

# УФ лазеры на смесях $N_2-SF_6$ и $N_2-NF_3$ с накачкой поперечным и продольным разрядами

С.Б.Алексеев, Е.Х.Бакшт, И.Д.Костыря, А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко

*Исследованы лазеры на второй положительной системе азота (электронная полоса  $C^3P_u - B^3P_g$ ,  $\lambda = 337.1$  и  $357.7$  нм) при накачке смесей азота с электроотрицательными газами ( $SF_6$  и  $NF_3$ ) поперечным и продольным разрядами. Измерены амплитудно-временные и спектральные характеристики генерации при накачке от емкостных и индуктивных накопителей энергии. При накачке поперечным разрядом от емкостного накопителя получена энергия излучения 17 мДж, а при накачке от индуктивного накопителя – 18.4 мДж. Показано, что в смесях азота с  $NF_3$  рост средней мощности излучения продолжается при более высоких частотах следования импульсов, чем в азоте. При накачке поперечным разрядом на  $\lambda = 357.7$  нм получена двухпиковая генерация с общей длительностью импульса более 40 нс. Установлено положительное влияние добавок  $SF_6$  на мощность излучения азотного лазера с продольным разрядом.*

**Ключевые слова:** азотный УФ лазер, смеси  $N_2 - SF_6$  и  $N_2 - NF_3$ , накачка поперечным и продольным разрядами, индуктивные и емкостные накопители энергии.

## 1. Введение

УФ генерация в молекулярном азоте (вторая положительная система, электронная полоса  $C^3P_u - B^3P_g$ , переходы  $0 - 0$  ( $\lambda = 337.1$  нм) и  $0 - 1$  ( $\lambda = 357.7$  нм)) возможна при различных способах накачки [1]. Более перспективным является УФ лазер на азоте с накачкой самостоятельным разрядом. В ряде работ при накачке поперечным разрядом добавление электроотрицательных газов к азоту приводило к увеличению энергии генерации в УФ и ИК областях спектра [2–11]. Однако до настоящего времени отсутствуют данные, позволяющие прогнозировать параметры генерации различных лазеров при использовании смесей азота с электроотрицательными газами, а также нет единой точки зрения на причину увеличения энергии излучения азотного лазера при добавлении электроотрицательных газов.

Цель настоящей работы – комплексные исследования характеристик генерации на второй положительной системе азота при добавлении к азоту электроотрицательных газов и определение оптимальных условий накачки электрическим разрядом для достижения максимальных энергий излучения.

## 2. Экспериментальные установки и методики

Для реализации различных условий накачки были использованы семь импульсных электроразрядных лазеров повышенного давления и их модификаций [12–15]. Применение различных установок позволяло в широких

пределах изменять условия накачки. Эксперименты проводились на установках, в которых использовались емкостные и индуктивные накопители энергии, а также поперечный и продольный разряды. Каждая установка была снабжена системой предыонизации, что позволяло формировать объемный разряд при повышенных давлениях и оптимальных значениях параметра  $E_0/p$  ( $E_0$  – максимальная напряженность электрического поля перед пробоем промежутка,  $p$  – давление газа) [11].

Установки 1Е (накачка от емкостного накопителя) и 1И (накачка от индуктивного накопителя) применялись ранее для исследования нецепных HF(DF)-лазеров и эксиплексных лазеров и подробно описаны в [12, 13]. Разрядный промежуток равнялся 2 см, активный объем  $V$  составлял примерно  $2 \times 0.5 \times 50$  см, предыонизация осуществлялась излучением 72 искровых промежутков, которые располагались равномерно с двух сторон анода. При накачке от емкостного накопителя энергии (установка 1Е) емкость накопительного конденсатора  $C_0 = 70$  нФ, индуктивность контура разряда конденсатора  $C_0$  через лазерную камеру  $L_0 = 47$  нГ. Обостряющий конденсатор  $C_1$  (2.4 нФ) состоял из 72 конденсаторов, равномерно распределенных по длине лазерной камеры и соединенных последовательно с искровыми промежутками предыонизации. Индуктивность  $L_1$  разрядного контура обостряющего конденсатора  $C_1$  составляла 14 нГ. При накачке от индуктивного накопителя (установка 1И) параллельно лазерному промежутку включались шесть или восемь SOS-диодов, через которые в прямом направлении предварительно пропускаться ток от дополнительного конденсатора [12, 13]. Применение индуктивного накопителя энергии сокращало длительность фронта импульса напряжения и длительность накачки, а также увеличивало пробивное напряжение и мощность накачки.

В установках 2Е и 2И разрядный промежуток был увеличен до 3.8 см, активный объем – примерно до  $3.8 \times 1.5 \times 72$  см, а также использовались профилированные электроды [12, 13].

С.Б.Алексеев, Е.Х.Бакшт, И.Д.Костыря, А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 10 июня 2004 г., после доработки – 30 августа 2004 г.

