

03:04:10

## Оптические свойства плазмы при объемном наносекундном разряде атмосферного давления в неоднородном электрическом поле

© И.Д. Костыря, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, А.В. Феденев

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 августа 2003 г. В окончательной редакции 21 января 2004 г.)

Исследованы оптические свойства плазмы объемного наносекундного разряда, формируемого при повышенных давлениях воздуха, азота, криптона, аргона, неона и смесей Ar–N<sub>2</sub>, Ar–Xe в промежутке с катодом малого радиуса кривизны. Определены амплитудно-временные характеристики и спектры излучения плазмы различных газов в области 230–600 nm. Получена генерация в смеси Ar–Xe при активной длине 1.5 см. Проведено сравнение спектральных характеристик излучения в азоте, криптоне, аргоне и неоне при возбуждении этих газов объемным разрядом в неоднородном электрическом поле, наносекундным пучком электронов и объемным импульсным разрядом в однородном электрическом поле с высоким начальным напряжением.

### Введение

Объемные разряды при повышенных давлениях атомарных и молекулярных газов обычно формируются при использовании предварительной ионизации разрядного промежутка от различных источников ионизирующего излучения [1], а плазма таких разрядов широко применяется в импульсных лазерах [2]. Известно также [3,4] о возможности формирования объемного разряда при атмосферном давлении без предварительной ионизации газа в неоднородном электрическом поле и наносекундных импульсах возбуждения. В этом случае на разрядный промежуток подаются короткие импульсы напряжения с крутым фронтом (единицы–доли наносекунд). В работах [5,6] было показано, что при импульсном наносекундном разряде в воздухе [5] и гелии [6] при атмосферном давлении в системе острие–плоскость, где катодом является острие, регистрируется рентгеновское излучение. Позднее в подобных условиях были зарегистрированы пучки ускоренных электронов, которые имели энергию в десятки–сотни keV [4,7–12].

Импульсный наносекундный разряд при повышенных давлениях атомарных и молекулярных газов в неоднородном электрическом поле, где катодом является электрод с малым радиусом кривизны, может быть объемным, обладает рядом уникальных свойств и находит применение в различных областях. В частности, такой разряд был использован для предыонизации в лазерах повышенного давления с накачкой самостоятельным разрядом [13,14] и для получения пучков электронов в газовых диодах [9–12].

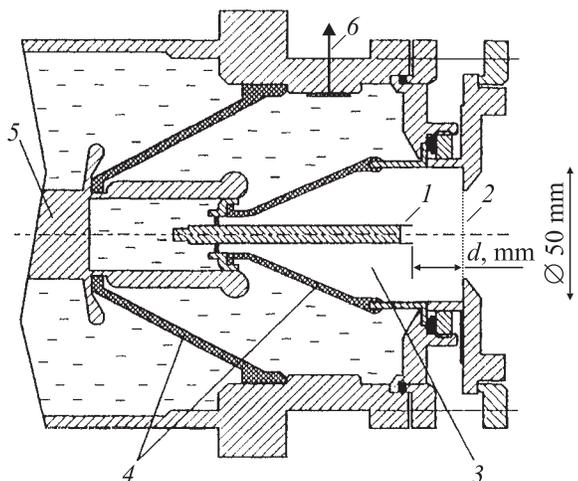
В работе [15] было предложено использовать данный тип объемного разряда в азоте для создания УФ источников излучения с короткой длительностью импульса (до 3 ns) и получена мощность излучения ~ 10 kW в угол 4π на второй положительной системе азота в области длин волн 340–400 nm. Однако оценка эффек-

тивности излучения данного источника, сделанная нами по осциллограммам тока и напряжения, приведенным в [15], дает очень малую величину. КПД преобразования мощности возбуждения в спонтанное излучение второй положительной системы азота, переходы  $C^3P_u - B^3P_g$ , менее 0.01%, что более чем на порядок ниже КПД электроразрядного азотного лазера [16], излучающего обычно на одной длине волны 337.1 nm. Известно, что полная (учитывающая излучение в угол 4π) эффективность источников спонтанного излучения, как правило, превышает эффективность лазерного излучения. Так, мощность и КПД спонтанного излучения второй положительной системы азота в импульсном источнике [17], возбуждаемом поперечным разрядом с УФ предыонизацией, превышал более чем на порядок эффективность излучения газоразрядного источника, описанного в [15].

