденсаторам. Контур включал в себя конденсатор  $C_{dr} = 10$  нФ, искровой коммутатор  $SW_{dr}$  и индуктивность  $L_{dr} = 3.13$  мкГн. Для предыонизации разрядного промежутка использовалось излучение искровых промежутков, равномерно расположенных с обеих сторон от анода. Пробой искровых промежутков происходил при импульсной зарядке обостряющих конденсаторов  $C_1$  (2.45 или 3.1 нФ). Генератор мог работать в режиме с накоплением энергии в индуктивности контура  $L_0$  и как обычный двухконтурный LC-генератор. В последнем случае вспомогательный контур не использовался.

Характеристики газового разряда и лазерного излучения исследовались в чистом азоте и в смесях N<sub>2</sub> с NF<sub>3</sub> и SF<sub>6</sub> в диапазоне давлений 10–100 Тор. В качестве зеркал резонатора использовались глухие плоские зеркала с алюминиевым или диэлектрическим покрытием, плоскопараллельные пластинки из кварца или КРС-6.

Энергия излучения азотного лазера измерялась калориметром OPHIR с сенсорной головкой PE-50BV. Форма лазерного импульса измерялась с помощью вакуумных

фотодиодов ФЭК-22 СПУ (УФ область спектра) и ФЭК-29 СПУ (ИК область спектра), на которые при помощи светоделительных пластинок направлялась часть излучения. Измерения проводились на расстоянии 3–5 м от выходного зеркала лазера. Излучение в нужном спектральном диапазоне вырезалось светофильтрами. Спектр излучения лазера в диапазоне длин волн 200–850 нм регистрировался спектрометром StellarNet EPP2000-C25. Импульсы излучения на переходах первой положительной системы азота измерялись фотодиодом ФЭК-29 СПУ, установленным на выходной щели монохроматора МДР-13. Для работы фотодиодов и спектрометра в линейном режиме излучение на их входах ослаблялось последовательностью металлических сеток.

В экспериментах с помощью омических делителей напряжения, шунтов и поясов Роговского регистрировались также напряжения на лазерном промежутке  $U_d$ , на обостряющей емкости и SOS-диодах  $U_1$ , токи разряда  $I_d$  и токи через диоды  $I_D$  и в контурах накопительной ( $I_0$ ) и обостряющей ( $I_1$ ) емкостей. Электрические сигналы подавались на осциллографы TDS-3034.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

#### 3.1. Особенности накачки азотного лазера ГПТ

Особенности режимов накачки азотного лазера от ГПТ и LC-генератора иллюстрирует рис.2. Рассмотрим подробнее режим накачки от ГПТ, рис.2,а (стадия прямой накачки диодов не показана). После срабатывания разрядника  $SW_0$  через диоды в цепи  $C_0-L_0-D-SW_0$  начинает протекать обратный ток. Сопротивление диодов при этом начинает расти, и через ~25 нс ток в них резко падает. В течение этого времени часть запасенной в накопительном конденсаторе энергии  $E_L = L_0 I_{max}^2 / 2$  ( $I_{max}$  – максимальный обратный ток через диоды) передается в индуктивность контура  $L_0$  (индуктивный накопитель энергии, ИНЭ). Для условий, приведенных на рис.2,  $I_{max} = 18$  кА, и в ИНЭ передается 10% запасенной в  $C_0$  энергии. Ток через диоды полностью прекращался через 40 нс после подачи на ППТ обратного тока. Падение напряжения на индуктивности  $L_2$  приводит к изменению полярности на-