Установка 3Е применялась ранее для накачки нецепных HF(DF)-лазеров [14], а также CO<sub>2</sub>-лазера. Разрядный промежуток равнялся 2.3 см, активный объем составлял  $\approx 2.3 \times 0.7 \times 60$  см, предьонизация осуществлялась излучением поверхностного разряда через сетчатый катод. Емкость накопительного конденсатора  $C_0$  равнялась 76 нФ, а емкость обостряющего конденсаторов  $C_1$  составляла 18 нФ. Индуктивность разрядного контура установки 3Е была примерно в 2 раза больше, чем установки 1Е.

На установка 4Е импульсно-периодический режим генерации на N<sub>2</sub> исследовался с помощью лазера «Фотон-1», описанного в [15]. Частота следования импульсов накачки изменялась от 1 до 15 Гц. Данный лазер имел минимальную из использованных в настоящей работе установок индуктивность разрядного контура на единицу активной длины ( $\sim 0.5$  нГн на 1 м). Лазер «Фотон-1» ранее использовался для получения генерации на эксиплексных молекулах и на азоте. Разрядный промежуток равнялся 1 см, активный объем  $V$  составлял примерно  $1 \times 0.3 \times 20$  см, предьонизация осуществлялась излучением 20 искровых промежутков, которые располагались равномерно с двух сторон анода. Емкости  $C_0$  и  $C_1$  были равны 5 нФ, импеданс разрядного контура с конденсатором  $C_1$  и лазерным промежутком не превышал 0.7 Ом.

На установке 5И разряд возбуждался в керамической трубке длиной 19 см с внутренним диаметром 0.7 см. Накачка осуществлялась от индуктивного накопителя энергии, подобного описанному в [16]. На внешней поверхности трубки устанавливался дополнительный электрод, который через конденсатор  $C_T = 22$  пФ соединялся с заземленным электродом, что приводило к формированию слаботокового емкостного разряда, используемого для предьонизации. Частота следования импульсов обычно составляла 8 Гц.

Во всех лазерах резонатор был образован плоским зеркалом с алюминиевым напылением и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Энергия и средняя мощность излучения измерялись калориметром ИМО-2Н, форма импульса излучения регистрировалась фотодиодом ФЭК-22, а осциллограммы напряжения и тока – с помощью омических делителей напряжения и токовых шунтов или поясов Роговского. Запись электрических сигналов осуществлялась скоростным цифровым осциллографом. Спектры генерации снимались с помощью спектрографа ИСП-30 или монохроматора МДР-13. Рабочие смеси готовились непосредственно в лазерных камерах.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Накачка поперечным разрядом от емкостного накопителя энергии

Емкостные накопители энергии традиционно используются для накачки УФ азотного лазера [1–11]. Исследования добавления в азот электроотрицательных газов, проведенные нами на установках с поперечным разрядом, дали следующие результаты. Добавки SF<sub>6</sub> и NF<sub>3</sub> к азоту, как правило, приводят к увеличению энергии и длительности импульса излучения, а также могут влиять на спектр генерации. Однако изменение лазерных характеристик в этом случае существенно зависит от многих параметров – длительности импульса возбуждения, мощ-

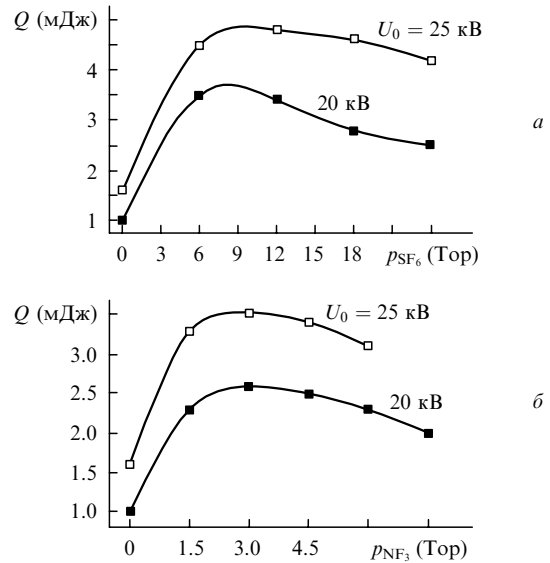


Рис.1. Зависимости энергии генерации N<sub>2</sub>-лазера от давления добавок SF<sub>6</sub> (а) и NF<sub>3</sub> (б) в азот при давлении 60 Торр и зарядном напряжении  $U_0$  емкостного накопителя 20 и 25 кВ (установка 1Е).

ности накачки, индуктивности разрядного контура, длительности фронта импульса напряжения, напряжения холостого хода генератора, геометрии разрядного промежутка, давления и состава смеси.

На рис. 1 приведены зависимости энергии излучения в импульсе от давления добавок SF<sub>6</sub> и NF<sub>3</sub> к азоту, полученные на установке 1Е. При добавлении каждого из электроотрицательных газов энергия излучения в импульсе увеличивается, однако в смесях с SF<sub>6</sub> этот эффект больше на 40% – энергия излучения достигает почти 5 мДж. Оптимальные парциальные давления NF<sub>3</sub> в смеси оказались примерно в три раза меньше, чем SF<sub>6</sub>. При индуктивности разрядного контура  $L_0 = 47$  нГ оптимальная концентрация SF<sub>6</sub> в смеси составила около 17%. С увеличением межэлектродного зазора и активного объема (установка 2Е) энергия излучения как в азоте, так и в смеси азота с SF<sub>6</sub> выросла в 2–3 раза.

