

04

Является ли открытый разряд фотоэлектронным? — 2

© А.Р. Сорокин

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
E-mail: IFP@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 3 декабря 2001 г.

С наиболее общих позиций рассматривается качественная картина формирования электронных пучков в разрядах различного типа: с полым анодом, аномальным и открытым. Подтверждается прежний вывод автора: атом-электронная эмиссия обеспечивает высокий КПД формирования электронных пучков, если в перезарядочных процессах рождаются достаточно быстрые атомы, что находится в согласии с давно установившимися представлениями о тлеющем разряде. Приводятся примеры общего характера, свидетельствующие о несостоятельности для открытого разряда фотоэлектронного механизма, в поддержку которого продолжают публиковаться. Последняя из них анализируется в работе.

1. Вновь обсуждается дискуссионный вопрос: является ли открытый разряд (ОР) с сетчатым анодом фотоэлектронным, т.е. поддерживается такой разряд самофотоподсветкой из области дрейфа электронного пучка (ЭП), за сеткой [1–3], или он принадлежит к разновидности тлеющего разряда с анодной плазмой [4,5]. Работа является ответом на публикацию [6], в которой авторы продолжают настаивать на фотоэлектронном механизме ОР.

Тлеющий разряд с анодной плазмой широко используется в электронно-лучевых трубках со второй половины XIX века, а с конца 60-х гг. XX в. — в технологических электронных пушках в форме разряда с полым анодом, в простейшем случае с отверстием в плоском аноде. Давно и надежно установлено [7], что такие разряды поддерживаются потоком ионов из прианодной плазмы, куда затруднено проникновение сильного поля, ибо в нем (для гелия $E/p > 150 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$) электроны „убегают“ от столкновений и ионизация чрезвычайно ослаблена. Фотоэмиссия с катода считается малой, и ею пренебрегают. Основная цель сообщения с наиболее общих позиций, не претендуя на строгость

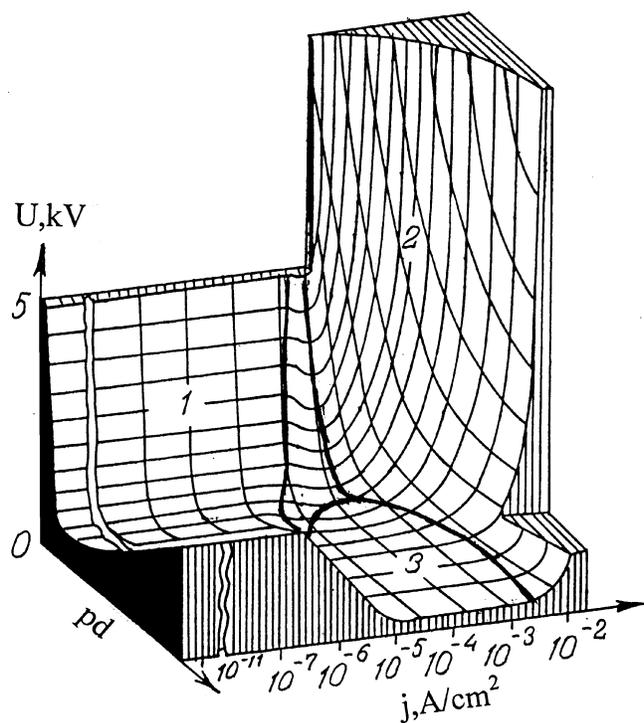


Рис. 1. Формы тлеющего разряда в системе координат U, j, pd [8].

используемого качественного подхода, рассмотреть особенности формирования ЭП в разрядах различного типа и установить, не выводят ли эти особенности разряд за пределы известных форм тлеющего разряда. Также будут проанализированы опыты в [6].

2. В основу рассмотрения положим предложенную в [8] нетрадиционную классификацию форм тлеющего разряда, наиболее просто и ясно отображающую саму суть разряда (рис. 1).

Область 1 — простейший разряд (поле в промежутке слабо искажено зарядами); область 2 — плотный разряд (искажение поля существенно); промежуточная область 3 — нормальный тлеющий разряд. Для простейшего разряда сечение в плоскости U, pd дает кривую

