

О неоднородности плотности мощности излучения в выходном пучке азотного лазера

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

Экспериментально исследовано распределение плотности мощности УФ излучения в полосе $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ ($\lambda = 337.1$ нм) по сечению выходного пучка азотного лазера с накачкой поперечным разрядом. Показано, что при давлениях азота в десятки торр и больших длительностях импульса генерации плотность мощности излучения из прикатодной области разряда меньше, чем из остальной части разрядного промежутка. Проведен теоретический анализ распределения потенциала в прикатодной области разряда. Показано, что длина прикатодной области с малой плотностью мощности излучения, наблюдаемой в эксперименте, примерно соответствует длине темного фарадеева пространства в аномальном тлеющем разряде.

Ключевые слова: *УФ азотный лазер, распределение плотности мощности излучения по сечению выходного пучка, накачка поперечным разрядом, моделирование прикатодной области разряда.*

1. Введение

Для практического применения излучения разных лазеров очень важно иметь однородное распределение плотности мощности излучения по сечению выходного пучка. На это распределение влияют различные факторы (геометрия активного объема, способ и система накачки, состав активной среды, тип резонатора, длительность импульса возбуждения и т. д.). Кроме того, распределение напряженности электрического поля по длине межэлектродного промежутка при тлеющем разряде (нормальном и аномальном), который наиболее часто используется для возбуждения различных лазеров, не однородно [1]. При накачке импульсных газовых лазеров поперечным разрядом влияние неоднородности распределения напряженности электрического поля по межэлектродному промежутку на свойства активной среды особенно заметно при низких давлениях лазерной смеси, причем в некоторых случаях используется увеличение электрического поля у катода для формирования пучка электронов [2].

Поскольку квазистационарное распределение напряженности электрического поля по межэлектродному промежутку устанавливается в процессе формирования тлеющего разряда за конечное время (единицы – десятки наносекунд), это также может оказывать влияние на распределение плотности мощности излучения по сечению выходного пучка при малых длительностях импульсов генерации различных лазеров. Наиболее сильно влияние неоднородности распределения напряженности электрического поля по межэлектродному промежутку должно проявляться в лазерах со сравнительно большой дли-

тельностью импульса генерации (десятки – сотни наносекунд). За это время квазистационарный тлеющий разряд со всеми его характерными областями успевает сформироваться.

Цель данной работы – исследование распределения плотности мощности излучения по сечению выходного пучка азотного УФ лазера с накачкой поперечным разрядом. Азотный лазер был выбран из-за его простоты и возможности моделирования параметров прикатодной области при разряде в азоте. Кроме того, при изменении давления азота и условий его возбуждения можно получать при накачке поперечным разрядом импульсы излучения различной длительности, которая для смеси $N_2 - NF_3$ может превышать 100 нс [3].

2. Экспериментальная установка и методики измерений

В экспериментах использовался лазер с возбуждением поперечным разрядом и искровой предыонизацией, подробно описанный в [4, 5]. У потенциального электрода располагались 72 острых электрода искровой подсветки. Для накачки применялся универсальный генератор, позволяющий осуществлять возбуждение как от индуктивного, так и от емкостного накопителя энергии. В данных экспериментах использовался генератор с емкостным накопителем энергии. Резонатор был образован зеркалом с алюминиевым покрытием и кварцевой пластинкой. Лазер имел активный объем $4 \times 2 \times 72$ см (длина разрядного промежутка $d = 4$ см). Ширина разрядной области зависела от давления азота и напряжения генератора.

Энергия излучения азотного лазера измерялась калориметром OPHIR с сенсорными головками FL-250A и PE-50BB. Для регистрации импульса излучения использовался вакуумный фотодиод ФЭК-22 СПУ, на который при помощи светоделительной пластинки направлялась часть лазерного излучения. Спектр излучения лазера регистрировался посредством спектрометра StellarNet

А.В.Козырев, А.Н.Панченко, 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

Поступила в редакцию 7 августа 2007 г., после доработки – 16 ноября 2007 г.

ЕРР2000-C25 с разрешением 0.75 нм. Для работы фото диода и спектрометра в линейном режиме излучение на их входе ослаблялось последовательностью металлических сеток.

