

Лазер на смесях азота с электроотрицательными газами, накачиваемый поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии. Теория и эксперимент

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

Экспериментально исследованы характеристики генерации и разряда в азотном лазере с накачкой поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. Создана численная модель и проведено численное моделирование работы лазера на смесях азота с электроотрицательными газами. Экспериментально и теоретически показано, что добавки электроотрицательных газов позволяют управлять формой импульса генерации на переходе азота $C^3P_u - B^3P_g$. В смесях азота с NF_3 и SF_6 за счет увеличения коэффициента прилипания электронов и роста электрического поля получены импульсы генерации на длине волны 337.1 нм, состоящие из двух отстоящих друг от друга пиков, а также прямоугольные импульсы длительностью 40–50 нс. Энергия излучения в УФ области составила ~ 25 мДж.

Ключевые слова: УФ азотный лазер, индуктивный накопитель энергии, накачка поперечным разрядом, добавки NF_3 , SF_6 , численное моделирование, прямоугольные импульсы генерации.

1. Введение

В работах [1–12] сообщалось об увеличении энергии и длительности импульса в электроразрядных лазерах на молекулярном азоте (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) при добавлении в рабочую смесь электроотрицательных газов. Данный эффект наиболее выражен в лазерах с накачкой поперечным разрядом. Для практического применения представляют интерес азотные лазеры УФ диапазона с энергией излучения в десятки миллиджоулей. Однако численная модель лазера на смеси азота с электроотрицательными газами отсутствовала, что затрудняло исследование процессов, определяющих параметры генерации, а также прогнозирование рабочих параметров новых лазеров. В частности необходимо было объяснить причину получения импульсов генерации, состоящих из двух пиков [11, 12]. Отметим, что теоретические модели лазера, в котором используется азот без добавок электроотрицательного газа, были разработаны ранее [13–17], в том числе модель азотного лазера атмосферного давления [15–17]. В этих расчетах функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в азоте предполагалась максвелловской, что является некорректным при расчетах разряда в смесях азота с галогенами.

Цель данной работы – создание теоретической модели лазера на смесях азота с электроотрицательными газами, а также исследование условий работы азотного электроразрядного лазера, возбуждаемого поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем

энергии и SOS-диодами, в результате чего формируются состоящие из отдельных пиков импульсы генерации и достигается максимальная энергия излучения.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

В экспериментах использовался лазер с возбуждением поперечным разрядом и искровой предыонизацией, подробно описанный в [11, 18]. Для накачки применялся универсальный генератор, позволяющий осуществлять возбуждение как от индуктивного, так и от емкостного накопителя энергии. Генератор включал в себя искровой разрядник, а также накопительный ($C_0 = 70$ нФ) и обострительный ($C_1 = 2.45$ нФ) конденсаторы. При работе в режиме индуктивного накопителя параллельно C_1 устанавливались десять SOS-диодов, через которые ток от дополнительного конденсатора предварительно пропускался в прямом направлении. Применение индуктивного накопителя сокращало длительности фронта импульса напряжения и импульса накачки, а также увеличивало пробивное напряжение и мощность накачки. В качестве зеркал резонатора использовались плоское зеркало с алюминиевым покрытием и плоскопараллельная кварцевая пластинка. Лазер имел активный объем $V = 2 \times 4 \times 72$ см (разрядный промежуток $d = 4$ см).

Энергия излучения азотного лазера измерялась калориметром OPHIR с сенсорными головками FL-250A, PE-50BV. Для регистрации импульса излучения использовался вакуумный фотодиод ФЭК-22 СПУ, на который при помощи светоделительной пластинки направлялась часть лазерного излучения. Спектр излучения лазера регистрировался спектрометром StellarNet EPP2000-C25. Для работы фотодиода и спектрометра в линейном режиме излучение на их входе ослаблялось последовательностью металлических сеток.

В экспериментах с помощью делителя напряжения и пояса Роговского регистрировались также ток разряда и

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

напряжение на электродах лазера. Электрические сигналы подавались на осциллографы TDS-220 или TDS-224.

3. Характеристики лазеров на смесях азота с галогенами

На рис.1 показаны зависимости выходной энергии Q азотного лазера от зарядного напряжения U_0 конденсатора C_0 для разных смесей при разных условиях накачки. Оптимальное давление азота в наших экспериментах составляло 75 Тор. Максимальная энергия лазерного излучения (25 мДж) была получена в смесях азота с NF_3 или SF_6 и накачке от генератора с индуктивным накопителем. При этом основная часть энергии излучалась на $\lambda = 337.1$ нм, а доля энергии излучения на $\lambda = 357$ нм, как и в работе [11], не превышала 10%. Кроме того, в смесях азота с галогенами после окончания УФ лазерного импульса наблюдалось интенсивное излучение на первой положительной системе азота (переход $B^3P_g - A^3\Sigma_u^+$, наиболее интенсивная линия с $\lambda = 1048$ нм). Энергия излучения в ИК области в смеси с SF_6 достигала 5 мДж, что соответствует максимальной энергии, полученной на данной линии при накачке поперечным разрядом [19]. В смеси $N_2 - F_2$ энергия УФ излучения уменьшалась до 15 мДж.

На рис.2 приведены осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и лазерного излучения при накачке чистого азота в разрядах, питаемых генераторами различного типа. Замена емкостного накопителя индуктивным увеличивает пробивное напряжение. Кроме того, во время спада напряжения на промежутке резко возрастает ток разряда. Эти факторы приводят к значительному увеличению энергии генерации азотного лазера.

