

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, V. S. Kobzeva, O. V. Kobzev, The polarization of atomic states of helium in nanosecond discharge with slot cathode, *TVT*, 2010, Volume 48, Issue 2, 163–168

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 44.192.67.10

November 8, 2024, 01:47:28



ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПЛАЗМЫ

УДК 537.521

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ ГЕЛИЯ  
В НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ С ЩЕЛЕВЫМ КАТОДОМ

© 2010 г. Н. А. Ашурбеков, К. О. Иминов, В. С. Кобзева, О. В. Кобзев

*Дагестанский государственный университет, г. Махачкала*

Поступила в редакцию 13.01.2009 г.

Экспериментально исследованы оптические и поляризационные характеристики спонтанного излучения поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом. Экспериментально установлено, что спонтанное излучение атомов гелия имеет частичную линейную поляризацию. Предполагается, что частичная линейная поляризация спонтанного излучения разряда обусловлена анизотропией процессов электронного возбуждения атомов.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с высокой эффективностью использования плазменно-пучковых разрядов (ППР) в качестве активных сред лазеров [1, 2], а также для получения сильноточных электронных и ионных пучков в различных инжекторах [3, 4] в последние годы значительно возрос интерес к их исследованию. К ППР относится и наносекундный разряд с щелевым катодом при средних давлениях газа, где в процессе электрического пробоя в области катодного падения потенциала формируются пучки быстрых электронов [5–7]. Функция распределения электронов по энергиям в таком разряде формируется в присутствии сильного электрического поля и имеет характерный спектр из-за наличия группы вторичных электронов и пучка быстрых электронов с энергией  $eU_k$ , где  $U_k$  – значение катодного падения потенциала. Наличие в разрядном промежутке с щелевым катодом сильного неоднородного электрического поля и пучка быстрых электронов, эффективно ионизирующих и возбуждающих атомы рабочего газа, приводит к образованию неравновесной и нестационарной плазмы. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что такая плазма обладает анизотропными структурными свойствами [8, 9]. Известно, что анизотропные свойства плазмы находят свое непосредственное отражение в поляризационных эффектах как ансамблей атомных частиц, так и линейчатого оптического излучения [10, 11]. Информацию об анизотропных структурных свойствах неравновесной и нестационарной плазмы наносекундных ППР с щелевым катодом могут дать поляризационные исследования оптического излучения этих разрядов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование поляризации атомных состояний гелия в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом и установление механизмов,

приводящих к поляризации спонтанного излучения в плазме.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый разряд происходил между двумя алюминиевыми электродами длиной 40 см и расстоянием между ними 0.6 см, расположенными в цилиндрической трубке из молибденового стекла диаметром 5 см и длиной 50 см. Катод представлял собой круглый стержень диаметром 1 см с прорезом вдоль него шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см. Анод имел плоскую форму в виде прямоугольной пластины шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Выбор такой формы полого катода и расстояния между электродами обусловлены требованиями устойчивого горения объемного разряда при средних давлениях газа, что является необходимым условием при накачке газовых лазеров. Данная разрядная система позволяла ограничить область разряда с помощью диэлектрических пластинок, установленных вдоль электродов. В этом случае область разряда занимала (включая полость катода) ограниченный объем шириной 1.2 см, высотой 0.2 см и длиной 40 см. Подробное описание экспериментальной установки и генератора импульсов напряжения приведено в [5].

Измерение тока разряда и напряжения на разрядном промежутке производились с помощью омического шунта и калиброванного делителя напряжения. Картины пространственно-временного распределения оптического излучения разряда регистрировались с помощью ПЗС-матрицы и ФЭУ, подключенных к компьютеру. Для исследования временного хода интегральной интенсивности оптического излучения разряда, выделяемого с помощью специальной диафрагмы, из различных областей по центру разрядного промежутка и измерения интенсивных профилей спек-