На рис.2 приведены зависимости энергии излучения в импульсе от давления азота, полученные в чистом азоте и в смеси состава N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:1 (установка 3Е). Рост энергии излучения в азоте на установке 3Е по сравнению с установкой 1Е достигнут за счет увеличения зарядного напряжения до 37 кВ. При одинаковых зарядных напряжениях энергия излучения была больше на установке 1Е с меньшей индуктивностью разрядного контура. Дополни-

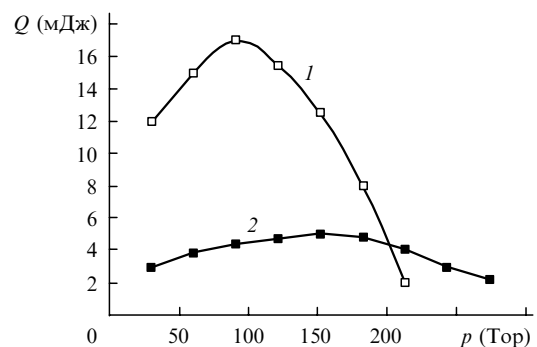


Рис.2. Зависимости энергии генерации N<sub>2</sub>-лазера от давления азота, полученные в чистом азоте (1) и смеси состава N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:1 (2) при зарядном напряжении 37 кВ (установка 3Е).

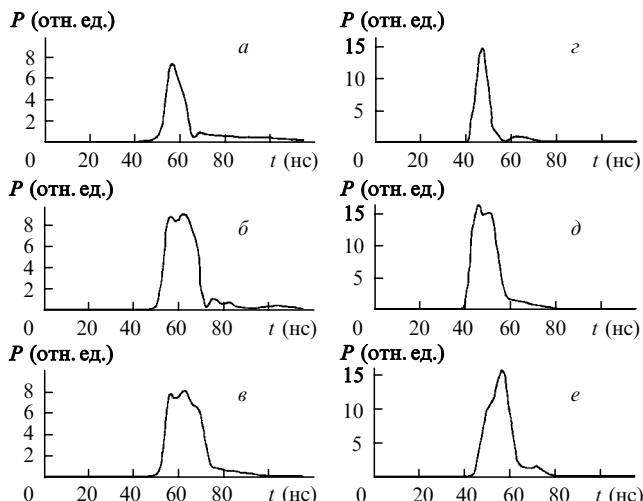


Рис.3. Осциллограммы импульсов генерации  $N_2$ -лазера на  $\lambda = 337.1$  нм (а, з, д), на двух линиях (б, в) и на  $\lambda = 357.7$  нм (е), полученные при давлении  $p = 135$  Тор в чистом азоте (а, з) и смесях состава  $N_2 : SF_6 = 2 : 1$  (б, д, е), и  $1 : 1$  (в) при  $U = 30$  (а–в) и  $37$  кВ (з–е) (установка 3Е).

ние  $SF_6$  к азоту приводило к примерно одинаковому росту энергии излучения на обеих установках, однако оптимальное содержание  $SF_6$  было различным. При индуктивности разрядного контура лазера  $L \approx 100$  нГн и межэлектродном промежутке 2.3 см (установка 3Е) оптимальная концентрация  $SF_6$  в смеси возросла примерно до 50%. Таким образом, при увеличении индуктивности разрядного контура необходимо использовать рабочие смеси с большим содержанием  $SF_6$ .

На рис.3 показаны осциллограммы импульсов генерации, полученные на установке 3Е в различных условиях. При возбуждении чистого азота генерация наблюдается на  $\lambda = 337.1$  нм (осциллограммы а и з). В двойной смеси  $N_2 - SF_6$  длительность импульса излучения возросла почти в 2 раза, причем увеличение концентрации  $SF_6$  от 33% до 50% привело к дополнительному увеличению длительности импульса на полувисоте (осциллограммы б и в). Спектр генерации в двойной смеси при концентрации  $SF_6$  33% и более состоял из двух линий с  $\lambda = 337.1$  и  $357.7$  нм. Генерация на линии с  $\lambda = 337.1$  нм обычно начиналась на несколько наносекунд раньше, чем на линии с  $\lambda = 357.7$  нм. К концу импульса мощность излучения на линии 357.7 нм возрастала (осциллограмма е). Увеличение полной энергии генерации в импульсе в этих условиях происходило как за счет роста энергии излучения на линии 337.1 нм, так и вследствие появления второй линии ( $\lambda = 357.7$  нм); при этом энергия излучения на линии 337.1 нм была больше, чем на линии 357.7 нм.

На рис.4 приведены зависимости энергии излучения от давления добавок  $NF_3$ , полученные на установке 4Е. Данный лазер имел меньшую погонную индуктивность разрядного контура, чем установки 1Е, 2Е и 3Е, и меньшую длительность импульса возбуждения ( $\sim 15$  нс). Это привело к уменьшению относительного роста энергии излучения в импульсе при добавлении электроотрицательного газа по сравнению с установкой 1Е, а также к увеличению оптимальной концентрации  $NF_3$  в смеси. При этом электрический КПД генерации достигал 0.1%. Отметим, что на установке 4Е длительность импульса генерации на полувисоте была наименьшей (около 5 нс) и при добавлении  $NF_3$  увеличивалась не более чем на 1 нс.