Характерной особенностью работы лазера на смеси азота с NF_3 является появление второго пика генерации при определенных режимах накачки (рис.3). Задержка между максимумами импульсов генерации составила ~ 25 нс. При этом двухпиковая генерация наблюдалась при максимальных энергиях излучения. С уменьшением U_0 отношение амплитуд первого пика генерации к амплитудам второго увеличивалось, и при малых зарядных напряжениях второй пик исчезал. В случае добавления к азоту SF_6 второй пик генерации появлялся только при содержании SF_6 более 50%. Энергия излучения при этом не превышала 10 мДж, пауза в генерации отсутствовала,

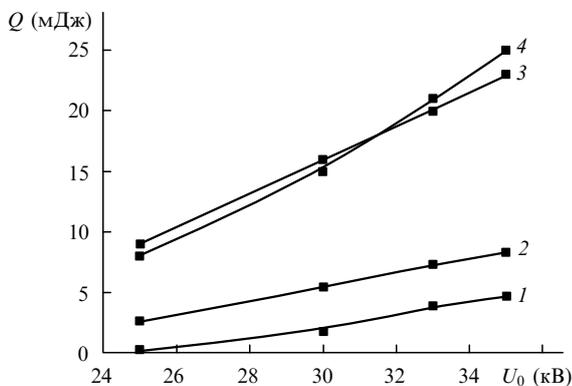


Рис.1. Зависимости выходной энергии Q азотного лазера от зарядного напряжения U_0 конденсатора C_0 в случае накачки чистого азота от генератора с емкостным (1) и с индуктивным (2) накопителями, а также в случае накачки смесей $N_2:NF_3 = 75:3$ Тор (3) и $N_2:SF_6 = 75:9$ Тор (4) от генератора с индуктивным накопителем.

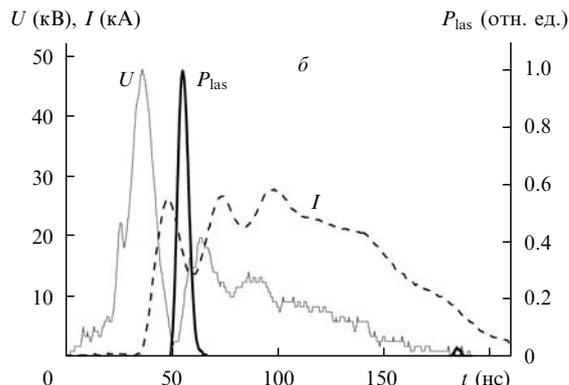
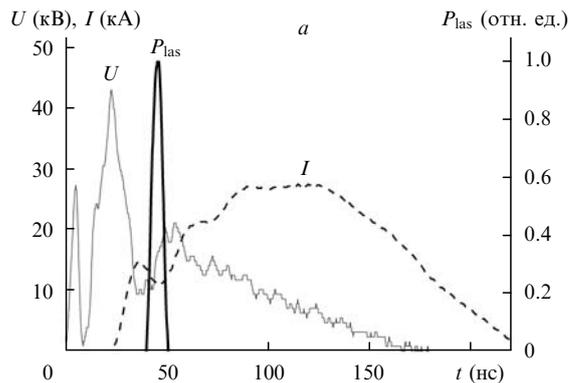


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения U на разрядном промежутке, тока разряда I и лазерных импульсов P_{las} на $\lambda = 337.1$ нм в чистом азоте ($p = 75$ Тор) при накачке от емкостного (а) и индуктивного (б) накопителей энергии; $U_0 = 35$ кВ.

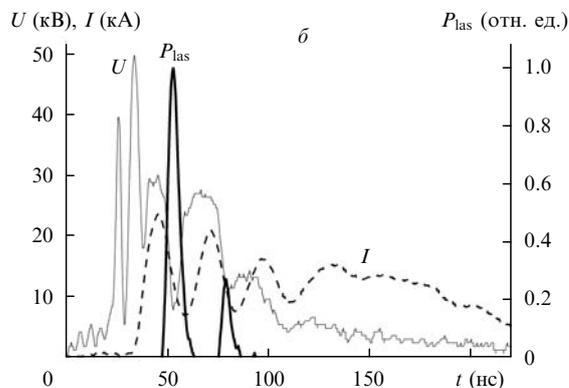
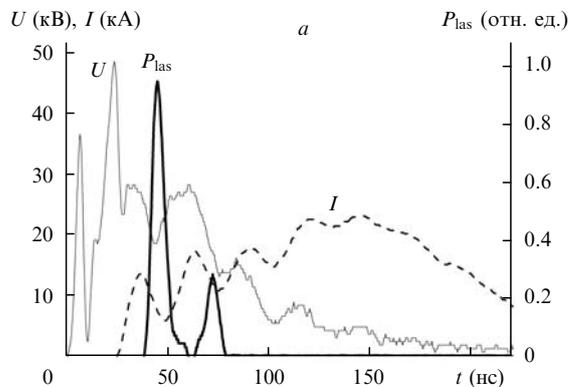


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения U на разрядном промежутке, тока разряда I и лазерных импульсов P_{las} на $\lambda = 337.1$ нм в смеси $N_2:NF_3 = 75:3$ Тор при накачке от емкостного (а) и индуктивного (б) накопителей энергии; $U_0 = 35$ кВ.

а длительность лазерного импульса по основанию достигала ~ 50 нс.