Цели данной работы — исследовать оптические свойства плазмы объемного наносекундного разряда в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях воздуха, азота, криптона, аргона, неона и смесей Ar–Xe, Ar–N<sub>2</sub>, провести сравнение полученных экспериментальных данных с известными оптическими свойствами плазмы при импульсах возбуждения пучком электронов наносекундной длительности [18–20], самостоятельным разрядом с УФ предыонизацией [18,20] и высокочастотным разрядом [21] длительностью единицы–десятки наносекунд.

### Экспериментальные установки и методики

В экспериментах использовались два генератора наносекундных импульсов типа РАДАН, которые подробно описаны в [22,23]. Генератор 1 (РАДАН-303) имел волновое сопротивление 45Ω и формировал на согласованной нагрузке импульсы напряжения от 50 до 170 kV



**Рис. 1.** Конструкция высоковольтного вывода генератора и газового диода: 1 — катод, 2 — фольга или сетка, 3 — газовый диод, 4 — изоляторы, 5 — потенциальный электрод генератора, 6 — емкостной делитель напряжения.

(напряжение холостого хода до 340 kV) при длительности импульса напряжения на полувысоте  $\sim 5$  ns и фронте импульса напряжения  $\sim 1$  ns [22]. Напряжение на газовом промежутке могло плавно изменяться при изменении зазора основного разрядника.

Генератор 2 (РАДАН-220) имел волновое сопротивление  $20\Omega$  и формировал на разрядном промежутке импульс напряжением с амплитудой до 220 kV и длительностью на полувысоте  $\sim 2$  ns, при фронте импульса напряжения  $\sim 0.3$  ns [23]. Конструкция газового диода была одинакова для обоих генераторов [24] (рис. 1). Использовались, как и в большинстве работ, посвященных изучению рентгеновского излучения и быстрых электронов в газовых диодах, плоский анод и катод с малым радиусом кривизны, что обеспечивало дополнительное усиление поля у катода. Для обоих генераторов обычно применялся катод в виде трубки из стальной фольги диаметром 6 mm и толщиной 50  $\mu\text{m}$ . Трубка закреплялась на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод, через который можно было осуществлять вывод электронного пучка, сформированного в газовом диоде [9–12,24], был образован AlBe фольгой толщиной 45  $\mu\text{m}$  либо сеткой с прозрачностью по свету 20–70%. Расстояние между катодом и анодом изменялось от 13 до 20 mm. При проведении измерений спектральных и амплитудно-временных характеристик плазмы разряда, а также фотографирования разряда под прямым углом к оси катода газовый диод удлинялся на 3 см в сторону фольги, которая также сдвигалась на 3 см. Это было достигнуто за счет увеличения длины держателя катода и удлинения корпуса газового диода, в котором были выполнены боковые отверстия. В ряде экспериментов разрядный промежуток помещался в газовую камеру с окнами или зеркалами, что позволяло

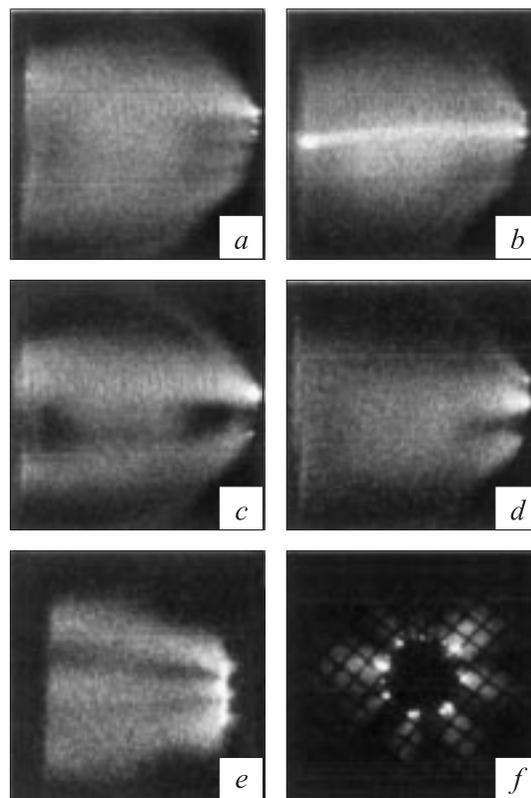
обеспечить откачку газа и изменять состав и давление газов в промежутке.