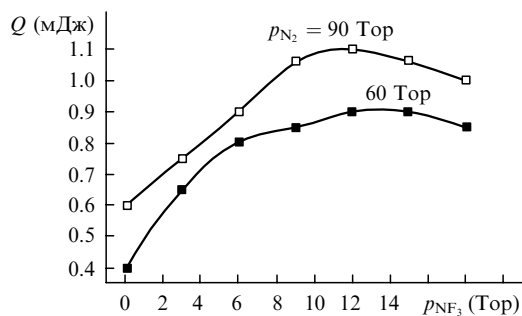


Рис.4. Зависимости энергии генерации  $N_2$ -лазера от добавок  $NF_3$  в азот при давлении азота 60 и 90 Тор и зарядном напряжении  $U_0 = 20$  кВ (установка 4Е).

На рис.5 приведены зависимости средней мощности генерации от частоты следования импульсов, полученные на установке 4Е в азоте и в двойных смесях  $N_2 - NF_3$ . В отличие от  $SF_6$ , при разложении в разряде  $NF_3$  не загрязняет лазерную камеру, что увеличивает время ее стабильной работы. Из рис.5 видно, что в смеси с  $NF_3$  средняя мощность продолжала увеличиваться при частоте следования импульсов более 10 Гц. Основная причина этого – сохранение высокого напряжения пробоя промежутка при увеличении частоты следования импульсов. Отметим, что в данных экспериментах мощность лазерного излучения азотного лазера практически не изменялась при непрерывной работе лазера в течение 10 мин.

### 3.2. Накачка поперечным разрядом от индуктивного накопителя энергии

В наших работах ранее было показано, что применение индуктивного накопителя энергии позволяет увеличить мощность излучения азотного лазера [17, 18]. Добавки электроотрицательных газов при этом не исследовались. На рис.6 приведены зависимости мощности генерации от давления добавок к азоту  $SF_6$  и  $NF_3$  (установка 1И). Применение индуктивного накопителя для накачки чистого азота привело, как и в [17, 18], к двукратному увеличению энергии излучения лазера. Добавление к азоту  $SF_6$  и  $NF_3$ , дало примерно одинаковое увеличение энергии излучения в импульсе при парциальных давлениях  $NF_3$ , приблизительно в 2 раза меньших, чем  $SF_6$ . При использовании той же лазерной камеры оптимальное давление электроотрицательных газов увеличилось примерно в 2 раза по сравнению с давлением при накачке от емкостного накопителя (см. рис.1). Это связано с сокращением переднего фронта импульса напря-

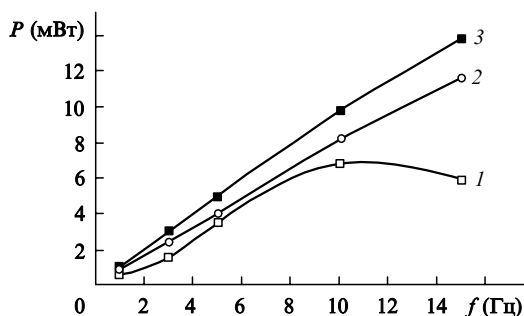


Рис.5. Зависимости средней мощности излучения  $N_2$ -лазера от частоты следования импульсов, полученные в чистом азоте (1), смесях состава  $N_2 : NF_3 = 60 : 10$  (2) и  $90 : 9$  Тор (3) при зарядном напряжении 20 кВ (установка 4Е).

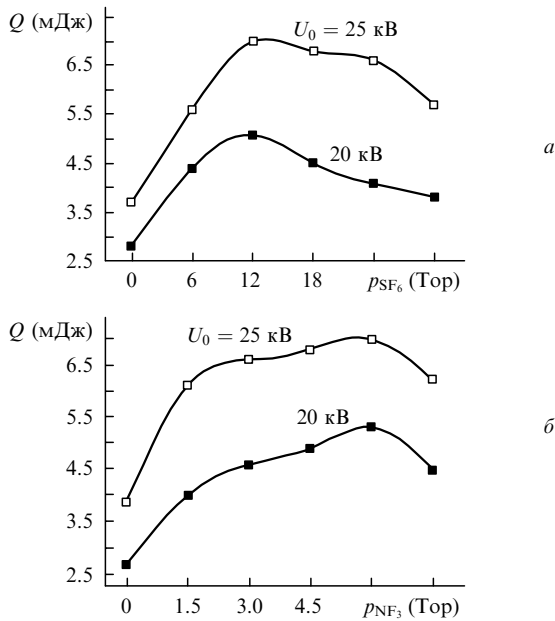


Рис.6. Зависимости энергии генерации  $N_2$ -лазера от давления добавок  $SF_6$  (а) и  $NF_3$  (б) в азот, полученные при  $U_0 = 20$  и  $25$  кВ и давлении азота 60 Тор (установка 1И).