Интересный результат был получен при накачке смеси азота с NF_3 и с SF_6 при уменьшении общего давления газовой смеси. В условиях данного эксперимента наблюдался рост амплитуды второго пика генерации и уменьшение провала между пиками в распределении интенсивности. В результате были получены прямоугольные импульсы длительностью около 50 нс.

4. Численное моделирование азотного лазера с накачкой самостоятельным разрядом в смесях N_2 с электроотрицательными газами

При моделировании плазмохимических процессов в разрядном промежутке и лазерной генерации на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ проводились следующие расчеты:

- расчет функции распределения электронов по энергиям в самостоятельном разряде $f_e(E/p, \varepsilon, t)$, где E и p – напряженность поля и давление газа в разрядном промежутке, ε – энергия электрона, t – время;
- расчет физических параметров электронов (подвижность μ_e , температура T_e , коэффициент диффузии D_e) и коэффициентов скоростей реакций электронов с частицами плазмы;
- расчет кинетики тяжелых частиц;
- расчет формирования лазерного излучения в оптическом резонаторе;
- электротехнические расчеты (схема накачки лазера).

Все перечисленные виды расчетов в виде отдельных программных блоков объединены в самосогласованную модель, схема которой представлена на рис.4.

ФРЭЭ в самостоятельном разряде в смесях N_2-NF_3 (SF_6) определялась методом численного интегрирования уравнения Больцмана с использованием итерационной

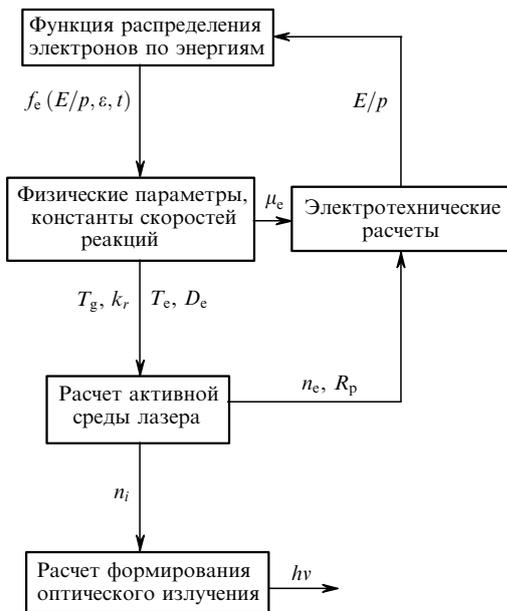


Рис.4. Схема самосогласованной модели плазмохимического реактора ($f_e(E/p, \varepsilon, t)$ – функция распределения электронов по энергиям, μ_e и D_e – подвижность и коэффициент диффузии электронов, R_p – сопротивление плазмы разряда, T_g – температура газа, k_r – константа скорости r -й реакции, n_i – концентрация i -й частицы, n_e и T_e – концентрация и температура электронов).

процедуры [20]. Сечения элементарных процессов взаимодействия электронов с молекулами N_2 , NF_3 и SF_6 и константы скоростей реакций взяты из [21–27].

С целью определения концентраций частиц в плазме численно решалась система уравнений кинетики для пространственно-однородного разряда [15]:

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_r \delta_{ir} k_r \prod_{j=1}^{m^{(r)}} (n_j^{(r)})^{v_j^{(r)}}, \quad (1)$$

где n_i – концентрация i -й частицы в активной среде лазера; δ_{ir} – разность стехиометрических коэффициентов для i -й частицы в правой и левой частях уравнения r -й реакции; $n_j^{(r)}$ – концентрация j -й частицы, участвующей в r -й реакции; $m^{(r)}$ – число частиц разного сорта в левой части уравнения r -й реакции; $v_j^{(r)}$ – стехиометрический коэффициент для j -й частицы в левой части уравнения r -й реакции. Кинетическая схема плазмохимических реакций и процессов в смесях азота с NF_3 и SF_6 в самостоятельном разряде приведена в табл.1.

Табл.1. Кинетическая схема неравновесных плазмохимических процессов в смесях N_2-NF_3 (SF_6). Данные по коэффициентам скоростей реакций и сечениям взяты из работ [21–27] либо получены расчетным путем (для коэффициентов скорости реакций электронов с нейтральными и заряженными частицами).