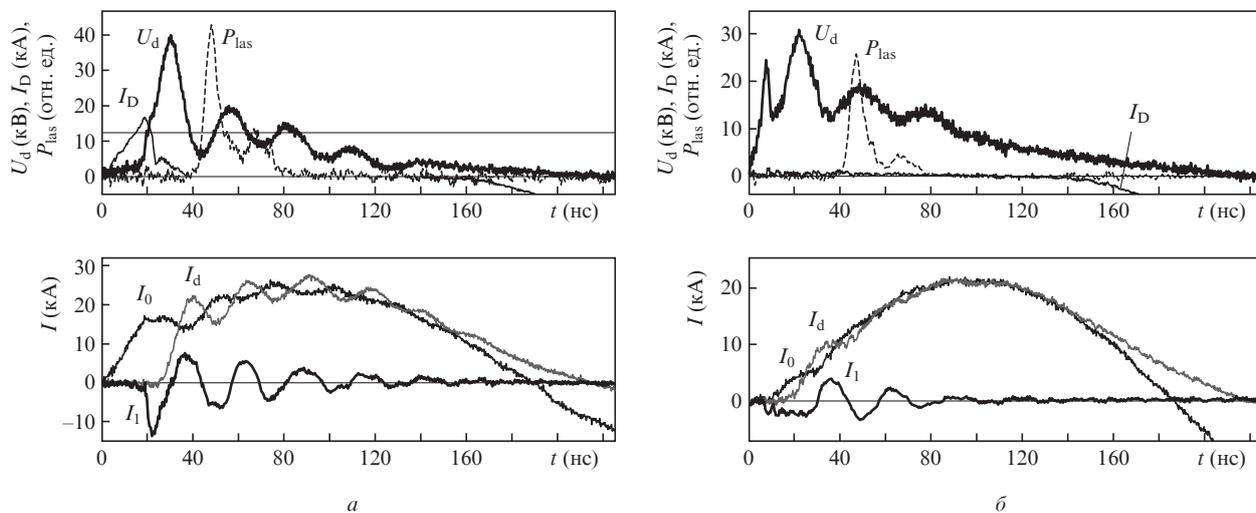


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке  $U_d$ , мощности генерации на  $\lambda = 337.1$  нм  $P_{las}$ , тока через SOS-диоды  $I_D$ , тока разряда  $I_d$  и токов в цепи накопительного ( $I_0$ ) и обостряющего ( $I_1$ ) конденсаторов при накачке от ГПТ (а) и LC-генератора (б) смеси N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 25 : 1 при давлении 30 Тор;  $L = 72$  см,  $U_0 = 33$  кВ. Горизонтальная линия соответствует  $E/p = 100$  В·см<sup>-1</sup>·Тор<sup>-1</sup>.

пряжения на диодах через  $\sim 150$  нс, вызывая повторное появление тока через ППТ. При этом индуктивность  $L_2$  начинает разряжаться через диоды на лазерный промежуток, что несколько увеличивает в нем длительность импульса тока по сравнению с полупериодом колебаний тока в контуре  $C_0$ .

После начала роста сопротивления диодов ток ИНЭ переключается на зарядку обостряющих конденсаторов. В результате ИНЭ в течение  $\sim 15$  нс заряжает  $C_1$  до напряжения  $U_0 > 40$  кВ, обеспечивая большое значение  $E_0/p$  на лазерном промежутке. После пробоя лазерного промежутка ток  $I_0$ , остающийся в индуктивности  $L_0$ , суммируется с током обостряющих конденсаторов  $I_1$ , обеспечивая быстрое нарастание тока разряда, и формирует мощный короткий пик накачки. Импульс генерации состоит из двух пиков с провалом между ними, что обусловлено повторным ростом напряжения на промежутке.

В случае накачки от  $LC$ -генератора (рис.2,б) обостряющие конденсаторы  $C_1$  заряжаются только от конденсатора  $C_0$ , что замедляет время нарастания напряжения на лазерном промежутке до  $\sim 40$  нс, а пробивное напряжение падает до 30 кВ. Заметно снижаются скорость роста тока разряда и амплитуда первого пика накачки. Это приводит к двукратному падению энергии, вложенной в активную среду на стадии спада напряжения на лазерном промежутке при  $E/p > 100$  В·см<sup>-1</sup>·Тор<sup>-1</sup>, по сравнению с накачкой от ГПТ. В результате использование ГПТ для накачки даже чистого азота увеличивает энергию генерации на полосе  $C^3P_u - V^3P_g$  примерно в два раза.

Более значительное изменение энергии генерации в зависимости от типа генератора наблюдается при накачке смесей азота с  $SF_6$  и  $NF_3$ . Использование  $LC$ -генератора для условий рис.2 приводило к падению энергии излучения на порядок. Это связано с контрагированием объемного разряда, что подтверждается регистрацией искровых каналов в промежутке уже во время лазерного импульса подобно [13–16] и тем, что для двух типов использованных генераторов при близкой мощности накачки мощности излучения во втором пике значительно различаются. Полученные результаты показывают, что увеличение амплитуды разрядного напряжения путем одновременного повышения скорости его нарастания и скорости нарастания разрядного тока при использовании ГПТ подобно [10, 21–23] значительно облегчает формирование объемного разряда и увеличивает длительность объемной стадии разряда в смесях азота с электроотрицательными газами.