Распределение плотности мощности излучения по сечению пучка определялось двумя способами. Цифровым фотоаппаратом регистрировались «автографы» возбуждаемой лазерным излучением люминесценции экранов из белой бумаги типа SvetoCopy. При необходимости излучение ослаблялось светофильтром НС-7 или НС-8. Затем делались денситограммы полученных фотографий. Одновременно фотодиодом ФЭК-22 СПУ измерялась мощность излучения, прошедшего через отверстие диаметром 2 мм. Диафрагма перемещалась в направлении от катода к аноду с шагом 2 мм.

В экспериментах также регистрировались ток разряда и напряжение на электродах лазера с помощью пояса Роговского и делителя напряжения. Электрические сигналы подавались на осциллограф TDS-220 или TDS-224.

3. Экспериментальные результаты

На рис.1 показаны распределения плотности мощности излучения УФ азотного лазера в направлении от анода к катоду при положительной полярности напряжения на потенциальном электроде и различных давлениях чистого азота, а также в смеси азота с NF_3 . На рис.2 приведены осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и генерации азотного лазера. При давлении азота 87 Тор длительность импульса излучения на полувысоте составила ~ 6 нс, а его запаздывание относительно импульса тока разряда было равно ~ 12 нс. В таких условиях распределение плотности мощности излучения по длине разрядного промежутка относительно равномерное и мощное лазерное излучение регистрируется у обоих электродов. В этом случае распределения интенсивности излучения, полученные разными способами, различаются не более чем на 20%. С уменьшением давления азота до 12 Тор длительность импульса излучения на полувысоте увеличилась до ~ 17 нс, а его запаздывание относительно импульса тока разряда возросло до ~ 29 нс. При этом ширины разрядной области и лазерного пучка увеличились и у катода появилась область с существенно меньшей плотностью мощности генерации. При добавке NF_3 (2 Тор) к азоту (12 Тор) длительность импульса излучения увеличилась до ~ 26 нс, а запаздывание импульса излучения относительно импульса тока разряда уменьшилось до ~ 24 нс. Ширины разрядной области и лазерного пучка при этом существенно не изменились по сравнению с генерацией при давлении азота 12 Тор, а длина прикатодной области, где наблюдается быстрое падение мощности излучения, уменьшилась. Добавки NF_3 к азоту приводили также к изменению спектра генерации. В чистом азоте наблюдалось излучение только на длине волны $\lambda = 337.1$ нм. В смесях $\text{N}_2 - \text{NF}_3$ появились дополнительные длины генерации на $\lambda = 316.0$ и 357.7 нм.

При отрицательной полярности импульса напряжения на потенциальном электроде и давлении азота 12 Тор форма разряда изменилась. Разряд начал замыкаться на острийные электроды подсветки. При давлении азота 87 Тор пробой на острийные электроды не был замечен и распределение плотности мощности излучения у обоих электродов было примерно одинаковым, как и при по-