Реакции	Константы скорости
1. Возбуждение электронных состояний и ионизации	
1. $N_2 + e \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e$	Расчет по ФРЭЭ
2. $N_2 + e \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + e$ $N_2 + e \rightarrow N_2(W', B') + e$ $N_2(B^3\Pi_g) + e$	" –
3. $N_2 + e \rightarrow N_2(a') + e$ $N_2 + e \rightarrow N_2(a, w) + e$ $N_2(a') + e$	" –
4. $N_2 + e \rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + e$ $N_2 + e \rightarrow N_2(E, a'') + e$ $N_2(C^3\Pi_u) + e$	" –
5. $N_2 + e \rightarrow N(^4S) + N(^4S) + e$	" –
6. $N_2 + e \rightarrow N(^4S) + N(^2D) + e$	" –
7. $N_2 + e \rightarrow N(^4S) + N(^2P) + e$	" –
8. $N(^4S) + e \rightarrow N(^2D) + e$	" –
9. $N(^4S) + e \rightarrow N(^2P) + e$	" –
10. $N(^4D) + e \rightarrow N(^2P) + e$	" –
11. $N_2 + e \rightarrow N_2^+ + e + e$	" –
2. Ассоциативная ионизация	
12. $N_2(A^3\Sigma_u^+ + N_2(a') \rightarrow N_4^+ + e$	$k_{12} \approx 5 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$
13. $N_2(a') + N_2(a') \rightarrow N_4^+ + e$	$k_{13} \approx 2 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$
14. $N(^2D) + N(^2P) \rightarrow N_2^+ + e$	$k_{14} \approx 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$
3. Рекомбинация электронов и положительных ионов	
15. $N_4^+ + e \rightarrow N_2 + N_2$	$k_{15} = 2 \times 10^{-6} (300 \text{ K}/T_e) \text{ см}^3/\text{с}$
16. $N_3^+ + e \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N$	$k_{16} = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$
17. $N_2^+ + e \rightarrow N + N$	$k_{17} = 2.8 \times 10^{-7} (300 \text{ K}/T_e)^{1/2} \text{ см}^3/\text{с}$
18. $N_2^+ + e \rightarrow N + N(^2D)$	$k_{18} = 2 \times 10^{-7} (300 \text{ K}/T_e)^{1/2} \text{ см}^3/\text{с}$
Электрон-ионная рекомбинация (трехчастичные процессы)	
19. $e + e + N_2^+ \rightarrow e + N_2$	$k_{19} = 10^{-19} (300 \text{ K}/T_e)^{4.5} \text{ см}^3/\text{с}$
20. $e + N_2^+ + N_2 \rightarrow 2N_2$	$k_{20} = 6 \times 10^{-27} (300 \text{ K}/T_e)^{1.5} \text{ см}^3/\text{с}$

(Продолжение табл.1 см. на следующей стр.)

4. Процессы прилипания и отлипания электронов

- | | |
|---|----------------|
| 21. $e + \text{NF}_3 \rightarrow \text{NF}_2 + \text{F}^-$ | Расчет по ФРЭЭ |
| 22. $e + \text{F}^- \rightarrow \text{F} + 2e$ | — " — |
| 23. $e + \text{SF}_6 + \text{M} \rightarrow \text{SF}_6^- + \text{M}$ | — " — |
| 24. $e + \text{SF}_6 \rightarrow \text{SF}_5^- + \text{F}$ | — " — |
| 25. $e + \text{SF}_6^- \rightarrow \text{SF}_6 + 2e$ | — " — |
| 26. $e + \text{SF}_5^- \rightarrow \text{SF}_5 + 2e$ | — " — |

5. Процессы с участием электронно-возбужденных частиц

- | | |
|---|--|
| 27. $\text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) \rightarrow \text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) + \text{N}_2(\text{X})$ | $k_{27} \approx 1.6 \times 10^{-10} \times (300 \text{ K} / T_g)^{2.64} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 28. $\text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{N}_2$ | $k_{28} = 3 \times 10^{-18} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 29. $\text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{N}(\text{S}^4)$ | $k_{29} = 5 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| $\rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{N}(\text{S}^2\text{P})$ | |
| 30. $\text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{SF}_6 \rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{SF}_6$ | $k_{30} = 1 \times 10^{-14} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 31. $\text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{NF}_3 \rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{NF}_3$ | $k_{31} = 2 \times 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 32. $\text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + \text{N}_2$ | $k_{32} = 5 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 33. $\text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) \rightarrow \text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) + h\nu$ | $k_{33} = 1.5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ |
| 34. $\text{N}_2(\text{a}') + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) + \text{N}_2$ | $k_{34} \approx 2 \times 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 35. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) \rightarrow \text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) + h\nu$ | $k_{35} = 3 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$ |
| 36. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2(\text{a}') + \text{N}_2$ | $k_{36} = 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 37. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) + \text{SF}_6 \rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{SF}_6$ | $k_{37} = 1.1 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 38. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) + \text{NF}_3 \rightarrow \text{N}_2(\text{X}) + \text{NF}_3$ | $k_{38} = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 39. $\text{N}(\text{S}^2\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}(\text{S}^4\text{S}) + \text{N}_2$ | $k_{39} = 6 \times 10^{-15} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 40. $\text{N}(\text{S}^2\text{P}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}(\text{S}^2\text{D}) + \text{N}_2$ | $k_{40} = 2 \times 10^{-18} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 41. $\text{N}(\text{S}^2\text{P}) + \text{N} \rightarrow \text{N}(\text{S}^2\text{D}) + \text{N}$ | $k_{41} = 1.8 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$ |

6. Ионная инверсия

- | | |
|--|---|
| 42. $\text{N}_2^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_4^+ + \text{N}_2$ | $k_{42} = 5 \times 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$ |
| 43. $\text{N}_2^+ + \text{N} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_3^+ + \text{N}_2$ | $k_{43} = 0.9 \times 10^{-30} \times \exp(400 \text{ K} / T_g) \text{ см}^6/\text{с}$ |
| 44. $\text{N}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_3^+ + \text{N}_2$ | $k_{44} = 0.9 \times 10^{-29} \times \exp(400 \text{ K} / T_g) \text{ см}^6/\text{с}$ |
| 45. $\text{N}^+ + \text{N} + \text{M} \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{M} (\text{M} = \text{N}_2)$ | $k_{45} = 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$ |
| 46. $\text{N}_2^+ + \text{N}_2(\text{A}^3 \Sigma_u^+) \rightarrow \text{N}_3^+ + \text{N}$ | $k_{46} < 3 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 47. $\text{N}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{N}^+ + \text{N}_2$ | $k_{47} = 2.4 \times 10^{-15} T_g \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 48. $\text{N}_3^+ + \text{N} \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{N}_2$ | $k_{48} = 6.6 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 49. $\text{N}_4^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2$ | $k_{49} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$ |
| 50. $\text{N}_4^+ + \text{N} \rightarrow \text{N}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2$ | $k_{50} = 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ |

7. Процессы излучения фотонов

- | | |
|--|---|
| 51. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) \rightarrow \text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) + h\nu$ | $k_{51} = 3 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$ |
| 52. $\text{N}_2(\text{C}^3 \Pi_u) + h\nu \rightarrow \text{N}_2(\text{B}^3 \Pi_g) + 2h\nu$ | $\sigma = 7.3 \times 10^{-16} \text{ см}^2$ |

Примечание: T_e и T_g – электронная и газовая температуры.