Для регистрации сигналов с емкостных делителей, коллекторов и шунтов применялся осциллограф TDS-684B с полосой 1 GHz, имеющий 5 GS/s (5 точек на 1 ns) или осциллограф TDS-334 с полосой 0.3 GHz, имеющий 2.5 GS/2s (5 точек на 2 ns). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Спектры излучения снимались на пленку РФ-3 с помощью спектрографа ИСП-30.

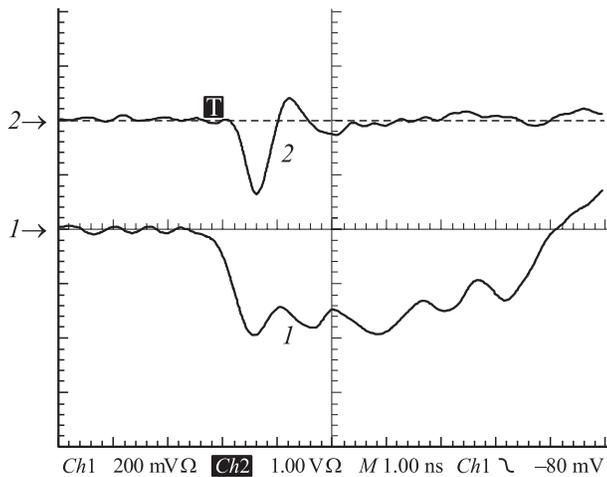
## Результаты экспериментов

На основе регистрации спектров излучения, наблюдений за формой разряда в промежутке, а также измерений импульсов напряжения на газовом диоде и тока разряда было установлено следующее.

В широком диапазоне экспериментальных условий между трубчатым катодом с острой кромкой и анодом формируется объемный разряд в виде диффузных конусов или струй (рис. 2). Видно, что при атмосферном давлении разряд является объемным и обычно только у катода видны яркие пятна. При уменьшении межэлектродного зазора, использовании катода в виде острия или изменении давления на фоне диффузного разряда



**Рис. 2.** Свечение разряда в аргоне (a, b), криптоне (c, d) и воздухе (e, f) при съемке сбоку (a–e) и с торца через сетку (f). Давление газа 1 (a, c, e, f), 0.75 (b) и 0.25 atm (d). Генератор 2 с удлиненным газовым диодом, межэлектродный зазор 16 mm.



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов напряжения на газовом диоде (1) и тока пучка электронов за фольгой (2). Масштаб напряжения 45 kV/div, тока 20 A/div и времени 1 ns/div. Генератор 1, межэлектродный зазор 16 мм.

могут наблюдаться отдельные каналы (рис. 2, *b*) и пятна как на катоде, так и на аноде. В неоптимальных условиях, например при малых зазорах, объемный разряд может переходить в искровую стадию. С увеличением напряжения генератора при оптимальном зазоре на фоне объемного разряда также появляются более светлые нитевидные каналы, а на осциллограмме импульса напряжения регистрируется ступенька. Однако характерной особенностью разряда в неоднородном электрическом поле при атмосферном давлении различных газов является его объемный характер. На рис. 2, *e, f* приведены фотографии свечения разряда в воздухе, полученные с торца при сетчатом аноде и с боку при аноде из фольги. Видны характерные объемные струи.