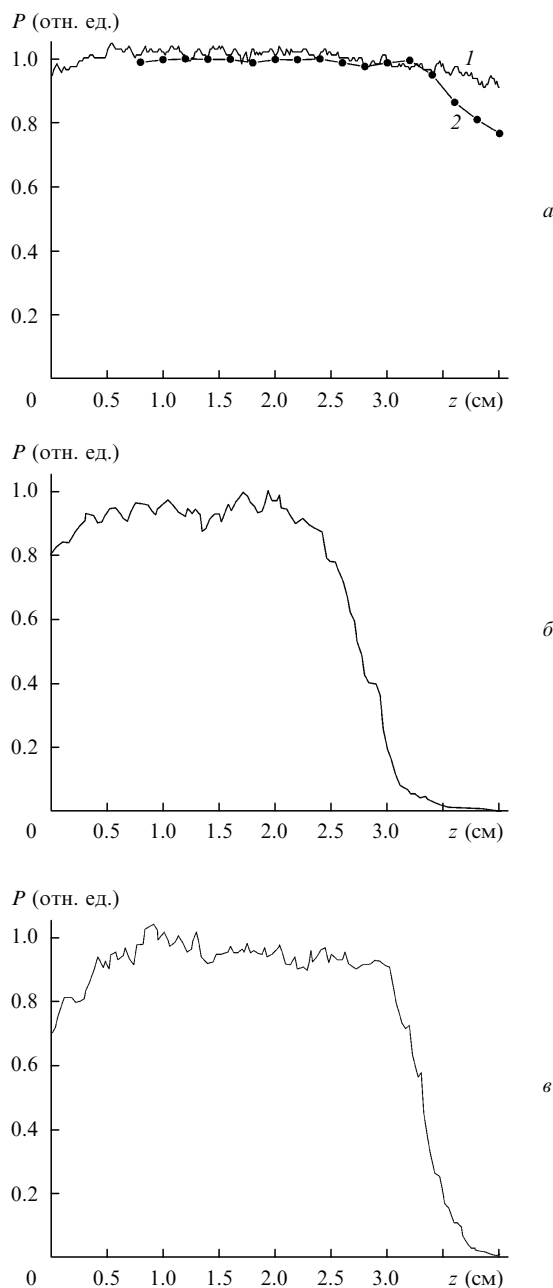


Рис.1. Распределения плотности мощности излучения азотного лазера P вдоль разрядного промежутка, полученные из фотографий «автографов» люминесценции для давлений чистого азота $p = 87$ (1, а) и 12 Тор (б) и для смеси $\text{N}_2:\text{NF}_3 = 12:2$ Тор (в), а также при сканировании диафрагмы в случае чистого азота при $p = 87$ Тор (2, а). Использовались фильтры НС-8 (1, а) и НС-7 (б, в). Точка $z = 0$ соответствует положению анода, $z = 4$ см – положению катода.

ложительной полярности потенциального электрода. Длительность импульса излучения на полувысоте также составила ~ 6 нс.

В смеси азота (12 Тор) с NF_3 (2 Тор), так же как и при положительной полярности импульса напряжения на потенциальном электроде, у катода регистрировалась область с меньшей плотностью мощности излучения. Однако длина этой области уменьшилась, а плотность мощности излучения в ней увеличилась. Такое поведение плотности мощности излучения при смене полярности можно связать с влиянием на характер разряда острийных электродов подсветки, расположенных у потенци-