### 3.2. Энергетические и спектральные характеристики генерации азотного лазера

На рис.3 приведены зависимости энергии излучения азотного лазера от зарядного напряжения накопителя  $C_0$  и концентрации  $SF_6$ . Максимальная энергия излучения достигалась в смеси азота (30 Тор) и  $SF_6$  (9 Тор). Оптимальное содержание  $SF_6$  для генерации на первой положительной системе азота составило 3 Тор. При установке резонатора из алюминиевого зеркала и кристалла КРС-6 получена энергия ИК излучения до 27 мДж при пиковой мощности 0.7 МВт. Наибольшая энергия УФ излучения при установке селективного резонатора, состоящего из диэлектрического зеркала с коэффициентом отражения на 337.1 нм свыше 99% и кварцевой пластинки, достигала 50 мДж при пиковой мощности излучения 1 МВт. Полученные параметры являются максимальными для азотного лазера с

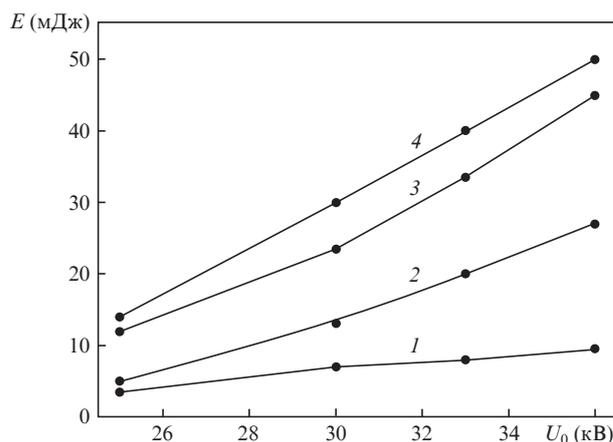


Рис.3. Зависимости энергии излучения азотного лазера на второй (1, 3, 4) и первой (2) положительных системах азота от зарядного напряжения на емкости  $C_0$  для азота при  $p = 60$  Тор (1) и смесей  $N_2:Sf_6 = 30:3$  (2),  $60:7.5$  (3) и  $30:9$  Тор (4);  $L = 90$  см, резонатор образован зеркалом с коэффициентом отражения более 99% на 337.1 нм и кварцевой пластинкой (1, 3, 4) и Al-зеркалом и кристаллом КРС-6 (2).

УФ предыонизацией и накачкой поперечным разрядом. При этом электрический КПД генерации превышал 0.05%. Отметим, что только 50% энергии, запасенной в емкости  $C_0$ , вкладывалось в активную среду до окончания УФ генерации, поэтому при сокращении импульса накачки КПД лазера может расти.

В спектре УФ генерации на оптимальной смеси основная энергия излучается на  $\lambda = 337.1$  нм (колебательный переход  $0-0$  полосы  $C^3P_u - V^3P_g$ ). Наблюдаются слабые полосы  $(1-0)$ ,  $(0-1)$ ,  $(0-2)$  и  $(1-2)$ , на долю которых приходится около 1% энергии излучения. Близкие спектры наблюдались в чистом азоте и в смесях с  $NF_3$ , что говорит о схожести процессов достижения инверсии на переходе  $C^3P_u - V^3P_g$  в данных условиях [10].

Излучение азотного лазера на первой положительной системе в оптимальной газовой смеси включало переходы  $(2-1)$ ,  $(1-0)$  и  $(0-0)$  с длинами волн 869.5, 888.3 и 1046.9 нм с близкой интенсивностью. Небольшие добавки гелия приводили к росту интенсивности перехода  $(0-0)$  и к исчезновению двух других переходов. Это можно связать со столкновительным тушением уровней с колебательным числом  $v = 2$  и 1. При увеличении концентрации  $SF_6$  наблюдался рост интенсивности перехода  $(2-1)$  и снижение интенсивности перехода  $(0-0)$ , а общая энергия ИК генерации падала.