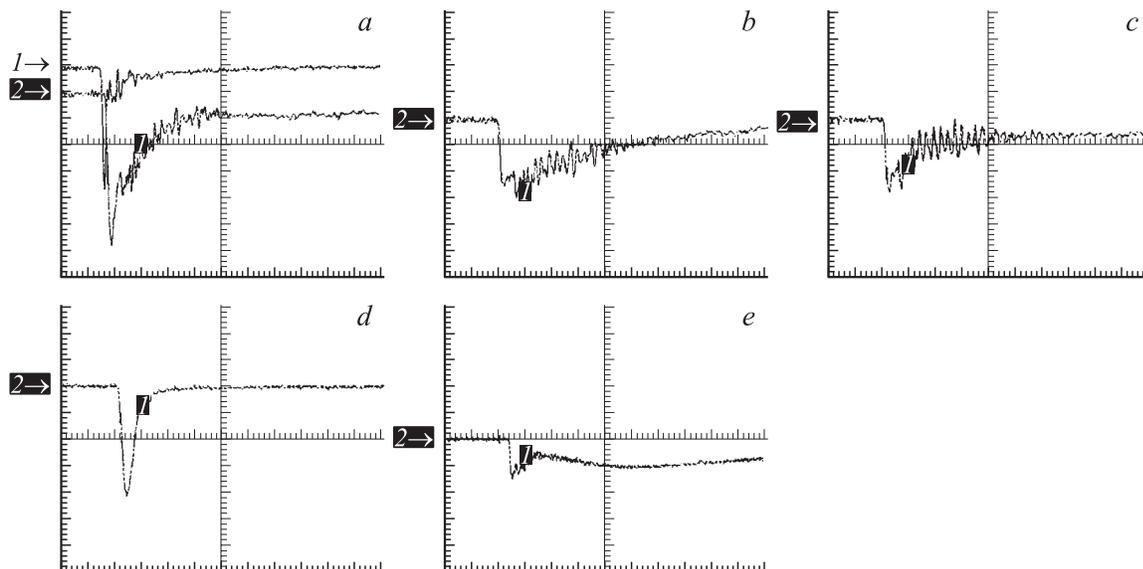
На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения и тока пучка за фольгой при разрешении системы регистрации  $\sim 0.3$  ns. Условия формирования пучка электронов в газовом диоде подробно описаны в [9–12, 24]. Ток разряда начинает регистрироваться на фронте импульса напряжения с очень малой задержкой относительно времени подачи напряжения на промежуток, которую точно измерить не удалось на имеющейся аппаратуре. На осциллограммах тока разряда в ряде режимов виден емкостной пик, который возникает на фронте импульса напряжения при зарядке межэлектродного зазора. Величина и длительность разрядного тока зависит от давления и сорта газа, межэлектродного зазора, типа генератора и его напряжения достигая несколько килоампер при объемном характере разряда. Так, для генератора 1 при напряжении холостого хода  $\sim 340$  kV амплитуда тока составила  $\sim 4.7$  kA. На этом генераторе при сохранении объемного характера разряда в течение 3 ns плотность тока на аноде достигает  $3$  kA/cm<sup>2</sup>, удельная энергия, вложенная в газ,  $\sim 1$  J/cm<sup>3</sup> и удельная мощность энерговода 400 MW/cm<sup>3</sup>. При длительности

объемной стадии разряда 5 ns плотность тока на аноде достигает  $\sim 1.5$  kA/cm<sup>2</sup>, удельная мощность энерговода  $\sim 200$  MW/cm<sup>3</sup> и удельная энергия, вложенная в газ, также  $\sim 1$  J/cm<sup>3</sup>. При максимальном напряжении генератора 1 средняя величина параметра  $E/p$  после окончания тока пучка составила в квазистационарной фазе  $\sim 0.08$  kV/(cm · Torr). Отметим, что обычно для квазистационарной фазы объемного разряда, которая регистрируется после пробоя газового промежутка, напряжение на промежутке более низкое, чем перед пробоем промежутка [16, 25]. В условиях данного эксперимента при катоде с малым радиусом кривизны реализован режим самостоятельного разряда, при котором при однократных импульсах и без предварительной ионизации газа в промежутке напряжение на зазоре максимально в квазистационарной стадии разряда (рис. 3). Данный тип разряда было предложено в [11] называть ОРИПЭЛ разрядом (объемный разряд, инициируемый пучком электронов, лавинный). При обсуждении результатов мы поясним причины формирования объемного разряда.

На рис. 4 приведены характерная осциллограмма импульса тока разряда и осциллограммы импульсов излучения в области 200–650 nm, снятые с помощью фотодиода ФЭК-22 для различных газов при давлении  $\sim 1$  atm, а на рис. 5 — зависимости интенсивности излучения от давления газа. Увеличение давления приводит к увеличению пиковой мощности излучения во всех газах. На рис. 5 (кривая 5) также приведена зависимость длительности импульса излучения на половине от давления азота. Наиболее мощные (рис. 4, осциллограмма *d*) и наиболее короткие (рис. 4 и 5, кривая 5) импульсы излучения были получены в чистом азоте. Однако эффективность спонтанного излучения ОРИПЭЛ разряда в области 200–600 nm как в азоте, так и в других газах и газовых смесях была низкой. При возбуждении азота при давлении 1 atm от генератора 2 мощность излучения составила  $\sim 36$  kW, что в  $\sim 4$  раза больше (за счет большей мощности генератора), чем в работе [15], но КПД излучения второй положительной системы азота ( $\sim 0.01\%$ ) в данных экспериментах не увеличился. В смесях азота с аргоном длительность импульсов излучения второй положительной системы азота существенно больше, чем в азоте, а интенсивность излучения более чем на порядок меньше (рис. 4, *d, e*).