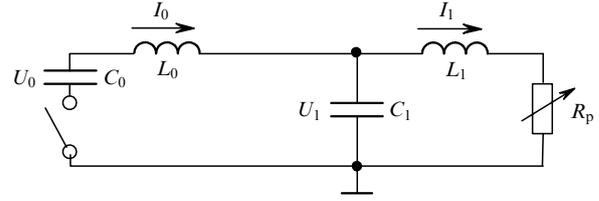


Рис.5. Электрическая схема питания разряда, использованная в модельных расчетах азотного лазера ($C_0 = 70 \text{ нФ}$, $C_1 = 2.45 \text{ нФ}$ – емкости накопительного и обострительного конденсаторов; $L_0 = 25 \text{ нГн}$, $L_1 = 12 \text{ нГн}$ – индуктивности контуров; U_0, U_1 – напряжения на конденсаторах C_0 и C_1 ; I_0 и I_1 – токи через C_0 и нагрузку соответственно).

Электрическая цепь питания разряда, использованная в расчетах, приведена на рис.5. Система уравнений для расчета электрической цепи имеет следующий вид:

$$L_0 \frac{dI_0}{dt} = U_0 - U_1, \tag{2}$$

$$C_0 \frac{dU_0}{dt} = I_0, \tag{3}$$

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = U_1 - I_1 R_p, \tag{4}$$

$$C_1 \frac{dU_1}{dt} = I_0 - I_1. \tag{5}$$

Здесь U_0 – напряжение на накопительной емкости C_0 ; U_1 – напряжение на обострительной емкости C_1 ; I_0 и I_1 – токи накопительного и обострительного контуров; R_p – сопротивление плазмы электрического разряда.

В расчетах кинетики лазерного излучения использовалось уравнение для плотности фотонов n_{ph} в оптическом резонаторе в приближении однородного распределения частиц по объему активной среды:

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = \Omega \frac{n_C}{\tau_{sp}} + c\sigma n_{ph}(n_C - n_B) \frac{l_a}{L} + cn_{ph} \frac{\ln(r_1 r_2)}{2L}, \tag{6}$$

где n_C и n_B – населенности верхнего и нижнего лазерных уровней; Ω – доля спонтанного излучения, падающего на выходное зеркало; r_1 и r_2 – коэффициенты отражения зеркал резонатора; l_a и L – длины активной области и оптического резонатора; c – скорость света; σ – сечение индуцированного испускания фотонов; τ_{sp} – «спонтанное» время жизни верхнего лазерного уровня.

5. Обсуждение результатов численных расчетов и сравнение их с экспериментом

Численные расчеты работы азотного лазера и сравнение их результатов с экспериментом проводились для азота и смеси $\text{N}_2 : \text{NF}_3 = 25 : 1$ при $p = 78 \text{ Тор}$ и $U_0 = 35 \text{ кВ}$. На рис.6 показаны расчетные осциллограммы тока разряда и напряжения на лазерном промежутке, а также импульсы лазерного излучения для данной смеси и чистого азота при $p = 75 \text{ Тор}$. Сравнение рис.2, 3 и 6 показывает хорошее согласие расчетных и экспериментальных кривых. Рассчитанная энергия излучения также была близка к данным измерений, приведенных на рис.1. Из рисунков видно, что напряжение на лазерном промежутке в квазистационарной стадии разряда в чистом азоте приблизи-

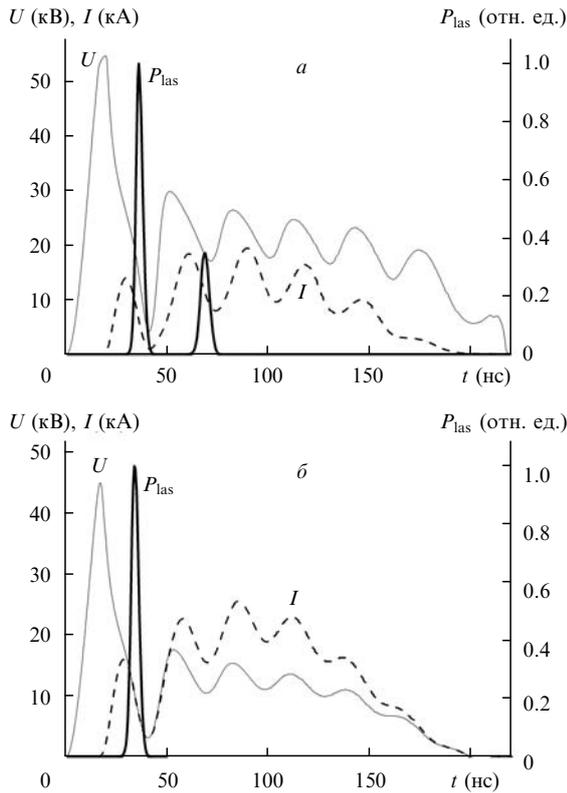


Рис.6. Расчетные формы импульсов напряжения U на разрядном промежутке, тока разряда I и лазерного излучения P_{las} в смеси N_2 – NF_3 (а) и в чистом азоте (б).