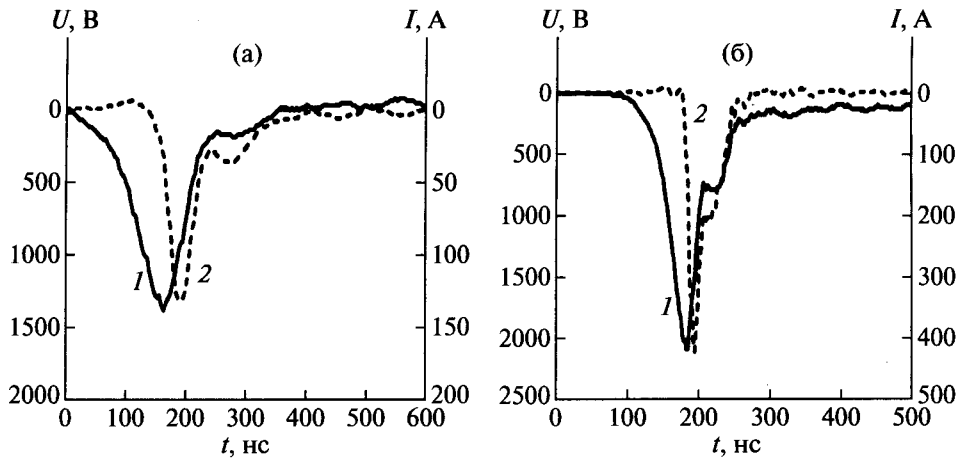


Рис. 1. Осциллограммы напряжения горения — 1 и разрядного тока — 2 при  $U_0 = 3$  кВ и  $p = 20$  Тор: (а) — открытый разряд, (б) — ограниченный разряд.

тральных линий использовался монохроматор МДР-3 и ФЭУ, согласованный с помощью эмиттерного повторителя на СВЧ-транзисторах с 50-омным кабелем. В качестве регистрирующих приборов использовались двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к персональному компьютеру, и осциллограф Tektronix TDS3032B. При исследовании состояния поляризации оптического излучения на входе монохроматора устанавливался поляризатор. Известно, что поляризатор имеет различные характеристики поглощения для параллельной и перпендикулярной составляющих излучения спектральных линий. Кроме того, отражающие поверхности оптической схемы также влияют на степень поляризации излучения. Поэтому при определении степени поляризации вводились соответствующие поправки, полученные при градуировке поляризатора и установке по неполяризованному излучению от лампы накаливания для каждой исследуемой спектральной линии в отдельности. Окончательное значение степени поляризации в максимумах интенсивностей спектральных линий определялось усреднением результатов по большому числу измерений. При измерении профилей интенсивных спектральных линий особое внимание уделялось отклонению от линейности режима работы ФЭУ с усилителем. Погрешности, связанные с отклонением от линейного режима, не превышали 1%. Общая погрешность измерений, обусловленная флуктуациями интенсивности излучения, составляла величину порядка 10%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Выполнены систематические экспериментальные исследования электрических, оптических, поляризационных характеристик и пространственной динамики оптического излучения

разряда в зависимости от прикладываемого к электродам напряжения ( $U_0$ ) и давления газа ( $p$ ) в разрядной камере.

Исследования показали, что осциллограммы разрядного тока ( $I_p$ ) и напряжения горения ( $U_r$ ) для открытого и ограниченного разряда, полученные при одинаковых значениях  $U_0$  и  $p$ , существенно отличаются по форме, величине и длительности. Так, при  $p = 20$  Тор и  $U_0 = 3$  кВ в открытом разряде напряжение пробоя  $U_r \approx 1300$  В и время формирования разряда  $t_{\text{ф}} \approx 160$  нс, а в ограниченном разряде  $U_r$  существенно возрастает, достигая 2100 В, и время формирования разряда уменьшается в два раза. Осциллограммы разрядного тока в обоих случаях имеют по два максимума. Величина  $I_p$  в максимумах для открытого разряда составляет 125 и 35 А, а для ограниченного разряда — 410 и 200 А соответственно. Время нарастания первого максимума тока в открытом разряде равно 50 нс, а в ограниченном разряде это время уменьшается на порядок и составляет всего 5 нс (рис. 1). Таким образом, ограничение области наносекундного разряда с шелевым катодом диэлектрическими пластинками позволяет получать узкие импульсы тока длительностью на полувисоте менее 10 нс с амплитудой до 500 А.