Спектральные исследования, так же как и в работе [15], показали, что в азоте наибольшую интенсивность излучения имеет вторая положительная система азота (наиболее интенсивные полосы с длинами волн 337.1 и 358 nm). В смеси аргона с азотом также в основном излучает вторая положительная система азота и регистрируется более слабое излучение в области 308 nm, которое можно отнести к излучению молекул OH и ионов OH<sup>+</sup>.

В неоне основным является излучение в области 600 nm, которое принадлежит атомарным переходам. Широкую полосу излучения в ближней УФ области спектра, которая хорошо заметна при возбужде-



**Рис. 4.** Осциллограммы тока разряда (верхний луч) и излучения в неоне (нижний луч) (a), криптоне (b), аргоне (c), азоте (d) и смеси  $\text{Ar}:\text{N}_2=100:1$  (e) при давлении газов  $\sim 1$  atm. Генератор 2 с удлиненным газовым диодом, межэлектродный зазор 16 mm. a — вертикальная развертка верхнего луча 3.4 kA/div, нижнего луча — 0.2 V/div; горизонтальная развертка — 10 ns/div; b, c — вертикальная развертка 0.2 V/div, горизонтальная развертка 10 ns/div; d — вертикальная развертка 20 V/div, горизонтальная развертка 10 ns/div; e — вертикальная развертка 0.5 V/div, горизонтальная развертка 20 ns/div.

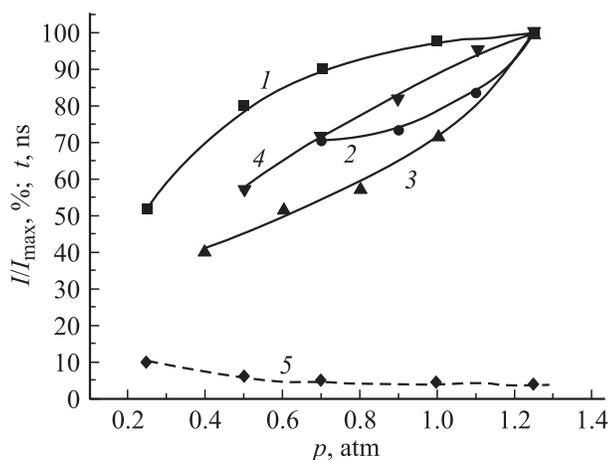
нии неона пучком электронов [19], самостоятельным разрядом при высоких начальных напряжениях [20] и высокочастотным разрядом [21], в ОРИПЭЛ разряде при одинаковых суммарных энерговкладах зарегистрировать не удалось. Также нам не удалось зарегистрировать широкополосное излучение в криптоне и аргоне [18,19]. Из проведенных экспериментов следует, что интенсивность широкополосного излучения в криптоне, аргоне и неоне при ОРИПЭЛ разряде существенно меньше, чем при возбуждении пучком электронов. Тот же вывод

можно сделать, сравнивая спектр ОРИПЭЛ разряда со спектром излучения в неоне при атмосферном давлении и возбуждении самостоятельным разрядом с УФ предыонизацией при высоких начальных напряжениях. Отметим, что в криптоне и аргоне, возбуждаемых при высоких начальных напряжениях самостоятельным разрядом с УФ предыонизацией, разряд при давлении 1 atm контрагировался [18] и излучение третьих континуумов не регистрировалось.

## Обсуждение результатов

На основе анализа полученных экспериментальных данных о свойствах ОРИПЭЛ разряда ответим на два основных вопроса: во-первых, почему при повышенных давлениях и катодных пятнах на электроде формируется объемный разряд, во-вторых, почему в ОРИПЭЛ разряде эффективность излучения второй положительной системы азота и широкополосное излучение третьих континуумов в инертных газах малы.

