

ПРОДОЛЬНАЯ СТРУКТУРА ОТКРЫТОГО РАЗРЯДА

А.Р.Сорокин

Открытый разряд ОР [1-7] реализуется в промежутке с условием в нем $pd < (pd)_{\min}$ на кривой Пашена, когда электроны находятся в непрерывном ускорении. Анод сетчатый, электронный пучок ЭП проникает через него в дрейфовое пространство, где происходит основное выделение энергии разряда и откуда за счет высвечивания возбужденных атомов обеспечивается эффективная фотоподсветка промежутка, стабилизирующая разряд.

По ОР опубликовано несколько десятков работ, получены ЭП с энергией электронов до 70 keV при токе до 100 A/cm^2 [3], в непрерывном режиме мощность пучка составила 100 W/cm^2 [4]. Однако до сих пор нет единого ответа на вопрос: является ли разряд простейшим, когда поле в промежутке не искажено зарядами [5,6], или в нем присутствует заряд, достаточный для формирования катодного падения потенциала КПП [2,7]. В [8] наглядно продемонстрировано, что ОР может быть описан в рамках обычного аномального разряда. В [2] свойства ОР в обычно используемых режимах объясняются наличием КПП. Измерение распределения потенциала с помощью дополнительных сеток-зондов, размещенных в промежутке, также показало наличие КПП в ОР [7]. Известно, что возмущения, вносимые зондами, могут существенно изменить протекание разряда. Так, например, в длинном промежутке с сетчатым электродом, размещенным внутри промежутка вблизи катода, разряд после начального переходного процесса полностью определяется параметрами малого зазора катод-сетка [9]. Возможно, этим обстоятельством было вызвано полное игнорирование работы [7] в публикациях Колбычева с соавторами, где, как и в его обзоре [5], утверждается, что эффективная генерация электронов возможна лишь в отсутствие КПП. Хотя в последующем обзоре [6] автор несколько изменил свою позицию, основной вывод фактически остался прежним: "Область КПП имеет аномально большие размеры и, вероятно, вообще не успевает сформироваться". В частности, расчеты в [6] для $d = 0.5 \text{ mm}$ показали отсутствие

КПП. Обсуждаемый вопрос интересен не только для понимания физики разряда, но имеет и практическое значение, поскольку связан с его устойчивостью.

В предлагаемой работе исследовалась продольная структура ОР без внесения возмущений путем анализа спектрально-временных характеристик свечения разряда. Анализ позволил также провести качественную интерпретацию ряда элементарных процессов в ОР.

Наиболее наглядно продольная структура проявляется при низких давлениях и большом d , когда катодные слои растянуты, поэтому основная часть экспериментов выполнялась в таких условиях с сохранением критерия $pd < (pd)_{\min}$. Подробно исследовались две линии He — 587.6 и 501.6 нм. Верхний уровень первой оптически связан с основным состоянием (функция возбуждения линии электронами имеет максимум при 27 eV с дальнейшим резким спадом), а второй связан (максимум 100 eV) с пологим спадом.

В промежутке $d = 4$ мм, $p_{\text{He}} = 340$ Па с ростом напряжения U (тока I) появляется свечение за сеткой, сам промежуток почти темный. Затем у катода возникает слабо светящаяся пленка, а граница свечения со стороны сетки проникает в сам промежуток. С дальнейшим повышением U катодные слои сжимаются, а свечение у катода становится ярче, чем у сетки.

Последнему случаю хорошо соответствует распределение интенсивности P для линии 587.6 нм (рис. 1). Для выбранного давления p_{He} при возбуждении разряда прямоугольным импульсом напряжения с фиксированной амплитудой в условиях, когда сохраняется эффективная генерация ЭП, а прикатодные слои занимают часть промежутка, с ростом d (от 4 до 12 мм) изменяется лишь момент пробоя газа. Осциллограммы U , I_a , I_c , распределение P в прикатодной зоне остаются прежними. Это свидетельствует о почти полном сосредоточии U у катода.

Если темное пространство и область отрицательного свечения в ОР имеют аналоги в обычном разряде, то первый пик в распределении P (рис. 1), который в последнем связан с прохождением максимумов функций возбуждения линий набирающими скорость электронами, в ОР имеет совершенно иную природу. Электроны в области пика уже набрали столь высокую энергию, что возбуждение в слабом поле отрицательного свечения должно быть выше. Это наблюдается у нас при снижении I до ~ 50 мА/см² ($U \sim 1.5$ кВ). Свечение катодной пленки и в обычном разряде ниже, чем в отрицательном свечении [10].

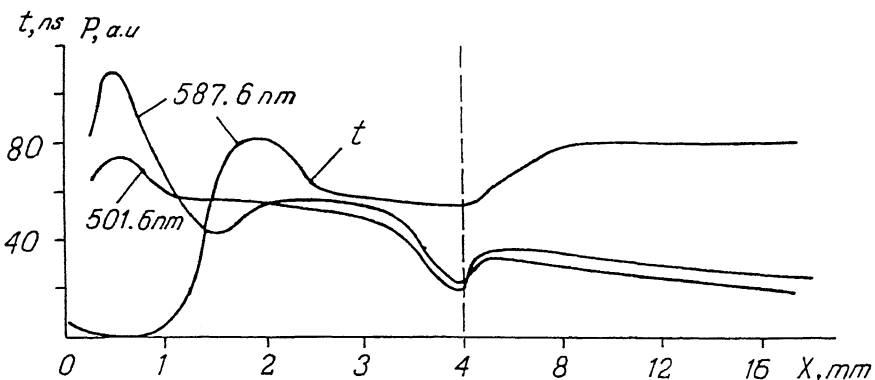


Рис. 1. Распределение относительных интенсивностей P линий и изменение задержки t между максимумами тока коллектора и спонтанного излучения вдоль оси x разряда. После $x = d = 4$ мм масштаб по x изменен, $p_{\text{He}} = 340$ Па.