жения и увеличением напряжения пробоя разрядного промежутка. При использовании индуктивного накопителя энергии и неизменном пробивном напряжении (что в данных условиях равносильно уменьшению индуктивности разрядного контура) относительное увеличение энергии излучения при добавках электроотрицательных газов меньше, чем при использовании емкостных накопителей (установки 1Е, 2Е и 3Е), и соответствует полученному при минимальной индуктивности разрядного контура (установка 4Е). Добавление электроотрицательных газов привело также к увеличению длительности импульса генерации на полувысоте (примерно в 1.5 раза).

Максимальные энергии излучения были получены на установке 2И с увеличенным межэлектродным промежутком. При добавлении  $SF_6$  к азоту и зарядном напряжении 30 кВ энергия излучения в импульсе составила 18.4 мДж, а энергия генерации в чистом азоте не превысила 6.7 мДж. Столь значительный рост энергии излучения в данных условиях был обусловлен увеличением напряжения пробоя промежутка до 32 кВ. На рис.7 приведены осциллограммы импульсов напряжения на обостряющем конденсаторе, осциллограммы тока разряда и мощности генерации. Длительность импульса излучения на полувысоте составляла 11 нс, а по основанию достигала 38 нс. Оптимальная концентрация  $SF_6$  в смеси была около 10%. Весьма интересным является то, что при этих условиях в результате увеличения активного объема и уменьшения удельной мощности накачки, а также содержания  $SF_6$  в смеси генерация наблюдалась только на линии с  $\lambda = 337.1$  нм.

Как мы уже отмечали, вследствие увеличения активного объема удельная мощность накачки, полученная на данной установке, была меньше, чем на установках 1Е и 3Е. Это привело к тому, что в двойных смесях генерация на линии 357.7 нм появлялась только при содержании в смеси более 50%  $SF_6$ . При большой концентрации  $SF_6$  в смеси (~60%) наблюдался второй пик генерации на линии 357.7 нм (рис.8). В этих условиях энергия излучения на двух линиях равнялась 6.4 мДж. Импульс гене-

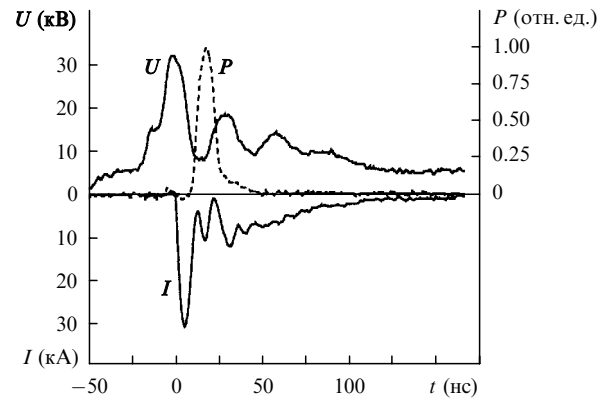


Рис.7. Осциллограммы импульсов напряжения на обостряющем конденсаторе ( $U$ ), тока разряда ( $I$ ) и мощности лазерной генерации ( $P$ ) в смеси состава  $N_2:Sf_6 = 63:6$  Тор при  $U_0 = 30$  кВ (установка 2И).

рации на линии 337.1 нм имел только один пик, с которым совпадал первый пик импульса генерации на линии 357.7 нм. Появление второго пика на импульсе генерации при большой концентрации  $SF_6$  в смеси можно связать с сохранением в квазистационарной стадии разряда достаточно высоких значений параметра  $E/p$  ( $E$  – напряженность электрического поля во время накачки) и температуры электронов в течение нескольких десятков наносекунд. Кроме того, при использовании многоконтурной схемы генератора накачки через 23 нс значительно увеличивался разрядный ток через газовый промежуток. Это увеличение имело место как при накачке смесей азота с  $SF_6$  (рис.7), так и только азота. Однако и в чистом азоте и с смеси при концентрации  $SF_6$  около 10% второй пик генерации не регистрировался.

### 3.3. Накачка продольным разрядом

В известных работах по исследованию азотных лазеров с накачкой продольным разрядом данные о добавках электроотрицательных газов отсутствуют. По-видимому, попытки их использования не дали положительного результата по увеличению импульсной и средней мощности излучения по следующим причинам. Во-первых, в лазерах с накачкой продольным разрядом разрядная плазма имеет малые поперечные размеры (доли квадратного сантиметра) и большую длину (десятки сантиметров), что приводит к замедлению скорости спада напряжения

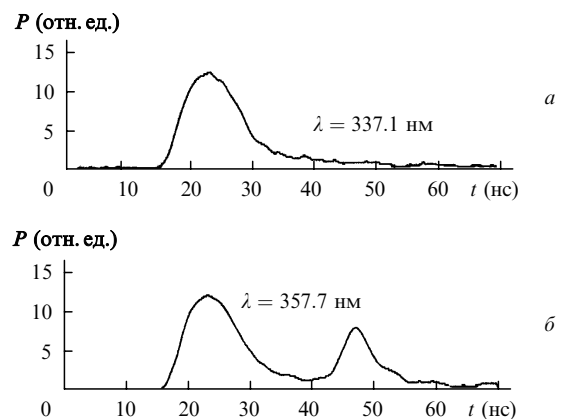


Рис.8. Осциллограммы импульсов лазерной генерации на  $\lambda = 337.1$  нм (а) и  $\lambda = 357.7$  нм (б), полученные в смеси состава  $N_2:Sf_6 = 15:24$  Тор при  $U_0 = 30$  кВ. Момент времени  $t = 0$  соответствует пробую лазерного промежутка (установка 2И).