Мы предполагаем, что в исследованных условиях реализуется следующая динамика формирования объемного разряда в промежутке с катодом малого радиуса кривизны. При подаче высоковольтного импульса напряжения уже на его фронте происходит усиление электрического поля на катоде. Электрическое поле также усиливается после образования катодных пятен на плазменных сгустках, образовавшихся за счет взрывной эмиссии электронов. В экспериментах с оборванным разрядом мы наблюдали во время фронта импульса напряжения на катоде множество мелких плазменных образований,



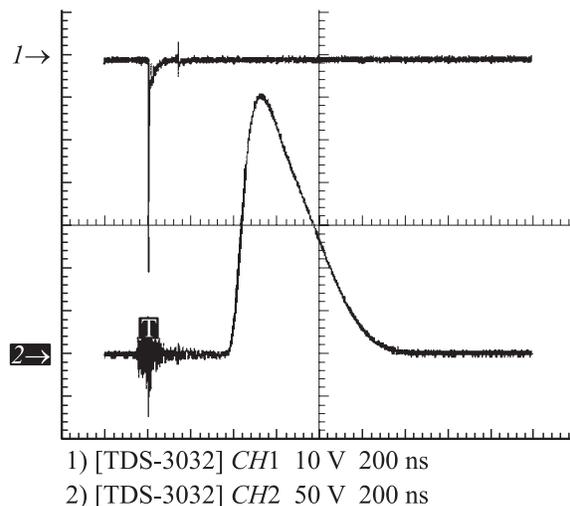
**Рис. 5.** Зависимости интенсивности излучения от давления азота (1), неона (2), криптона (3), аргона (4) и зависимость длительности импульса излучения не полувысоте от давления азота (5). Генератор 2 с удлиненным катодом, межэлектродный зазор 16 mm.

число которых при увеличении времени запаздывания срабатывания срезающего разрядника уменьшалось, а размер и яркость увеличивались. Как известно [1], катодные пятна могут обеспечить эмиссию электронов из катода, достаточную для достижения токов разряда 1–10 кА и более.

За счет усиления поля и быстрого увеличения напряжения на промежутке во время фронта импульса напряженная часть электронов в прикатодной области переходит в режим „убегания“, т. е. электроны набирают энергию, большую, чем энергия, соответствующая максимуму сечения ионизации, и, двигаясь по направлению к аноду, осуществляют предварительную ионизацию газа. Отметим, что влияние усиления электрического поля на электроде в виде острия и высокой скорости изменения напряжения на появление высокоэнергетических электронов отмечалось нами в [21]. Таким образом, формирование объемного разряда в промежутке при неоднородном электрическом поле обусловлено предыонизацией промежутка быстрыми электронами, которые формируются за счет усиления поля на катоде и катодных пятнах, и перекрытием электронными лавинами, плотность которых максимальна в прикатодной области. При этом за счет достаточно интенсивной предыонизации быстрыми электронами (электронным пучком) напряжение на промежутке максимально в квазистационарной стадии разряда ( $E/p \sim 0.05–0.08 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$ ). Если сравнить данные квазистационарные значения параметра  $E/p$  с величинами  $E/p$ , получаемыми в объемном разряде при высоких начальных перенапряжениях и больших плотностях тока [25], то можно увидеть, что они существенно не различаются.

Низкая эффективность излучения второй положительной системы азота и третьих континуумов при возбуждении ОРИПЭЛ разрядом по сравнению с возбуждением объемным импульсным разрядом с высоким начальным напряжением на промежутке обусловлена более низкими максимальными значениями параметра  $E/p \sim 0.05–0.08 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$ . Тогда как для эффективного возбуждения второй положительной системы азота нужны  $E/p \sim 0.1–0.2 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$  [16]. Еще более высокие  $E/p$  и энергии электронов нужны для эффективного возбуждения верхних уровней ионов инертных газов, которые определяют излучение третьих континуумов [19].

Все же электронная температура, которая реализуется в ОРИПЭЛ разряде, может оказаться оптимальной для ряда импульсных лазеров на плотных газах и источников спонтанного излучения. В частности, для лазера на атомарных переходах ксенона, в котором есть канал заселения верхнего лазерного уровня за счет ступенчатого возбуждения и ионизации [26]. Для проверки этого предположения в газовой камере были установлены зеркала. Отражение на длине волны  $1.73 \mu\text{m}$  составило 99 и 98% соответственно, пропускание второго зеркала было  $\sim 2\%$ . Длина активной области равнялась  $\sim 1.5 \text{ cm}$ , но ее хватило для получения стабильной генерации в



**Рис. 6.** Осциллограммы тока разряда (верхний луч) и генерации (нижний луч) в смеси  $\text{Ar}:\text{Xe}=240:1$  при давлении  $\sim 1.2 \text{ atm}$ . Масштаб времени 200 ns/div. Генератор 2 с удлиненным газовым диодом, межэлектродный зазор 16 mm.