В экспериментах была установлена сильная зависимость энергии генерации ИК лазера от однородности объемного разряда. Появление искровых каналов приводило к резкому снижению интенсивности ИК излучения из-за невысокого коэффициента усиления на ИК переходах и неоднородностей в активной среде лазера. Генерация на ИК переходах начиналась примерно через 30 нс после начала УФ импульса. К этому времени при высокой концентрации электроотрицательной добавки разряд терял однородность даже в случае использования ГПТ. Наиболее наглядно влияние однородности разряда на энергию излучения первой положительной системы наблюдалось в смесях с  $NF_3$  (рис.4). При парциальном давлении  $NF_3$  0.5 Тор ГПТ формирует однородный разряд длительностью более 150 нс. При этом энергия генерации на первой и второй положительных системах азота одинаковы. С уве-

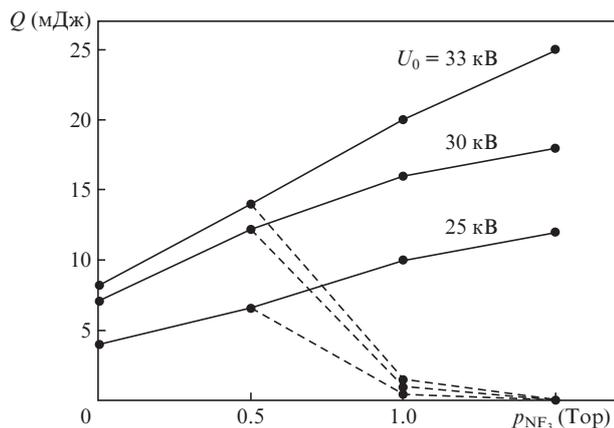


Рис.4. Зависимости энергии излучения азотного лазера на второй (сплошные линии) и первой (штриховые линии) положительных системах азота от давления добавки NF<sub>3</sub> при давлении азота 60 Тор. Неселективный резонатор образован Al-зеркалом и кварцевой пластинкой, L = 90 см.

личением концентрации NF<sub>3</sub> разряд теряет свою однородность и начинает расширяться от центра лазерного промежутка к его краям (подробнее это явление будет рассмотрено ниже). В результате энергия ИК генерации падает до нуля, тогда как энергия УФ излучения продолжает расти. Близкие зависимости были получены и для смесей с SF<sub>6</sub> при увеличении давления добавки с 3 до 9 Тор. При накачке LC-генератором энергия излучения на первой положительной системе азота не превышала 1 мДж из-за быстрой контракции объемного разряда.

### 3.3. Двухпиковый режим работы азотного лазера

Характерной особенностью работы азотного лазера на смесях с добавками SF<sub>6</sub> и NF<sub>3</sub> является импульс излучения с двумя максимумами (см. рис.2). Это связано с повышением напряжения горения разряда за счет прилипания электронов к молекулам добавок и с модуляцией напряжения на лазерном промежутке осцилляциями тока обостряющей емкости. Амплитуда  $U_d$  во втором максимуме соответствует  $E/p > 100 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$ , что достаточно для периодического создания в активной среде азотного

лазера инверсной населенности на переходе  $\text{C}^3\text{P}_u - \text{V}^3\text{P}_g$ . Глубина провала интенсивности между пиками генерации зависит от давления смеси. При его повышении, добавке ~10% и  $L = 72 \text{ см}$  наблюдался, как и в [6, 10], импульс излучения, состоящий из двух пиков. Такие же колебания напряжения имеют место и в чистом азоте, однако без электроотрицательной примеси значение параметра  $E/p$  во втором пике напряжения менее  $40 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$  слишком мало для получения инверсной населенности в системе  $\text{C}^3\text{P}_u - \text{V}^3\text{P}_g$ . При этом изменение периода колебаний тока обостряющего контура позволит управлять формой лазерного импульса. Влияние  $C_1$  на форму импульса лазерного излучения иллюстрирует рис.5. При увеличении обостряющей емкости с 2.45 до 3.6 нФ период модуляции тока разряда вырос с 25 до 33 нс. Соответственно увеличилось расстояние между пиками генерации. Дальнейшее увеличение периода колебаний до 45 нс привело к исчезновению второго пика излучения, что связано с полной потерей инверсии населенностей перехода  $\text{C}^3\text{P}_u - \text{V}^3\text{P}_g$  в течение этого промежутка времени [10].