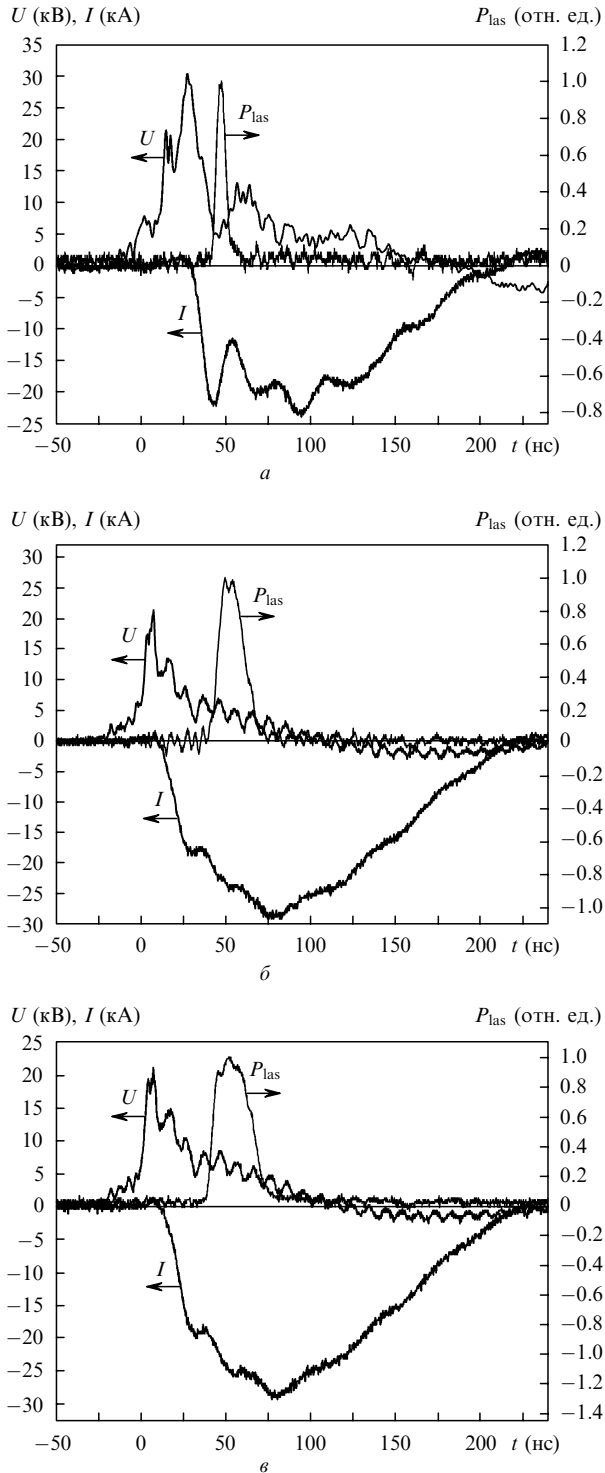


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда I и мощности генерации P_{las} при разрядном напряжении генератора накачки $U_0 = 30$ кВ, давлении азота $p = 87$ (а) и 12 Торр (б), а также для смеси $N_2:NF_3 = 12:2$ Торр (в).

ального электрода. Отметим, что разряд между острыми электродами и потенциальным электродом является источником не только УФ и ВУФ, но и рентгеновского излучения [5].

Дополнительно разряд исследовался в разрядной камере со сферическим потенциальным электродом (катодом) диаметром 24 мм и плоским анодом при межэлектродных расстояниях 6 и 12 мм. На электроды подавались импульсы напряжения от генератора с волновым сопро-

тивлением 50 Ом и напряжением холостого хода 10–25 кВ. Диаметр разрядной области в этих экспериментах не превышал 20 мм, и порог генерации не достигался при всех давлениях азота. Эксперименты показали, что при давлении азота в десятки торр и длительности импульса тока разряда 25–90 нс вблизи катода хорошо видно темное фарадеево пространство, а при давлении ~ 90 Торр и более оно практически не заметно. Наибольшая длина темного фарадеева пространства, как это хорошо известно [1], реализуется при малых давлениях азота и других газов. Таким образом, в данных условиях уменьшение плотности мощности УФ лазерного излучения у катода при давлении азота в десятки торр обусловлено, в первую очередь, увеличением размеров темного фарадеева пространства.

4. Теоретические оценки распределения потенциала в разрядном промежутке

Попробуем определить тип разряда в азотном лазере в момент достижения максимальной мощности когерентного излучения, когда в соответствии с рис.2,б при давлении газа $p = 12$ Торр ток разряда составляет ~ 24 кА, а напряжение на разрядном промежутке $U \simeq 4$ кВ. Плотность тока в разряде $j \simeq 160$ А/см², что соответствует приведенной плотности $j/p^2 \simeq 1$ А·см⁻²·Торр⁻². Это позволяет отнести режим наблюдаемого разряда к глубоко аномальному, т. к. в азоте нормальный разряд имеет существенно меньшую приведенную плотность: $j/p^2 \simeq 4 \times 10^{-4}$ А·см⁻²·Торр⁻² [6]. Исходя из этого факта, проведем оценки возможного распределения электрического поля в разрядном промежутке для объяснения наблюдаемой пониженной мощности накачки активной среды азотного лазера в прикатодной области. Для описания поведения тлеющего разряда в прикатодной области используем стационарную теорию, представленную в [7]. В этой работе показано, что падение потенциала в прикатодной области происходит в слое объемного заряда и в промежуточном слое квазинейтральной плазмы с сильным полем.

Исходными данными для расчета параметров тлеющего разряда в [7] являлись приведенная подвижность ионов μ_i , а также коэффициенты A и B , аппроксимирующие первый коэффициент ионизации Таунсенда α . В результате было получено:

$$v_i = \mu_i \frac{E}{p}, \quad \frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right), \quad (1)$$

где v_i – дрейфовая скорость ионов; E – напряженность электрического поля.

В глубоко аномальном режиме падение потенциала в промежуточном слое должно быть сравнительно небольшим по сравнению с прикатодным падением в слое объемного заряда. Поэтому приведем выражения, позволяющие рассчитать приведенную плотность тока, ширину области объемного заряда и прикатодное падение потенциала:

$$J(y_c) \approx y_c^2 E_3(1/y_c) \left(\ln \frac{1+\gamma}{\gamma} - \frac{1}{1+\gamma} \right)^{-1},$$

$$a_c = \frac{1+\gamma}{E_3(1/y_c)} \left(\ln \frac{1+\gamma}{\gamma} - \frac{1}{1+\gamma} \right), \quad (2)$$

$$u_c = \frac{1}{2} y_c a_c = \frac{y_c^3 (1 + \gamma)}{2J(y_c)},$$

где $E_3(1/y_c)$ – интегральная показательная функция третьего порядка; γ – коэффициент ион-электронной эмиссии. Здесь используются безразмерные переменные

$$J = \frac{j/p^2}{\epsilon_0 A B^2 \mu_i}, \quad a_c = A p l_c, \quad u_c = \frac{A}{B} U_c, \quad y_c = \frac{E_c/p}{B} \quad (3)$$