смеси  $\text{Ar}-\text{Xe}$  при давлении  $\sim 1 \text{ atm}$ . Осциллограммы импульсов тока разряда и излучения приведены на рис. 6.

Отметим, что в инертных газах, возбуждаемых пучком электронов, легко зарегистрировать излучение третьих континуумов [19,20]. Это связано с тем, что при возбуждении пучком электронов от стандартных ускорителей число быстрых электронов в плазме (при одинаковых удельных энерговкладах) существенно больше, чем в ОРИПЭЛ разряде.

## Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Свойства плазмы ОРИПЭЛ разряда существенно отличаются от оптических свойств плазмы, создаваемой в тех же газах и газовых смесях как при возбуждении пучком электронов, так и объемным разрядом с высоким начальным напряжением (перенапряжением) на промежутке. Средняя температура электронов в ОРИПЭЛ разряде сравнительно мала, что приводит к малой эффективности излучения второй положительной системы азота и третьих континуумов в инертных газах.

2. Квазистационарная стадия ОРИПЭЛ разряда формируется при малых начальных напряжениях, что обусловлено появлением у катода и в промежутке быстрых электронов, которых достаточно для предыонизации промежутка и формирования объемного разряда. Однако при реализации одинаковых удельных энерговкладов число быстрых электронов в ОРИПЭЛ разряде существенно меньше, чем в плазме, создаваемой электронным пучком от ускорителя электронов. Это приводит

к существенному уменьшению эффективности широкополосного излучения третьих континуумов в криптоне, аргоне и неоне.

3. ОРИПЭЛ разряд может быть использован для получения генерации на активных средах и создания источников спонтанного излучения, для которых не нужны слишком высокие средние электронные температуры, например для накачки лазера на смеси Ar–Xe.

4. Важная особенность ОРИПЭЛ разряда — это возможность реализации высоких удельных мощностей энерговода (до  $400 \text{ MW/cm}^3$ ), плотностей тока разряда (до  $3 \text{ kA/cm}^2$  у анода) и удельных энергий ( $\sim 1 \text{ J/cm}^3$  за 3–5 ns). Причем данные параметры не являются предельными и могут быть увеличены.

В заключение мы предлагаем в дальнейшем использовать термин ОРИПЭЛ разряд для определения режима импульсного объемного разряда в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях. ОРИПЭЛ разряд характеризуется высокой импульсной мощностью ввода энергии в газ, регулируемой за счет плотности тока разряда квазистационарным значением параметра  $E/p$  и высоким удельным вкладом энергии.

Авторы благодарят С.А. Шунайлова за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. // Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [2] Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. // Pulsed gas lasers. SPIE. Washington: Opt. Eng. Press, 1995. 374 p.
- [3] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 8. С. 1530–1533.
- [4] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 7. С. 49–82.
- [5] Станкевич Ю.Л., Калинин В.Г. // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72–73.
- [6] Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. N 10. P. 4746–4748.
- [7] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [8] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 8. С. 1617–1620.
- [9] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 29–35.
- [10] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 16. С. 45–53.
- [11] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [12] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. Вып. 11. С. 737–742.
- [13] Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И., Никольский В.С. // Квантовая электрон. 1976. Т. 3. № 3. С. 601–604.
- [14] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. // Квантовая электрон. 1991. Т. 18. № 7. С. 891–893.
- [15] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ПТЭ. 1977. № 1. С. 203–205.

- [16] Тарасенко В.Ф. // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 6. С. 489–494.
- [17] Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. и др. // ПТЭ. 1992. № 4. С. 244–245.
- [18] Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. // ЖПС. 1992. Т. 56. № 2. С. 331–333.
- [19] Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. // Квантовая электрон. 1993. Т. 20. № 1. С. 7–30.
- [20] Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Fedenev A.V. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4071. P. 291–297.
- [21] Тарасенко В.Ф., Тоболкин А.С., Башагуров О.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 1995. № 10. С. 32–36.
- [22] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [23] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [24] Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 21. С. 1–6.
- [25] Савин В.В., Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 1. С. 198–201.
- [26] Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Скакун В.С. // Квантовая электрон. 1999. Т. 26. № 3. С. 209–213.