Дальнейшее увеличение задержки между пиками генерации за счет увеличения периода колебаний тока в цепи  $C_1$  и перераспределения плотности тока разряда было получено в смесях с NF<sub>3</sub>. При повышении концентрации NF<sub>3</sub>, снижении зарядного напряжения конденсатора  $C_0$  (или) отключении ППТ первый пик генерации возникает в центре разрядного промежутка, тогда как второй пик излучения смещается к краям разрядной области. Поскольку пороговая плотность тока разряда в азотном лазере составляет  $\sim 100 \text{ А}/\text{см}^2$  [13–16], это явление можно связать со смещением в течение импульса накачки области разряда с максимальной плотностью тока из центра лазерного промежутка к его краям (рис.6). Перераспределение тока разряда по ширине лазерного промежутка позволяет увеличить задержку между пиками и интегральную длительность импульса генерации азотного лазера до ~60 нс.

Генерацию пиков излучения из разных областей разряда, связанную с расширением разряда, можно объяснить немонотонной зависимостью коэффициента прилипания к молекулам NF<sub>3</sub> от энергии электронов [24] и параметра  $E/p$  [10]. Отметим, что генерация излучения из разных областей разряда наблюдалась только в условиях, когда ге-

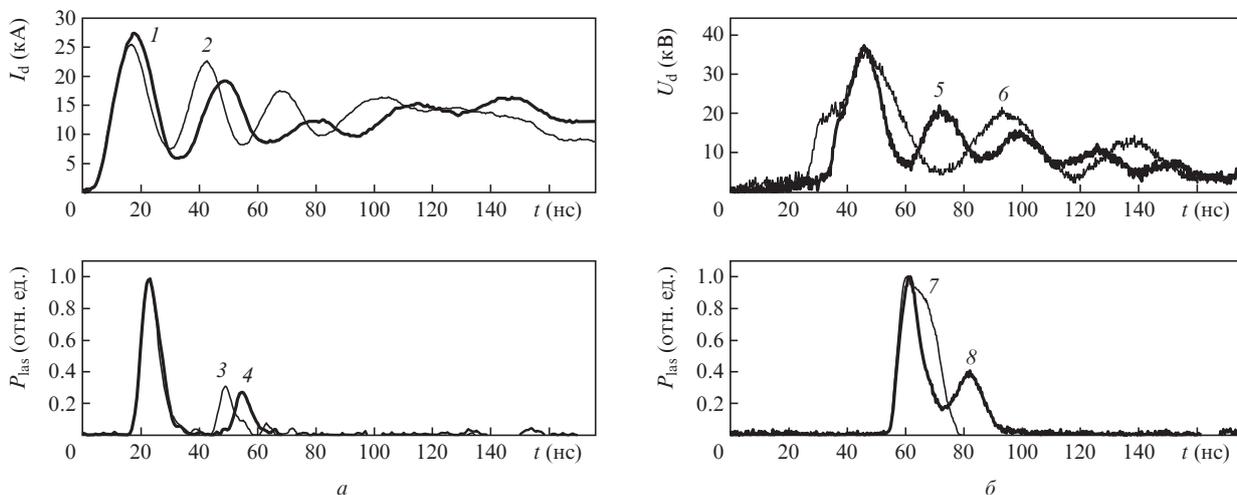


Рис.5. Осциллограммы импульсов тока разряда (1,2), напряжения на лазерном промежутке (5,6) и мощности лазерного излучения на  $\lambda = 337.1 \text{ нм}$  (3,4,7,8) в смесях  $\text{N}_2:\text{NF}_3 = 75:3 \text{ Тор}$  (а) и  $\text{N}_2:\text{SF}_6 = 30:3 \text{ Тор}$  (б) при  $C_1 = 2.45$  (2,3,5,8), 3.6 (1,4) и 7.2 нФ (6,7);  $L = 72 \text{ см}$ ,  $U_0 = 33 \text{ кВ}$ .

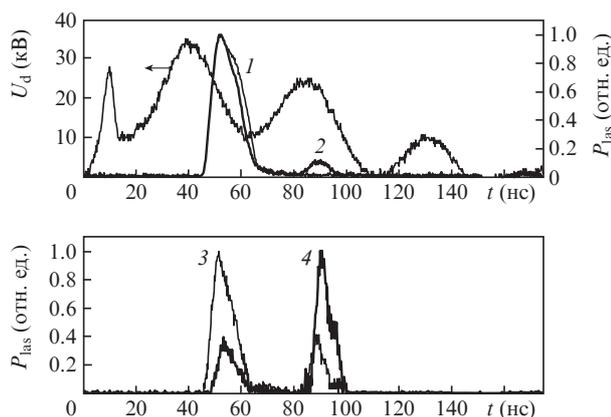


Рис.6. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и мощности лазерного излучения на  $\lambda = 337.1$  нм в смеси  $N_2:NF_3 = 25:1$  при  $p = 45$  Тор. Излучение регистрируется из центра разрядного промежутка (1), со всей апертуры лазера (2) и из области, расположенной в 5 (3) и 8 мм (4) от центра лазерного промежутка. Накачка от LC-генератора,  $C_1 = 7.2$  нФ,  $U_0 = 33$  кВ,  $L = 72$  см.