Систематические исследования пространственно-временной динамики формирования оптического излучения разряда в гелии в зависимости от  $U_0$  и  $p$  в обоих случаях показали, что пространственная структура и интенсивность оптического излучения в щели катода и в промежутке между электродами также зависят от  $U_0$  и  $p$ . Характерные пространственные распределения оптического излучения между электродами приведены на рис. 2. Для открытого разряда оптическое излучение заполняет весь промежуток между катодом и анодом и у выхода из щели катода наблюдается ярко

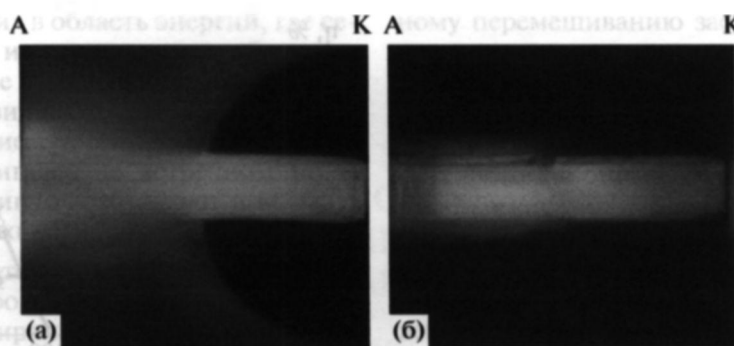


Рис. 2. Пространственное распределение оптического излучения в разрядном промежутке при  $U_0 = 3$  кВ и  $p = 20$  Тор: (а) – открытый разряд, (б) – ограниченный разряд.

светящаяся область с максимальной интенсивностью излучения (рис. 2а). Площадь светящейся области между электродами имеет сложную форму, сужаясь в центре и в дальнейшем расширяясь; на поверхности анода площадь свечения становится почти в два раза больше, чем у выхода из щели. Для ограниченного разряда интенсивность излучения у выхода из щели катода и из ограниченной области между электродами заметно выше, чем из области у основания щели катода (рис. 2б).

Экспериментальные исследования временно-го хода интегральной интенсивности оптического излучения разряда, регистрируемого с помощью специальной диафрагмы из различных точек по центру щели катода и разрядного промежутка показали, что форма импульса, интенсивность и длительность оптического излучения зависят от значений  $U_0$ ,  $p$  и расстояния от электродов. Из полученных осциллограмм интенсивности оптического излучения из области, расположенной на расстоянии 4 мм от поверхности анода в ограниченном разряде, видно, что релаксация оптического излучения имеет два характерных времени.

В этих же условиях было подробно исследовано поведение интенсивностей и степени линейной поляризации излучения ( $\eta$ ) спектральных линий HeI, соответствующих спектральным переходам  $4^1P-2^1S$  ( $\lambda = 396.5$  нм),  $4^1D-2^1P$  ( $\lambda = 492.1$  нм),  $3^1P-2^1S$  ( $\lambda = 501.6$  нм). Верхние уровни выбранных спектральных линий в основном заселяются прямым электронным ударом с основного состояния, имеют заметный эффект Штарка, и исследование их позволяет изучить пучковые свойства разрядной плазмы.