тельно в два раза ниже, чем в смеси N_2 – NF_3 , и добавление электроотрицательной примеси приводит к появлению второго импульса генерации во время квазистационарной стадии разряда. В данном режиме работы лазера достигается максимальная энергия генерации.

Увеличение напряжения во время квазистационарной стадии разряда при добавлении NF_3 объясняется поведением сечения прилипания электронов к NF_3 . Зависимость сечения от энергии электронов имеет максимум при энергии ~ 2 эВ [26]. Поскольку средняя энергия электронов в самостоятельном разряде в азоте также равна ~ 2 эВ, константа скорости прилипания электронов к NF_3 принимает максимальное значение $8 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$.

Как показали расчеты, добавление NF_3 к азоту при заданном напряжении на промежутке влияет на выходное излучение двояким образом. С одной стороны, в квазистационарной стадии разряда за счет возрастания напряжения на промежутке увеличивается скорость возбуждения верхнего лазерного уровня и соответственно растут мощность и длительность импульса генерации. С другой стороны, в двухконтурной схеме питания имеется рассогласование между волновым сопротивлением обострительного контура и нагрузкой, из-за чего наблюдаются затухающие колебания напряжения на промежутке в результате перезарядки между C_1 и C_0 . Амплитуда этих колебаний достаточна для периодического создания в активной среде азотного лазера состояния с инверсной населенностью уровней перехода $\text{C}^3 \text{ П}_u \rightarrow \text{V}^3 \text{ П}_g$. В результате в течение одного импульса накачки лазера реализуются два импульса генерации. Примерно такие же колебания напряжения наблюдаются и в чистом азоте, однако в квазистационарной стадии разряда без электроотрицательной примеси среднее значение параметра

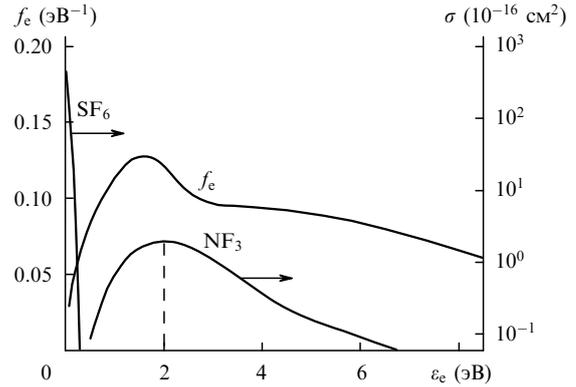


Рис.7. Функции распределения электронов по энергиям в азоте при $E/p = 60 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ и сечения σ прилипания электронов к молекулам NF_3 и SF_6 .

$E/p < 30 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ мало для получения инверсной населенности.

Другие электроотрицательные газы с большим коэффициентом прилипания, такие как SF_6 и F_2 , имеют максимумы сечений в диапазоне энергий электронов 300–500 К [27]. Эти максимумы далеки от средней энергии электронов в самостоятельном разряде в азоте, поэтому константы скоростей прилипания электронов к SF_6 и F_2 в условиях самостоятельного разряда составляют 10^{-9} – $3 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$, а напряжение на плазме повышается на 30%–40%. Такой рост напряжения недостаточен для появления лазерной генерации в квазистационарной стадии разряда. Функции распределения электронов по энергиям в смеси $\text{N}_2:\text{NF}_3 = 25:1$ (при $p = 78 \text{ Тор}$ и $U_0 = 35 \text{ кВ}$) и сечения прилипания электронов к молекулам NF_3 и SF_6 показаны на рис.7. Вертикальной штриховой линией отмечена средняя энергия электронов в разряде. Видно, что лишь небольшая часть низкоэнергетичных электронов может участвовать в процессах прилипания электронов к SF_6 , в то время как максимум сечения NF_3 довольно точно совпадает со средней энергией электронов T_e . Тем не менее режим излучения азотного лазера с двумя пиками генерации возможен и с SF_6 при его концентрации $\sim 50\%$. На рис.8 показан пример такого режима для смеси $\text{N}_2:\text{SF}_6 = 12:12 \text{ Тор}$.

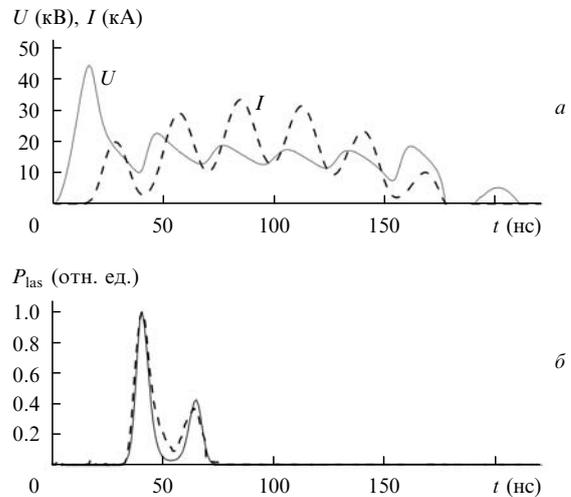


Рис.8. Рассчитанные формы импульсов напряжения на разрядном промежутке и тока разряда (а), а также форма рассчитанного (сплошная кривая) и измеренного (штриховая кривая) лазерных импульсов (б) в смеси $\text{N}_2:\text{SF}_6 = 12:12 \text{ Тор}$.