Первый пик P связан с возбуждением быстрыми атомами (включая ионизованные), роль которых в сильно аномальном разряде очень велика [10]. Это подтверждается и анализом опытов с атомными пучками, которые, как и в [2], возникали за сеткой при инверсии полярности питания.

Приняв такое допущение, легко интерпретировать результаты, представленные на рис. 1, 2. Наиболее эффективно атомы возбуждают линию 587.6 нм, первый пик P на рис. 1. Вблизи катода спад поля как в сторону от катода, так и во времени сопровождается снижением скорости атомов, приводя к резкому спаду P (рис. 1; рис. 2, $x = 0.5$ мм). Появляется и растет задержка t между I_c и P (рис. 1), поскольку эффективность возбуждения линии медленными электронами пучка (U спадает) выше. При больших x поле в катодном слое ослабевает и электроны, рожденные и ускоренные там, эффективней возбуждают линию — наблюдается второй максимум P . В слабом поле отрицательного свечения t может несколько уменьшиться. В дрейфовом пространстве t восстанавливается не сразу за сеткой, возможно, из-за компенсационных токов.

Вклад возбуждения атомами для 501.6 нм меньше, поэтому нет резкого спада излучения во времени вблизи катода (рис. 2), а t почти не меняется, меньше и ее абсолютная величина (15 ns) из-за пологого спада функции возбуждения линии электронами.

Для условий рис. 1, 2 можно оценить длину КПП $l \approx 1.7$ мм. С целью сравнения были проведены измерения l в условиях опыта [7] ($p_{\text{He}} = 600$ Па, $I = 6$ А/см²) при

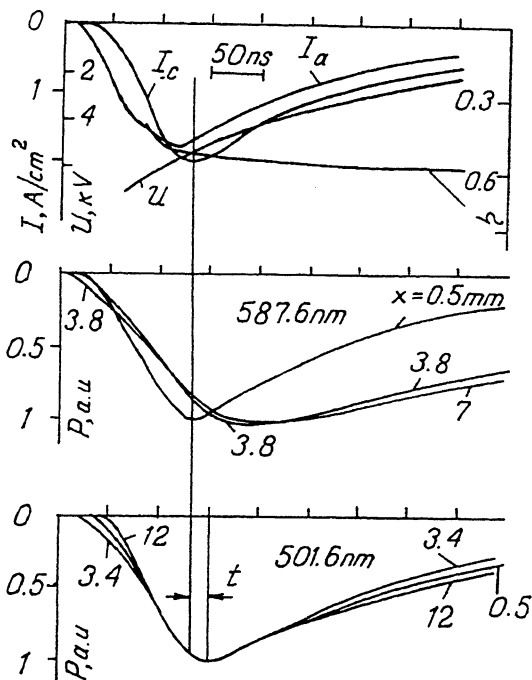


Рис. 2. Осциллограммы излучения P на различных расстояниях x от катода, токов анода I_a , коллектора I_c и напряжения U . Амплитудные значения P приведены к единице. $\eta = I_c(I_c + I_a)^{-1}$, $p_{He} = 340$ Па, $d = 4$ мм, геометрическая прозрачность сетки 0.65, катод дюралюминиевый площадью 1.8 см².

$d = 0.5$ мм. Из [7] $l = 0.2$ мм, в наших опытах 0.25 мм. В [11] распределение поля вычислено на основе измерений степени поляризации излучения при $p_{He} = 2$ кПа, $U = 3$ кВ. В [11] $l = 0.6$ мм, у нас 0.65 мм. Во всех приведенных выше условиях сохраняется высокая эффективность генерации ЭП. Измерения, проведенные в большинстве практически важных случаев, показали наличие КПП в разряде, что подтверждает наши прежние исследования [2]. Исключение, по-видимому, составляет непрерывный ОР [4], где реализуются малые токи. В этом режиме исследования не проводились.

В работе продемонстрировано, что из анализа спектрально-временных характеристик излучения можно определить длину КПП в ОР. Показано, что эффективность генерации ЭП в широком диапазоне условий, включая $d = 0.5$ мм, сохраняется при наличии КПП. Обнаружено, что характер свечения в катодном слое сильно аномаль-

ного разряда, которым является ОР, практически полностью определяется возбуждением атомов быстрыми тяжелыми частицами.

В заключение отметим, что как в [2], так и в других работах тех же авторов нет утверждения, как на это указывается в публикациях [5,6], что эффективное формирование ЭП возможно лишь при наличии КПП. Иное дело, что при наличии КПП в опытах реализуется наибольшая мощность ЭП при сохранении высокой эффективности.

Автор выражает благодарность Фонду Сороса за поддержку работ по открытому разряду.

Список литературы

- [1] Бозан П.А., Колбычев Г.В. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 7. С. 418-421.
- [2] Бозан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 1. С. 88-95.
- [3] Сорокин А.Р., Бозан П.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 17. С. 86-89.
- [4] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 5. С. 198-201.
- [5] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 104-111.
- [6] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 6. № 6. С. 635-649.
- [7] Бозан П.А. // ЖТФ. 1987. Т. 55. В. 5. С. 978-980.
- [8] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С.138-142.
- [9] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 23. С. 92-95.
- [10] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. С. 543.
- [11] Демкин В.П., Королев Б.В., Мельничук С.В. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 1. С. 81-84.

Институт физики
полупроводников СО РАН
Новосибирск

Поступило в Редакцию
17 мая 1995 г.