На рис. 3 приведены зависимости  $\eta$  на указанных переходах HeI от давления газа при фиксированном напряжении на электродах  $U_0 = 3$  кВ. Отметим, что здесь и далее каждая экспериментальная точка на графике определена как среднеарифметическое по большому числу измерений, проведенных в одних и тех же условиях, и все аппроксимации экспериментальных данных выполнены

методом наименьших квадратов. Из рис. 3 видно, что в исследованных условиях излучение всех указанных спектральных линий частично поляризовано, причем степень линейной поляризации излучения на разных линиях различна. При этом значение  $\eta$  для спектральной линии с длиной волны  $\lambda = 396.5$  нм в ограниченном разряде заметно меньше, чем в открытом разряде. Исследование зависимости  $\eta$  от прикладываемого напряжения  $U_0$  и давления газа  $p$  в разрядной камере показало, что для спектральных линий  $\lambda = 396.5$  нм и  $\lambda = 492.1$  нм значение  $\eta$  слабо зависит от  $U_0$  и  $p$  и примерно составляет 26% и 4% соответственно. Для спектральной линии  $\lambda = 501.6$  нм при  $U_0 = 1.5$  кВ и увеличении  $p$  от 5 до 60 Тор значение  $\eta$  уменьшается с 12% до 5% (кривая 1 на рис. 4). При постепенном увеличении  $U_0$  значение  $\eta$  для области  $p = 5-10$  Тор остается практически посто-

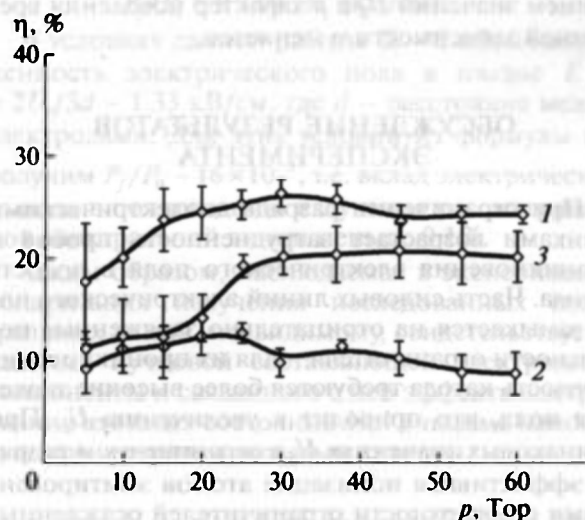


Рис. 3. Зависимости степени линейной поляризации спонтанного излучения от давления газа при  $U_0 = 3$  кВ: 1 – открытый разряд,  $\lambda = 396.5$  нм; 2 – открытый разряд,  $\lambda = 501.6$  нм; 3 – ограниченный разряд,  $\lambda = 396.5$  нм.

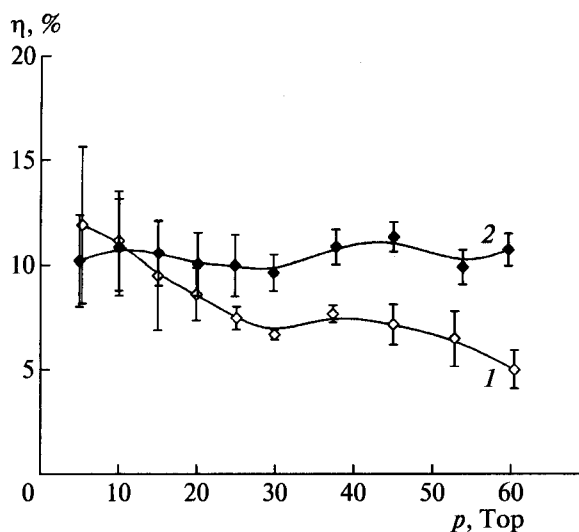


Рис. 4. Зависимость степени линейной поляризации спонтанного излучения от давления газа в открытом разряде для спектральной линии  $\lambda = 501.6$  нм: 1 —  $U_0 = 1.5$  кВ, 2 —  $U_0 = 3.5$  кВ.

янным, а для области  $p = 10\text{--}60$  Тор постепенно увеличивается и при  $U_0 = 3.5$  кВ достигает 11% и сравнивается со значением  $\eta$  при  $p = 5$  Тор (кривая 2 на рис. 4).