нератор накачки не мог обеспечить быстрое нарастание тока разряда (высокая концентрация  $NF_3$ , отключение ППТ и (или) низкое  $U_0$ ). Величина  $E/p$  из-за геометрии электродов несколько больше в центре разрядного промежутка. В этом случае на стадии спада напряжения плотность тока будет максимальной вблизи центра лазерного промежутка. В момент пробоя лазерного промежутка  $E/p$  превышает  $80 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$  – значение, при котором константа скорости прилипания и сечение прилипания электронов к молекулам  $NF_3$  максимальны [10]. В связи с этим скорость прилипания электронов к  $NF_3$  монотонно убывает с ростом  $E/p$  и становится минимальной в центральной части лазерного промежутка, что приводит к максимальной плотности тока разряда в данной области. При повторном росте напряжения коэффициент прилипания электронов в центральной области разряда растет быстрее, чем на периферии, поэтому плотность тока разряда начинает повышаться на краях апертуры разряда, что приводит к появлению второго пика лазерного излучения на краях разрядной области. Подобное поведение разряда в широкоапертурном азотном лазере вызывает увеличение длительности генерации до  $\sim 100$  нс [25].

Коэффициент прилипания в смесях азота с  $SF_6$  монотонно снижается с ростом  $E/p$  [26], поэтому в смесях с  $SF_6$  и при оптимальных условиях накачки в смесях с  $NF_3$  разряд формируется по всей ширине промежутка в течение нескольких наносекунд и генерация начинается одновременно по всей апертуре разряда. Заметного перераспределения плотности тока при этом не наблюдается.

### 3.4. Режим генерации прямоугольных импульсов на переходе $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$

На рис.7 приведены осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и лазерного излучения на  $\lambda = 337.1$  нм, полученные в смесях азота с  $SF_6$  при  $L = 90$  см. Поскольку период колебаний напряжения на лазерном промежутке для двух лазеров был одинаков, исчезновение провала между пиками, которые наблюдались для приведенных на рис.2 и 5 условий эксперимента, связано с увеличением  $L$ . Импульсы излучения имели форму, близкую к прямоугольной, и полную длительность до 55 нс. Максимальная длительность на полувывоте (около

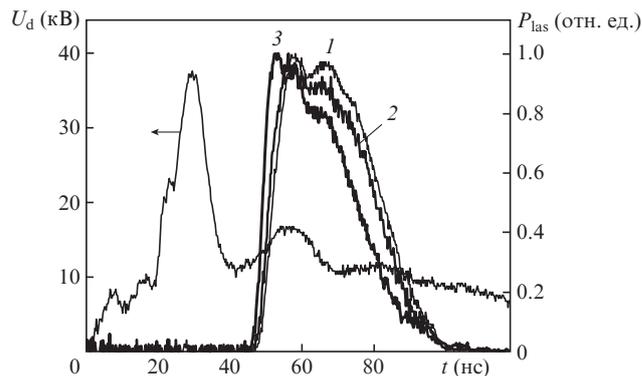


Рис.7. Осциллограммы импульса напряжения на лазерном промежутке и мощности лазерного излучения на  $\lambda = 337.1$  нм в смеси азота при  $p = 30$  Тор с добавками  $SF_6$  при давлении 4.5 (1), 6 (2) и 9 Тор (3);  $U_0 = 33$  кВ,  $L = 90$  см.

35 нс) достигалась при давлении добавки 4.5 Тор и близкой к максимальной энергии излучения (см. рис.3). Импульсы лазерного излучения длительностью около 50 нс получались и при  $L = 72$  см в случае низкого давления смеси [6, 10], однако энергия излучения при этом была менее 10 мДж. Амплитуда второго пика напряжения на лазерном промежутке в диапазоне давлений добавки 4.5–9 Тор менялась слабо, поэтому некоторое снижение длительности генерации на полувывоте с ростом концентрации  $SF_6$  связано с уменьшением параметра  $E/p$  во втором максимуме  $U_d$ . Энергия излучения на ИК переходах азота в этих экспериментах не превышала 2–3 мДж.