– приведенная плотность тока, ширина слоя объемного заряда, прикатодное падение напряжения и приведенная напряженность поля на поверхности катода соответственно; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для азота $A = 12 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$, $B = 342 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$, $\mu_i = 2.5 \times 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{Тор} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [1], коэффициент γ с учетом кинетического механизма вырывания электронов ионами целесообразно взять равным ~ 0.2 . С использованием этих величин получаем безразмерную приведенную плотность тока в исследуемом разряде $J \simeq 3.2 \times 10^3 \gg 1$. Из первого равенства (2) определим безразмерное приведенное поле на катоде: $y_c \simeq 80$, а из второго вычислим безразмерную ширину слоя: $a_c = 2.0$. Тогда из последнего равенства (2) с учетом (3) получим размерную оценку прикатодного падения потенциала: $U_c \simeq 2.3 \text{ кВ}$. Эта оценка хорошо согласуется с результатами экспериментов Гюнтершульце [8] и с выводами теорий аномального тлеющего разряда [1].

Надо отметить, что в указанном режиме горения разряда прикатодное падение напряжения U_c сильно зависит от эффективного коэффициента γ . Мы положили $\gamma = 0.2$, но если взять его минимальное значение для разряда в азоте, равное ~ 0.01 (оно характеризует так называемое потенциальное вырывание электронов ионами) [9], то оценка прикатодного падения потенциала повысится до $\sim 10 \text{ кВ}$. Поэтому оценку $U_c \simeq 2.3 \text{ кВ}$ надо воспринимать как ориентировочную.

В квазиэлектронной фазе горения тлеющего разряда в азоте напряженность электрического поля E_{st} в положительном столбе длиной d_{glow} примерно соответствует половине статического пробивного напряжения, что для наших условий дает следующую оценку падения напряжения на столбе разряда: $U_{glow} \simeq 1/2 (E_{st}/p) p d_{glow} = 700 \text{ В}$. Таким образом, оценка общего падения потенциала на разрядном промежутке U_d составляет $\sim 3 \text{ кВ}$, что неплохо согласуется с наблюдаемыми значениями ($\sim 4 \text{ кВ}$), особенно учитывая грубость используемой модели для описания глубоко аномального разряда. Эти оценки показывают, что большая часть вводимой мощности выделяется в прикатодной области разряда и не дает вклада в накачку активной среды лазера.

Ширина слоя объемного заряда получается довольно малой: $l_c = a_c/(Ap) \approx 0.01 \text{ см}$. По этой причине наблюдаемая на «автографах» лазерного излучения темная область вблизи катода длиной $\sim 0.5 \text{ см}$ не может быть интерпретирована как темная область объемного заряда. На наш взгляд, эта область соответствует некоторому аналогу фарадеева темного пространства стационарного тлеющего разряда, в котором напряженность электрического поля близка к нулю. Ее длину в разряде довольно трудно оценить из общих теоретических представлений, но она обычно на порядок больше ширины слоя объемного заряда.

В качестве количественного ориентира можно взять длину релаксации быстрого электрона с начальной энергией $\sim 2.5 \text{ кэВ}$ в газе соответствующего давления, хотя в тлеющем разряде она скорее соответствует длине области отрицательного тлеющего свечения, чем длине фарадеева темного пространства. Длину пробега L_c сравнительно быстрых электронов с начальной энергией W_0 в газе можно оценить по формуле

$$L_c \sim \frac{W_0}{W_{ei}} \frac{1}{\sigma_{ion} n_{mol}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{ion} = 5 \times 10^{-17} \text{ см}^2$ – эффективное сечение, характеризующее ионизацию атомов и молекул азота быстрыми электронами [10]; n_{mol} – суммарная концентрация молекул и атомов азота; $W_{ei} \simeq 35 \text{ эВ}$ – средняя энергия образования электрон-ионной пары в азоте. Оценка (4) дает для $E_0 = 2.3 \text{ кэВ}$ и $p = 12 \text{ Тор}$ длину пробега $L_c < 3 \text{ см}$. Однако это оценка полного пробега, а реальный пробег за счет рассеяния электрона (так называемый экстраполированный пробег) может быть примерно на порядок меньше. Если считать, что при энергиях электрона в несколько килоэлектронвольт транспортное сечение рассеяния σ^* и сечение неупругих столкновений примерно одного порядка, то оценка экстраполированной длины пробега R_c может быть сделана на основе соотношения