В ходе численных расчетов было обнаружено очень сильное влияние на характеристики выходного излучения лазера практически всех начальных параметров эксперимента: зарядного напряжения, параметров элементов схемы питания, начальной концентрации электронов, создаваемой системой предьонизации, геометрии электродов и состава смеси. Рассмотрим более подробно влияние давления смеси N_2-NF_3 на лазерные параметры. Следует отметить, что конечный эффект влияния изменения давления смеси на выход когерентного излучения далеко не очевиден, поскольку, например, уменьшение давления приводит к увеличению параметра E/p (давление падает, а пробивное напряжение существенно не изменяется) и скорости возбуждения верхнего лазерного уровня. Но, с другой стороны, из-за уменьшения давления азота и концентрации электронов в разряде скорость возбуждения этого состояния должна уменьшаться. Для определения результата воздействия этих двух противоположных тенденций были проведены численные расчеты параметров выходного лазерного излучения в диапазоне давлений 15–31 Тор смеси N_2-NF_3 , которые достаточно хорошо совпали с данными эксперимента (рис.9). При этом выходная энергия излучения снижается с уменьшением давления смеси, т. к. в этом случае скорость возбуждения верхнего уровня лазерного перехода, в конечном счете, падает. Таким образом, в результате изменения давления преобладает вторая из двух противоположных тенденций. Кроме того, при низком давлении (в данной работе – 15 Тор) было обнаружено слияние двух пиков лазерного импульса в один импульс излучения длительностью ~ 40 нс, в то время как в обыч-

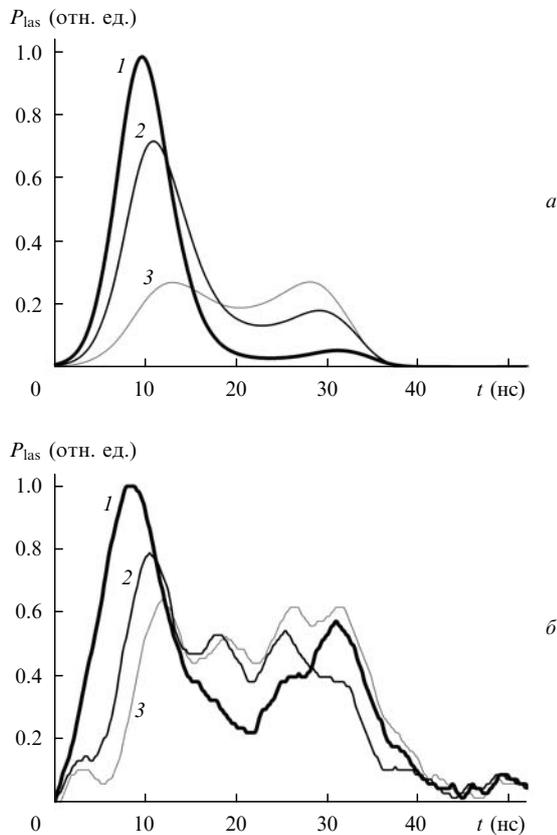


Рис.9. Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости формы импульса лазерного излучения при давлениях смеси $N_2:NF_3 = 30:1$ 31 (1) 21 (2) и 15 Тор (3).

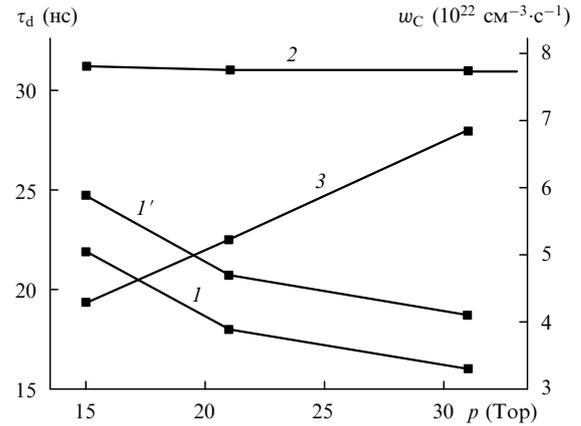


Рис.10. Время появления первого (1, 1') и второго (2) пиков лазерного излучения в зависимости от давления смеси $N_2:NF_3 = 30:1$; 3 – скорость возбуждения верхнего лазерного уровня (1, 2 – численный расчет, 1' – оценка по формуле (7)).

ных режимах работы азотного лазера длительность импульса генерации, как правило, составляет 10 нс и менее [1–10].

Для выяснения причин этого различия были проведены численные расчеты скоростей возбуждения верхнего и нижнего лазерных уровней, их инверсии населенностей и характерного времени эволюции концентрации фотонов в резонаторе. Часть полученных данных, необходимых для интерпретации указанного эффекта, представлена на рис.10. Видно, что положение второго пика лазерного излучения во времени изменяется мало, в то время как первый пик запаздывает на 6 нс при $p = 15$ Тор по сравнению с тем же пиком при давлении 30 Тор. Поскольку ширины пиков излучения по основанию составляют 16 нс, происходит их наложение друг на друга и формирование широкого одиночного импульса в виде трапеции общей длительностью 40 нс. Физическая же интерпретация эффекта состоит в том, что в результате задержки первого пика лазерной генерации его вершина совмещается со следующим импульсом накачки верхнего лазерного уровня, что обеспечивает поддержание режима генерации в течение длительного времени.