### 3.5. Каскадная генерация в азотном лазере

Каскадная генерация в азотном лазере исследовалась в [27–29]. Однако в данных работах рассматривалось влияние лазерного излучения на полосе  $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$  только на заселение верхнего лазерного уровня полосы  $V^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$ , поскольку УФ генерация всегда прекращалась значительно раньше, чем достигался порог на ИК переходах.

В наших экспериментах при  $L = 90$  см и работе с неселективным резонатором, состоящим из алюминиевого зеркала и кварцевой пластинки, в смесях азота с небольшими добавками  $NF_3$  и  $SF_6$  был получен интересный результат, который говорит о влиянии ИК генерации на параметры лазерного излучения с  $\lambda = 337.1$  нм. При увеличении  $L$  генерация на первой и второй положительных системах азота наблюдались одновременно (рис.8). Вначале, как и во всех предыдущих экспериментах, порог генерации достигался на  $\lambda = 337.1$  нм, а затем, до значительного уменьшения мощности излучения на второй положительной системе азота, появлялся ИК импульс. Полная длительность УФ импульса достигала 100 нс, энергия в его «хвосте» составляла примерно 3% от полной энергии. Одновременная генерация на двух положительных системах азота наблюдалась ранее в [30], но при использовании генератора на полосковых линиях длительность накачки и УФ импульса не превышала  $\sim 10$  нс. Основным условием увеличения длительности импульса генерации на  $\lambda = 337.1$  нм являлась высокая энергия излучения на первой положительной системе азота, сравнимая с энергией УФ излучения. Для условий рис.4 и 8 энергии генерации на УФ и ИК полосках составляли 12–14 мДж. При использовании селективного резонатора с зеркалом с коэффициентом отражения свыше 99% на  $\lambda = 337.1$  нм или

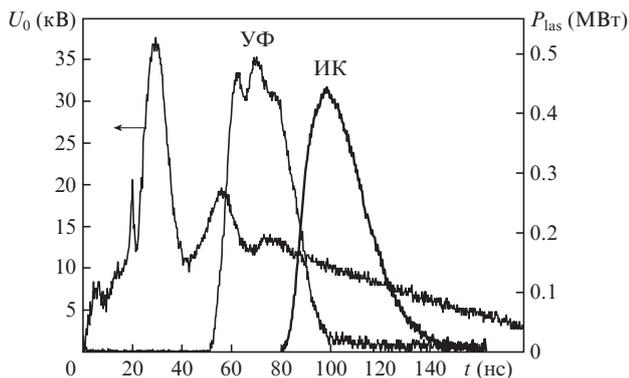


Рис.8. Осциллограммы импульса напряжения на лазерном промежутке и мощности лазерного излучения на первой (ИК) и второй (УФ) положительных системах азота в смеси  $N_2:SF_6 = 30:3$  Тор при  $U_0 = 33$  кВ,  $L = 90$  см (неселективный резонатор).

при небольшой разъюстировке неселективного резонатора, в результате чего уменьшался коэффициент обратной связи, генерация на ИК переходах начиналась после окончания УФ импульса, а ее энергия падала на порядок. Энергия ИК генерации снижалась также при нарушении однородности разряда в случае использования LC-генератора и (или) смесей с большим содержанием электроотрицательных добавок. В этих условиях длительность генерации на  $\lambda = 337.1$  нм не увеличивалась (см. рис.7). Отметим, что данный результат не связан с регистрацией спонтанного излучения, поскольку измерения проводились на расстоянии 3–5 м от лазера. При работе без оптического резонатора и при генерации только усиленного спонтанного излучения фотоэлементы не фиксировали никаких сигналов.

Увеличение длительности импульса УФ генерации можно объяснить разгрузкой нижнего лазерного уровня  $V^3P_g$  второй положительной системы вынужденными каскадными переходами на полосе  $V^3P_g - A^3\Sigma_u^+$  первой положительной системы. При близких энергиях излучения уровень  $V^3P_g$  вследствие переходов первой положительной системы будет разгружаться в три раза быстрее, чем заселяться в результате УФ генерации. По-видимому, этого достаточно для сохранения инверсии населенности на переходе  $C^3P_u - V^3P_g$ , а увеличение  $L$  лазера позволяет увеличить длительность импульса УФ излучения до 100 нс.