На рис. 5 приведены зависимости  $\eta$  от времени. Из этого рисунка видно, что степень поляризации  $\eta$  на разных стадиях разряда различна как по величине, так и по знаку. В начале и в конце импульса излучения  $\eta$  отрицательна, а в моменты времени, соответствующие максимумам интенсивности излучения спектральной линии,  $\eta$  положительна и максимальна по величине. С изменением значений  $U_0$  и  $p$  характер поведения временной зависимости  $\eta$  меняется.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При ограничении разряда диэлектрическими стенками возрастает затрудненность пробоя и проникновения электрического поля в полость катода. Часть силовых линий электрического поля замыкается на отрицательно заряженные поверхности ограничителя и для их проникновения в полость катода требуются более высокие значения поля, что приводит к увеличению  $U_r$ . При одинаковых значениях  $U_0$  в ограниченном разряде эффективная ионизация атомов эмитированными электронами и свободными электронами, запертыми в разрядном промежутке, приводит к более быстрому росту и более высоким значениям разрядного тока  $I_p$ , чем в открытом разряде (рис. 1).

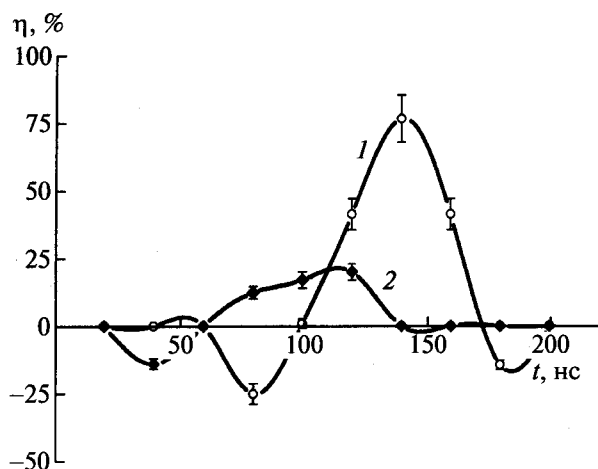


Рис. 5. Зависимости степени линейной поляризации спонтанного излучения от времени при  $U_0 = 3$  кВ и  $p = 20$  Тор для спектральной линии  $\lambda = 396.5$  нм: 1 — открытый разряд, 2 — ограниченный разряд.

Характерные особенности пространственного распределения оптического излучения между электродами связаны с особенностями релаксации энергии ускоренных электронов в разряде. Для исследованных условий длина свободного пробега электронов по отношению к неупругим процессам больше размера области катодного падения потенциала (КПП) [12]. Следовательно, электроны, эмитируемые с поверхности катода, область КПП проходят без столкновений и приобретают энергию  $\epsilon = eU_k$ . При оценке  $\epsilon$  величина КПП  $U_k$  бралась равной  $3U_r/5$ , хотя в условиях данной работы она может быть существенно больше. Длины пробега этих ускоренных электронов в плазме оценивались по формуле [13]

$$p\Lambda = 6.5 \times 10^{-4} (eU_k)^{1.54}.$$

При условиях, соответствующих рис. 2, для открытого разряда получаем  $\epsilon \approx 780$  эВ и  $\Lambda \approx 0.92$  см, а для ограниченного разряда  $\epsilon \approx 1260$  эВ и  $\Lambda \approx 1.93$  см. Оценки показывают, что часть ускоренных электронов достигает поверхности анода и характер энергетической релаксации этих электронов оказывает существенное влияние на динамику развития и структуру оптического излучения исследуемого разряда. По-видимому, наблюдаемая в эксперименте (рис. 2) максимальная яркость излучения плазмы вблизи выхода из щели в катоде объясняется двумя причинами. При колебательном движении быстрых электронов в полости катода происходит их смещение в сторону анода, что приводит к увеличению их концентрации у выхода из щели и к дополнительной ионизации. Одновременно происходит релаксация быстрых электронов по энергии за счет неупругих столк-

новений и смещение их в область энергий, где сечения возбуждения и ионизации имеют большие значения. Увеличение площади свечения у поверхности анода, по-видимому, связано с упругим и неупругим отражением от анода быстрых электронов, которые, двигаясь во встречном поле, тормозятся и эффективно возбуждают и ионизируют атомы газа у поверхности анода.