на разрядном промежутке по сравнению с накачкой поперечным разрядом. Во-вторых, лазеры с накачкой продольным разрядом работают, как правило, при повышенных частотах следования импульсов, а разрядная область ограничена боковыми стенками, что приводит к более быстрому разложению электроотрицательных газов. Поэтому в настоящей работе частота следования импульсов не превышала 8 Гц, а напряжение, подаваемое на промежутки, было увеличено за счет использования генератора с индуктивным накопителем энергии.

На установке 5И были достигнуты следующие результаты. В отсутствие предыонизации разрядного промежутка более высокая мощность генерации была получена в азоте при давлении 21 Тор. Разбавление азота  $SF_6$  приводило к уменьшению импульсной мощности генерации примерно в 2 раза, а также к нестабильному пробоя разрядного промежутка. Импульсное напряжение на промежутке при зарядном напряжении 29 кВ в азоте и смесях азота с  $SF_6$  в этих условиях (схема без обостряющего конденсатора) составляло около 150 кВ.

Включение предыонизации повысило стабильность пробоя разрядного промежутка в смесях азота с  $SF_6$  и несколько уменьшило пробивное напряжение (на 10 % – 30 %), а также привело к увеличению средней и импульсной мощности генерации. Однако при зарядном напряжении 25 кВ и схеме без обостряющего конденсатора добавки  $SF_6$  вызвали снижение импульсной мощности генерации только на 25 %. Увеличение зарядного напряжения до 29 кВ дало одинаковую среднюю мощность излучения в азоте и на смеси азота с  $SF_6$ , которая составила приблизительно 1.5 мВт.

Включение параллельно лазерной камере обостряющего конденсатора емкостью 170 пФ повысило среднюю мощность излучения, которая при зарядном напряжении 25 кВ как в чистом азоте, так и в смеси азота с  $SF_6$  составила 1.5 мВт. При увеличении зарядного напряжения до 29 кВ средняя мощность излучения в смеси с  $SF_6$  (3.3 мВт) была в 1.6 раза больше, чем при использовании только азота (2 мВт). По-видимому, эти данные являются первым подтверждением положительного влияния электроотрицательного газа на мощность излучения азотного лазера с продольным разрядом. Увеличение средней мощности излучения при добавлении  $SF_6$  было достигнуто за счет высокого рабочего напряжения и предыонизации разрядного промежутка.

Спектр генерации при накачке продольным разрядом имел следующую особенность. Даже при возбуждении одного азота генерация регистрировалась не только на традиционной линии с  $\lambda = 337.1$  нм, но и на длине волны 357.7 нм, однако ее интенсивность была более чем на порядок меньше интенсивности линии с  $\lambda = 337.1$  нм. Отметим, что в данных условиях при зарядном напряжении 29 кВ удельная мощность накачки продольным разрядом вследствие малого диаметра трубки была в несколько раз больше, чем при накачке поперечным разрядом на любой из установок. При добавлении к азоту  $SF_6$  и зарядном напряжении 29 кВ генерация также наблюдалась на двух линиях. Энергия излучения на линии с  $\lambda = 357.7$  нм в двойной смеси увеличивалась, но была существенно меньше энергии генерации на линии с  $\lambda = 337.1$  нм.

### 3.4. Обсуждение результатов

Азотный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах и имеет сравнительно высокий кванто-

вый КПД (примерно 16 %). Однако практически реализуемый КПД обычно меньше примерно на два порядка. Это обусловлено сравнительно малой долей энергии, расходуемой на возбуждение верхнего лазерного уровня, и высокой средней энергией электронов, необходимой для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня (энергия электронов должна превышать 11.7 эВ). Высокая средняя температура электронов в квазистационарном режиме разряда при рабочих давлениях азотного лазера (десятки-сотни торр) не достигается, в связи с чем на промежуток подается импульсное напряжение, в несколько раз большее статического пробивного напряжения. Средняя энергия электронов, достаточная для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня, при этом реализуется только в нестационарной стадии разряда, длительность которой составляет несколько наносекунд. Известно, что время жизни верхнего лазерного уровня при давлении азота  $\sim 10$  Торр составляет примерно 40 нс, а нижнего – около 10 мкс [1].