Из расчетов следует, что сдвиг первого импульса излучения на 6 нс является прямым следствием уменьшения как скорости возбуждения верхнего электронного состояния C^3P_u , так и инверсии населенностей уровней лазерного перехода. Вторая причина связана с медленной эволюцией плотности фотонов в оптическом резонаторе при формировании разряда в начале импульса накачки. Начальная плотность фотонов в резонаторе на стадии формирования разряда мала, и время ее нарастания составляет 10–20 нс. Поскольку эволюция фотонов подчиняется закону, близкому к экспоненциальному, даже небольшое уменьшение инверсии лазерных уровней приводит к заметной задержке первого импульса генерации. После окончания процессов формирования разряда и установления квазистационарных концентраций возбужденных молекул этот эффект не так заметен. Поэтому смещение второго пика в импульсе генерации мало. Этот вывод подтверждает приближенная оценка запаздывания импульса генерации по формуле

$$\tau_d = \ln \left(\frac{n_{phm}}{n_{ph0}} \right) \left(\frac{c}{L} \right)^{-1} \left[\sigma n l_a + \frac{\ln(r_1 r_2)}{2} \right]^{-1}, \quad (7)$$

где n_{ph0} и n_{phm} – начальная и максимальная плотности фотонов в резонаторе; \bar{n} – среднее значение разности $n_C - n_B$ в рассматриваемом промежутке времени τ_d . Формулу (7) можно получить из уравнения (6), если считать, что $n = \text{const}$. Значения \bar{n} были получены из расчета. Численные значения времени задержки первого импульса генерации, полученные по формуле (7), отличаются от результатов численного моделирования, но обе кривые близки по форме. Поэтому смещение τ_d первого пика генерации при изменении давления в обоих случаях примерно одинаково.

6. Заключение

Проведено экспериментальное исследование и численное моделирование работы азотного лазера с накачкой поперечным разрядом. Создана теоретическая модель лазера на смеси азота с электроотрицательными газами, позволяющая рассчитывать параметры лазерного излучения на переходе $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$ при добавлении к азоту электроотрицательных газов NF_3 и SF_6 и прогнозировать условия получения максимальной энергии излучения.

Экспериментально и методом численного моделирования исследованы характеристики генерации в смесях $N_2 - NF_3$ и $N_2 - SF_6$. Показано, что в таких смесях достигается максимальная энергия излучения азотного лазера и реализуется режим работы с несколькими импульсами излучения (обычно двумя). При этом второй импульс генерации появляется в установившейся, квазистационарной стадии разряда. Причиной появления второго пика является повышение напряжения в квазистационарной стадии разряда за счет прилипания электронов к электроотрицательным молекулам и достаточно большая длительность импульса накачки (~ 100 нс).

При прочих равных условиях уменьшение давления смеси приводит к увеличению запаздывания первого пика генерации азотного лазера по сравнению со вторым. При этом происходит совмещение обоих пиков генерации таким образом, что в течение импульса накачки формируется один импульс лазерного излучения длительно-стью до 40–50 нс.

Работа поддержана МНТЦ, проект № 2596.

1. Levatter J.I., Lin S.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 703 (1974).
2. Suchard S.I., Galvan L., Sutton D.G. *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 521 (1975).
3. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **46**, 2202 (1976).
4. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G.A. *Appl. Phys. A: Mater. Sci.&Proc.*, **23**, 341 (1980).
5. Armandillo E., Kearsley A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 611 (1982).
6. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 161 (1990).
7. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Верховский В.С. *Электронная техника. Лазерная техника и оптоэлектроника*, вып.1 (57), 58 (1991).
8. Tzolov V.P., Grozdanov K.A., Atanasov P.A. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1210 (1994).
9. Аполлонов В.В., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 483 (1997).
10. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 489 (2001).
11. Алексеев С.Б., Бакшт Е.Х., Костыря И.Д., Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 1033 (2004).
12. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. *Оптика атмосферы и океана*, **19**, 178 (2006).
13. Ali A.W., Kolb A.C., Anderson A.D. *Appl. Opt.*, **6**, 2115 (1967).
14. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **2**, 2047 (1975).
15. Makuchovsky J., Pokora L. *Optica Applicata*, **23**, 113 (1993).
16. Makuchovsky J., Pokora L. *Optica Applicata*, **23**, 131 (1993).
17. Makuchovsky J., Pokora L. *Optica Applicata*, **23**, 217 (1993).
18. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А. *Квантовая электроника*, **36**, 403 (2006).
19. Sanz F.E., Perez J.M.G. *Appl. Phys. B*, **52**, 42 (1991).
20. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. III*. Под ред. В.Е. Форгова (М.: Наука, 2000. с. 263).
21. Itikawa Y., Hayashi M., Ichimura A., et al. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **15**, 985 (1986).
22. Калужная А.Г., Рябцев А.В., Шедрин А.И. *ЖТФ*, **73**, 42 (2003).
23. Herron J.T. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **28**, 1453 (1999).
24. *Химия плазмы*. Под ред. Б.М. Смирнова (М.: Энергоатомиздат, 1983, вып. 10, с. 108).
25. Косый И.А., Костинский А.Ю., Матвеев А.А., Силаков В.П. *Труды ИОФАН*, **47**, 37 (1994).
26. Nandi D., Rangwala S.A., Kumar S.V.K., Krishnakumar E. *Int. J. Mass Spectrometry*, **205**, 111 (2001).
27. Christophorou L.G., Olthoff J.K. *Int. J. Mass Spectrometry*, **205**, 27 (2001).