Максимальная интенсивность излучения из области между электродами в ограниченном разряде объясняется запирающим пристеночным потенциалом быстрых электронов в области разряда и образованием сплошного электронного спектра, что приводит к увеличению актов возбуждения и ионизации [14]. Наблюдаемые в эксперименте два характерных времени релаксации оптического излучения из области, расположенной на расстоянии 4 мм от поверхности анода, в ограниченном разряде связаны так же с запирающим в объеме быстрых электронов при  $\Delta U = \bar{\epsilon}_s/e$ , где  $\Delta U$  – пристеночный потенциал,  $\bar{\epsilon}_s$  – энергия быстрых электронов, и быстрым диффузионным остыванием электронного газа после скачка пристеночного потенциала [14, 15].

Сложные закономерности изменения степени линейной поляризации спонтанного излучения ППР могут быть связаны с анизотропией функции распределения электронов по скоростям и формированием в процессе электрического пробоя газа пучковой составляющей этой функции. Проанализируем механизмы, вызывающие частичную поляризацию спонтанного излучения разряда. Известно, что основными процессами, ответственными за поляризацию атомных состояний в плазме, являются анизотропное резонансное оптическое или электронное возбуждения, или влияние внешнего электрического поля [10]. В исследуемом разряде при прохождении области катодного падения потенциала часть электронов ускоряется до энергий более 1 кэВ, что приводит к образованию электронных пучков [6]. Присутствие пучка в энергетическом спектре электронов вносит анизотропию в процессы электронного возбуждения уровней и приводит к выстраиванию атомных состояний.

Разные значения  $\eta$  на исследуемых переходах HeI, сложный вид временной зависимости  $\eta$  и изменение характера ее поведения с изменением  $U_0$  и  $p$  связаны с особенностями энергетической релаксации ускоренных электронов в разряде и сменой одних процессов возбуждения и ионизации атомов другими на разных стадиях разряда. Уменьшение значения  $\eta$  при ограничении разряда может быть вызвано запирающим пристеночным потенциалом быстрых электронов в области разряда и образованием сплошного электронного спектра. Эти образовавшиеся в большом количестве плазменные электроны приводят к эффектив-

ному перемешиванию заселенностей подуровней исследуемых атомных состояний и уменьшению коэффициента поляризации.

Информация о процессах анизотропной накачки и релаксации содержится в интенсивностях фотонов определенной поляризации, испущенных ансамблем атомов.

Если выбрать в качестве направления наблюдения вектор  $\mathbf{n}$  перпендикулярно направлению поля  $\mathbf{E}$ , а за независимые направления поляризации векторы  $\mathbf{e}_{\parallel}$  и  $\mathbf{e}_{\perp}$ , первый из которых лежит в плоскости векторов  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{E}$ , а второй – перпендикулярно этой плоскости, то степень линейной поляризации спонтанного излучения  $\eta = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$  можно представить в виде [16]

$$\eta = P_0 + P_f,$$

где  $P_0$  определяется анизотропной накачкой, а  $P_f$  – вклад электрического поля.

Для оценки вклада электрического поля в степень поляризации  $P_f$  необходимо вычислить элементы недиагонального поляризационного тензора  $\rho_0^{(k)}(J, J')$ , которые находятся из решения соответствующих кинетических уравнений. Однако для перехода  $1^1S-4^1P$ , если предположить, что возбуждение верхнего уровня спектрального перехода происходит прямым электронным возбуждением из основного состояния, можно получить следующие формулы [16]:

$$P_0 = \frac{1}{\sqrt{45}} \frac{(\rho_{00} - \rho_{11})}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad P_f = \frac{\alpha^2 (\rho_{00} - \rho_{11})}{30 (I_{\parallel} + I_{\perp})}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0.02E$ ,  $E$  – напряженность электрического поля в кВ/см. Из (1) следует, что для такого перехода

$$P_f/P_0 \approx 9 \times 10^{-5} E^2 \text{ [кВ/см]}. \quad (2)$$

В условиях данной работы  $U_r \sim 2$  кВ, а напряженность электрического поля в плазме  $E = 2U_r/5d \sim 1.33$  кВ/см, где  $d$  – расстояние между электродами. Для этих условий из формулы (2) получим  $P_f/P_0 \sim 16 \times 10^{-5}$ , т.е. вклад электрического поля в поляризацию излучения рассматриваемой спектральной линии меньше 0.1%.