Наблюдаемое в [2 – 10] и в настоящей работе увеличение энергии излучения азотного лазера при добавлении электроотрицательных газов может быть обусловлено четырьмя основными причинами или их комбинацией. Во-первых, очисткой нижних лазерных уровней при столкновениях азота с молекулами электроотрицательных газов. Во-вторых, увеличением времени поддержания высокой средней энергии электронов. В-третьих, аккумуляцией энергии электроотрицательным газом и быстрой передачей этой энергии на верхний лазерный уровень азота. В четвертых, увеличением напряжения пробоя. Анализ полученных результатов показывает, что вторая и четвертая причины являются основными. Эффект увеличения энергии излучения наблюдается при добавлении различных электроотрицательных газов ( $SF_6$ ,  $NF_3$ ,  $F_2$ ) и при их различной концентрации в рабочей смеси, поэтому такое поведение генерации нельзя объяснить передачей возбуждения на верхний лазерный уровень или очисткой нижнего уровня.

Мы считаем, что при добавлении электроотрицательных газов  $SF_6$ ,  $NF_3$ ,  $F_2$ , даже в случае сохранения напряжения пробоя рабочей смеси, вследствие прилипания электронов замедляется рост концентрации электронов  $n$  в плазме разряда,

$$\frac{dn}{dt} = (\alpha - \eta)v_{dr}n - \beta n^2,$$

и соответственно увеличивается время поддержания в разряде высокой электронной температуры ( $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  – коэффициенты ионизации, прилипания и рекомбинации;  $v_{dr}$  – дрейфовая скорость электронов;  $t$  – время). Так как в азотном лазере начальное напряжение на разрядном промежутке значительно больше напряжения в квазистационарной стадии разряда, то сопротивление лазерного промежутка оказывается существенно меньше волнового сопротивления разрядного контура, в результате чего ток через лазерный промежуток определяется, в основном, импедансом разрядного контура, а скорость нарастания тока через промежуток – индуктивностью разрядного контура. При оптимальных концентрациях добавок электроотрицательных газов (около 10 %) ток разряда и его форма практически не изменяются, а время поддержания высоких значений  $E/p$  увеличивается; соответственно растут длительность и мощность

эффективной накачки, что приводит к увеличению длительности и мощности импульса излучения.

Характеристики разряда и генерации в азоте и в смеси азота с  $\text{SF}_6$  были также исследованы в [19], где приведены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке, а также осциллограммы тока разряда и генерации, подтверждающие наше утверждение. Измерения напряжения в квазистационарной стадии на установке 2Е при разряде в чистом  $\text{SF}_6$  дали отношение  $E/p \approx 120 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1} \times \text{Тор}^{-1}$ . При разбавлении смеси азотом наблюдалось плавное уменьшение параметра  $E/p$  до  $50 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$  – его значения в чистом азоте. Добавка  $\text{SF}_6$  (при давлении 9 Тор) к азоту (70 Тор) на установке 2И увеличила значение  $E/p$  в максимуме тока через лазерную камеру на 30 %.

Отметим, что если длительность эффективной накачки в азотном лазере (возбуждение наносекундными импульсами) соответствует времени поддержания в разряде высокой электронной температуры, то добавки электроотрицательных газов не приводят к заметному увеличению энергии излучения. В данной работе установки 1Е, 2Е и 3Е обеспечивали длительность импульса возбуждения более 100 нс. Однако полезная накачка азота осуществлялась только в первые несколько наносекунд, что давало очень низкую эффективность генерации в азоте по отношению к энергии, запасаемой в основном конденсаторе. Применение установок с более коротким (15 нс) импульсом возбуждения (установка 4Е, лазеры в работах [2, 4, 5, 15]) повышает эффективность генерации по отношению к энергии, запасаемой в основном конденсаторе, примерно до 0.1 % и увеличивает энергию излучения. В случае малых длительностей импульса накачки добавка электроотрицательного газа дает меньший выигрыш. При этом, если пробивное напряжение в азоте и в смеси азота с электроотрицательным газом одно и то же, а длительность импульса накачки составляет единицы наносекунд, энергия генерации может не возрасти.

Кроме того, как показали наши исследования (см. рис.9, а также [4]), при добавлении  $\text{SF}_6$  наблюдается увеличение энергии и длительности импульса излучения не только в УФ области спектра, но и в ИК диапазоне на первой положительной системе азота (система полос  $B^3\Pi_g - A^3\Sigma_v^+$ , переход  $0 - 0$ , наиболее сильная линия с  $\lambda = 1048 \text{ нм}$ ). При этом реализуется одновременная генерация в УФ и ИК областях спектра. При эффективной очистке нижнего лазерного уровня для УФ генерации в

столкновениях с молекулами электроотрицательных газов увеличение энергии и длительности импульса генерации на ИК переходах было бы невозможно. Нижний уровень УФ генерации является верхним для ИК генерации. Так как энергия возбуждения уровня  $B^3\Pi_g$  меньше, чем уровня  $C^3\Pi_u$ , то и оптимальные концентрации добавок  $\text{SF}_6$  при генерации в ИК области спектра оказались меньше, чем при генерации в УФ области (рис.9).