#### 4. Заключение

Исследованы параметры лазерной генерации в смесях азота с электроотрицательными примесями при накачке поперечным разрядом от различных генераторов. Показано, что при использовании ГПТ в смесях  $N_2-SF_6$  ( $NF_3$ ) формируется устойчивый объемный разряд, что позволяет увеличить энергию и КПД генерации на первой и второй положительных системах азота и реализовать различные режимы работы азотного УФ лазера. Энергия излучения в диапазоне длин волн 869.5–1047 нм достигала 27 мДж при пиковой мощности 0.7 МВт, а энергия излучения на  $\lambda = 337.1$  нм составляла 50 мДж при пиковой мощности 1 МВт.

Достигнуто значительное увеличение длительности вынужденного излучения на  $\lambda = 337.1$  нм. Получены наибольшие энергии генерации на первой и второй положительных системах азота при накачке поперечным разрядом с УФ предыонизацией.

Реализован режим генерации сдвоенных лазерных импульсов с управляемой задержкой между отдельными пиками. Показано, что при добавлении в азот  $NF_3$  задержка между пиками может превышать 50 нс.

Определены условия достижения эффективной УФ генерации с полной длительностью лазерного импульса более 50 нс. Получена одновременная генерация на первой и второй положительных системах азота. Показана возможность разгрузки нижнего уровня перехода  $C^3P_u - V^3P_g$  вынужденными переходами второй положительной системы  $V^3P_g - A^3\Sigma_u^+$ , что позволяет увеличить длительность излучения на  $\lambda = 337.1$  нм до 100 нс.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», госконтракт № 02.740.11.0562.

1. Гушин Е.М., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. *Письма в ЖТФ*, **31**, 42 (2005).
2. Zhu C., Palmer G.M., Breslin T.M., Harter J., Ramanujam N. *J. Biomed. Opt.*, **13**, 034015 (2008).
3. Gheysari Z., Jelvani S., Abolhosseini Sh., Rouhollahi A., Vatani V., Rabbani M. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **5**, 242 (2010).
4. Bulgakova N.M., Panchenko A.N., Tel'minov A.E., Shulepov M.A. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.*, **98**, 393 (2010).
5. Bahrapour Alireza, Fallah R., Ganjovi A.A., Bahrapour Abolfazl. *Opt. Las. Technol.*, **39**, 1014 (2007).
6. Панченко А.Н., Суслов А.И., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. *Квантовая электроника*, **37**, 433 (2007).
7. Hariri A., Jaber M., Ghoreyshi S. *Opt. Commun.*, **281**, 3841 (2008).
8. Козырев А.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. *Квантовая электроника*, **38**, 731 (2008).
9. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Жупиков А.А. *Квантовая электроника*, **39**, 901 (2009).
10. Panchenko A.N., Suslov A.I., Tarasenko V.F., Kononov I.N., Tel'minov A.E. *Phys. Wave Phenomena*, **17**, 251 (2009).
11. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 489 (2001).
12. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 1, 81 (1978).
13. Levatter J.I., Lin S.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 703 (1974).
14. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.*, **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., Guerra Perez J.M. *Appl. Phys. B*, **52**, 42 (1991).
18. Judd O.P. *IEEE J. Quantum Electron.*, **12**, 78 (1976).
19. Suchard S.N., Sutton D.G., Heidner R., III. *IEEE J. Quantum Electron.*, **11**, 908 (1975).
20. Suchard S.N., Galvan L., Sutton D.G. *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 521 (1975).
21. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. *Квантовая электроника*, **37**, 319 (2007).
22. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. *Изв. ТПУ*, **312**, 113 (2008).
23. Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **40**, 192 (2010).
24. Nandi D., Rangwala S.A., Kumar S.V.K., Krishnakumar E. *Int. J. Mass Spectrometry*, **205**, 111 (2001).
25. Коновалов И.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А. *Квантовая электроника*, **37**, 623 (2007).
26. Christophorou L.G., Oltoff J.K. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **29**, 267 (2000).
27. Лисицын В.Н., Сорокин А.Р., Телегин Г.Г. *Квантовая электроника*, **2**, 1710 (1975).
28. Yasuda Y., Sokabe N., Murai A. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, 1143 (1980).
29. Scaffardi L., Schinca D., Tocho J.O., Ranea-Sandoval H.F., Gallardo M. *Appl. Opt.*, **11**, 22 (1985).
30. Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И. *ЖТФ*, **44**, 1100 (1974).