Таким образом, наблюдаемая в эксперименте поляризация излучения исследованных спектральных линий, по-видимому, свидетельствует о наличии пучковой составляющей электронной компоненты и связанного с ней эффекта выстраивания атомных состояний HeI в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментального исследования и проведенный анализ показывают, что при рассмотренных условиях ускорение эмитированных с поверхности катода электронов в области КПП

приводит к анизотропии функции распределения электронов по скоростям. Присутствие пучка в энергетическом спектре электронов вносит анизотропию в процессы электронного возбуждения уровней и приводит к выстраиванию атомных состояний и частичной поляризации спонтанного излучения. Сложный вид временной зависимости  $\eta$  и изменение характера ее поведения с изменением  $U_0$  и  $p$ , по-видимому, связаны с особенностями энергетической релаксации ускоренных электронов в разряде и сменой одних процессов возбуждения и ионизации атомов другими на разных стадиях разряда.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП НК-105П/1, ФЦП НК-182П/7, ФЦП НК-38П/17.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Орешкин В.Ф., Серегин А.М., Синайский В.В. и др.* Импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер с рентгеновским предъюнктизатором на основе высоковольтного тлеющего разряда низкого давления // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 12. С. 1043.
2. *Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.* High-Power Subnanosecond Beams of Runaway Electrons and Volume Discharge Formation in Gases at Atmospheric Pressure // Plasma Devices and Operations. 2005. Т. 13. № 4. С. 231.
3. *Завьялов М.А., Крейнфельд Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
4. *Ульянов К.Н.* Параметры электронных лавин и убежание электронов в сильных электрических полях // ТВТ. 2008. Т. 46. № 4. С. 486.
5. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А.* Ионизационная релаксация поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3. С. 368.
6. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* О роли высокоэнергетичных электронов в формировании структуры плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 12. С. 47.
7. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* Особенности механизмов формирования поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом, ограниченного диэлектрическими стенками // ТВТ. 2009. Т. 47. № 3. С. 338.
8. *Казанцев С.А.* Астрофизические и лабораторные приложения явления самовыстраивания // УФН. 1983. Т. 139. Вып. 4. С. 621.
9. *Slevin J.* Coherence in Inelastic Low-Energy Electron Scattering // Rep. Progr. Phys. 1984. V. 47. № 5. P. 461.
10. *Казанцев С.А., Польшовская Н.Я., Пятницкий Л.Н., Эдельман С.А.* Поляризация атомных ансамблей в ионизованных газах // УФН. 1988. Т. 156. Вып. 9. С. 3.
11. *Демкин В.П., Казанцев С.А.* Спектрометрическое определение электрического поля в плазме // Опт. и спектр. 1995. Т. 78. № 3. С. 377.
12. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* Формирование ускоренных электронов и их влияние на структуру наносекундного разряда с щелевым катодом // ТВТ. 2007. Т. 45. № 4. С. 485.
13. *La Verne Jay A., Mozumder A.J.* Range and Range Straggling of Low-Energy Electrons in the Rare-Gases // Phys. Chem. 1985. V. 89. № 20. P. 4219.
14. *Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Омарова Н.О.* Кинетика возбужденных атомов и оптическое излучение при волновом механизме пробоя инертных газов // ТВТ. 2000. Т. 38. № 5. С. 823.
15. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* Электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с щелевым катодом, ограниченного диэлектрическими стенками // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 1. С. 17.
16. *Демкин В.П., Купчинский Н.Л., Муравьев И.И.* О механизме поляризации состояний атома гелия при возбуждении электронным пучком в электрическом поле // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 10. С. 1352.