$$R_c \sim \frac{1}{n_{mol}} \left(\frac{W_0/W_{ei}}{\sigma_{ion} \sigma^*} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{W_0}{W_{ei}} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma_{ion} n_{mol}}. \quad (5)$$

Расчет по формуле (5) дает для наших условий $R_c \sim 4 \text{ мм}$, что находится в хорошем согласии с наблюдаемой длиной темной области на рис.1.

Аналогичный расчет можно провести для разряда при давлении $p = 87 \text{ Тор}$. Для этого разряда осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и генерации приведены на рис.2,а, где в момент достижения максимума мощности излучения ток разряда $I \simeq 25 \text{ кА}$, напряжение на разрядном промежутке $U \simeq 5 - 7 \text{ кВ}$, $j/p^2 \simeq 2 \times 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{Тор}^{-2}$ (приведенная плотность тока уже приближается к приведенной плотности тока нормального тлеющего разряда). Расчет по формулам (2) и (3) дает прикатодное падение потенциала $U_c \simeq 400 \text{ В}$ и падение потенциала на положительном столбе разряда $U_{glow} = 6 \text{ кВ}$. Таким образом, при давлении азота 87 Тор основное падение потенциала происходит в области столба квазинейтральной плазмы, а в прикатодной области падение потенциала незначительно. Естественно, что и длина темного фарадеева пространства, оцененная по формуле (5), оказывается равной $\sim 0.2 \text{ мм}$.

С учетом сказанного выше можно предположить, что прикатодная область, в которой имеет место пониженная мощность накачки при низких давлениях, является областью с пониженной напряженностью поля, характерной для отрицательного тлеющего свечения и фарадеева темного пространства в тлеющем разряде.

5. Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследований распределения плотности мощности излучения по сечению выходного пучка азотного УФ лазера с накачкой

поперечным разрядом. Показано, что при малой длительности импульса излучения и повышенных давлениях в этом лазере распределения плотности мощности излучения у катода и анода существенно не различаются. При уменьшении рабочего давления, что в условиях данного эксперимента приводило к увеличению длительности импульса излучения и времени его запаздывания относительно импульса тока, у катода появляется область с меньшей плотностью мощности излучения. Длина этой области в азоте, как показывают расчеты, примерно соответствует длине темного фарадеева пространства в аномальном тлеющем разряде. Особенности темного фарадеева пространства в аномальном тлеющем разряде являются малая напряженность электрического поля в нем по сравнению с напряженностью в области положительного столба и то, что основной энерговклад в нем дают быстрые электроны с энергией в сотни электронвольт. Как было показано ранее, и при малой напряженности электрического поля [11], и при возбуждении азота электронным пучком в отсутствие буферного газа [12] порог генерации на второй положительной системе азота не достигается. Добавки NF_3 к азоту приводят к уменьшению длины темной области у катода, что можно связать с дополнительными потерями энергии быстрых

электронов при их столкновениях с молекулами тяжелого газа NF_3 .

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2596).

1. Грановский В.Л. *Электрический ток в газе. Установившийся ток* (М.: Наука, 1971).
2. Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. *Ионные лазеры на парах металлов* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
3. Коновалов И.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А. *Квантовая электроника*, **37**, 623 (2007).
4. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
5. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А. *Квантовая электроника*, **37**, 103 (2007).
6. Boyle W.S., Haworth F.E. *Phys. Rev.*, **101**, 935 (1956).
7. Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Королев Ю.Д. *Физика плазмы*, **32**, 1027 (2006).
8. Günterschulze A. *Z. Phys.*, **49**, 358 (1928); **59**, 433 (1930).
9. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
10. *Физические величины. Справочник*. Под ред. И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова (М.: Наука, 1991).
11. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **2**, 2047 (1975).
12. Держиев В.И., Лосев В.Ф., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Оптика и спектроскопия*, **60**, 811 (1986).