Отметим, что при больших концентрациях электроотрицательного газа в смеси он может влиять на нижние лазерные уровни и спектр генерации. Так, на рис.8 второй пик генерации наблюдается только на длине волны 357.8 нм, тогда как линия с  $\lambda = 337.1 \text{ нм}$  в спектре спонтанного излучения обычно является наиболее интенсивной. Можно предположить, что за счет очистки колебательного уровня  $v = 1$  в реакции



и увеличения заселения колебательного уровня  $v = 0$  порог генерации на  $\lambda = 337.1 \text{ нм}$  повышается и генерация с некоторого момента времени наблюдается только на  $\lambda = 357.7 \text{ нм}$ . Однако для данного лазера (установка 2И) концентрация  $\text{SF}_6$  при условиях рис.8 в несколько раз превышает оптимальную концентрацию, а энергия генерации меньше максимальной в 3 раза.

При анализе полученных результатов мы не нашли аргументов в пользу аккумулирования энергии электроотрицательным газом и быстрой передачи этой энергии на верхний лазерный уровень азота ( $C^3\Pi_u$ ). Как мы отмечали, увеличение энергии излучения наблюдается при добавлении различных электроотрицательных газов, и трудно предположить возможность резонансной передачи энергии от этих газов к азоту. Кроме того, увеличение энергии УФ генерации в 2 раза наблюдается при содержании электроотрицательного газа в смеси около 3 % (см. рис.9). В этих условиях основная часть вложенной энергии пойдет на возбуждение и ионизацию молекулы азота.

#### 4. Заключение

В работе исследована генерация при накачке смесей азота с электроотрицательными газами ( $\text{SF}_6$  и  $\text{NF}_3$ ) поперечным и продольным разрядами от емкостных и индуктивных накопителей энергии. При накачке поперечным разрядом от емкостного накопителя энергии достигнута энергия излучения 17 мДж, а при накачке от индуктивного накопителя – 18.4 мДж. Энергии излучения в десятки миллиджоулей могут быть получены на УФ переходах азота ( $\lambda = 337.1$  и  $357.7 \text{ нм}$ ) при использовании систем накачки различных импульсных лазеров (эксплексных, нецепных HF- и DF-лазеров,  $\text{CO}_2$ -, а также других лазеров повышенного давления) в смесях азота с электроотрицательными газами ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{NF}_3$ ,  $\text{F}_2$ ). При увеличении индуктивности разрядного контура для достижения максимальной энергии излучения необходимо повышать концентрацию  $\text{SF}_6$  в смеси, при этом разница между энергией излучения в азоте и в смеси азота с  $\text{SF}_6$  будет возрастать. Смеси азота с  $\text{NF}_3$  целесообразно использовать для увеличения средней мощности излучения в импульсно-периодическом режиме. Основные причины увеличения энергии излучения азотного лазера при добавлении электроотрицательных газов, как уже отмеча-

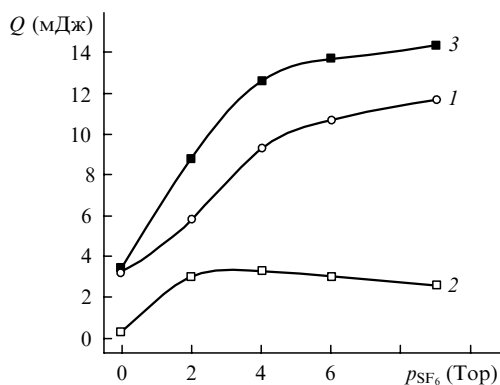


Рис.9. Зависимости энергии излучения  $\text{N}_2$ -лазера в импульсе в УФ (1), ИК (2) областях и суммарной энергии излучения (3) от давления добавок  $\text{SF}_6$  в азот при давлении азота 70 Тор и  $U_0 = 20 \text{ кВ}$  (установка 2И).

лось в [4, 7, 8, 19], связаны с увеличением времени поддержания высоких значений параметра  $E/p$  на промежутке, с увеличением времени полезной накачки и с ростом напряжения на разрядном промежутке перед его пробоем, если в азоте пробой происходил на фронте импульса напряжения. Последний эффект наиболее сильно проявляется при использовании индуктивных накопителей энергии.

1. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed gas lasers* (Bellingham, Washington, USA: SPIE, Opt. Eng. Press, 1995).
2. Levatter J.I., Lin S.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 703 (1974).
3. Suchard S.I., Galvan L., Sutton D.G. *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 521 (1975).
4. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **46**, 2202 (1976).
5. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. *Appl. Phys.*, **23**, 341 (1980).
6. Armandillo E., Kearsley A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 611 (1982).
7. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 161 (1990).
8. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Верховский В.С. *Электронная техника. Сер.11*, в. 1, 58 (1991).
9. Tzolov V.P., Grozdanov K.A., Atanasov P.A. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1210 (1994).
10. Аполлонов В.В., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 483 (1997).
11. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 489 (2001).
12. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
13. Бакшт Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **30**, 506 (2000).
14. Алексеев С.Б., Ванг Л., Ерофеев М.В., Ли Дж., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ян Х. *ПТЭ*, № 2, 90 (2003).
15. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 5, 45 (2000).
16. Костыря И.Д., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф., Шиянов Д.В. *Квантовая электроника*, **31**, 864 (2001).
17. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **17**, 32 (1990).
18. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **22**, 441 (1995).
19. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 1, 81 (1978).