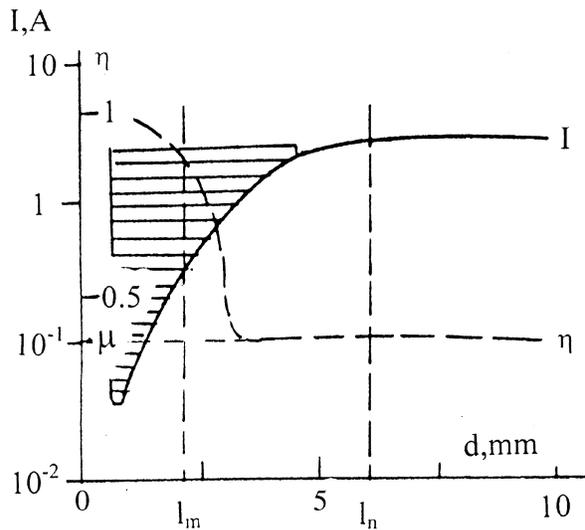


Рис. 2. Зависимости полного тока I и коэффициент прохождения электронного пучка η от расстояния между электродами d [5]. Амплитудное значение напряжения $U_0 = 10.8 \text{ kV}$, $p_{\text{He}} = 2.2 \text{ Torr}$.

Пашена, сечение в плоскости U, j — вольт-амперная характеристика (ВАХ). Видно: у плотного разряда характер подъема ВАХ одинаков для левой и правой ветвей Пашена. Если для нормального разряда по оси j откладывать отношение тока не ко всей площади катода, а только к действительно занимаемой разрядом площади, что только и имеет смысл, то область 3 на рис. 1 исчезнет, что еще больше подчеркнет сходство ВАХ для обеих ветвей.

Фактически на правой ветви, т.е. при достаточной свободе развития электронных лавин, в процессе электрического пробоя промежутка, в результате флуктуаций ток зарядов в одной из лавин оказывается достаточным для существенного искажения поля. В результате поле у катода локально возрастает, формируется катодное падение потенциала (КПП) и более эффективно начинает работать механизм обратной связи — эмиссия электронов с катода под действием бомбардировки катода тяжелыми частицами с возросшей скоростью. Напряжение пада-

ет, а ток ограничивается величиной балластного сопротивления. Этим определится и занимаемая разрядом площадь катода (из-за падения U разряд на оставшейся части катода гаснет). Если слегка увеличить U , появившийся избыток ионов распространится в сторону из столба разряда, площадь катода, занимаемая разрядом, возрастет, а U упадет до прежней величины и т.д., пока разряд не распространится по всей поверхности катода. С дальнейшим ростом U начнется плотный разряд.

Дополним. Не левой ветви подъем ВАХ сопровождается проникновением отрицательного свечения в промежуток и формированием КПП. По мере роста U поле все более сосредоточивается в КПП и начинает сниматься затрудненность развития электронных лавин за КПП. Затрудненность разряда в гелии полностью снимается, если выполняется соотношение $j/p^2 = 2.5 \cdot 10^{-12} U^3$ [9] (j/p^2 [А/(см·Торр)²]; U [В]), когда КПП оказывается полностью сформированным, при этом с ростом тока длина l КПП стремится к своему минимальному пределу $l_m = 0.37(pl)_n \cdot p^{-1}$, где $(pl)_n$ берется для нормального разряда. В импульсном режиме разряд в начальной стадии (левая ветвь) всегда затруднен.

На правой ветви отрицательное свечение и полностью сформированное КПП присутствует еще в форме нормального разряда, который по своей физической сути уже является плотным.

3. Обратимся к электронным пучкам. Начнем с разряда в полом аноде.

В условиях левой ветви, глубоко на ней, образуется заанодная плазма в ослабленном поле, провисшем в отверстии анода. Поскольку тяжелые ионы двигаются по силовым линиям, которые искривлены, то они совместно с возникшими в перезарядочных процессах быстрыми атомами вызывают эмиссию только в центральной области катода. В результате формируется узкий ЭП. По форме это простейший разряд, усиленный потоком ионов из заанодной плазмы.

В условиях правой ветви, а также левой, если длина КПП l занимает лишь часть разрядного промежутка d , образуется преданодная плазма и пучок захватывает всю апертуру отверстия. По форме это плотный разряд. Если затрудненность разряда полностью не снята, то он усиливается ионизацией в остаточном поле, провисшем в аноде.

КПД формирования ЭП ξ -отношение тока пучка к полному току (более точно и правильно — отношение соответствующих мощностей) определяется обобщенным коэффициентом $\gamma = \gamma_i + \gamma_a$:

$\xi = \gamma(\gamma + 1)^{-1}$ [7]. Типичные рабочие давления в электронных пушках с полым анодом — сотые, десятые доли Torr, а напряжения — от десятков до сотен kV.

При полностью снятой затрудненности разряда его параметры могут мало измениться, если анод взять сплошным, расположив его произвольным образом, например в стороне от катода, так, чтобы он не перекрывал пучок, на что было обращено внимание в [10]. Для сохранения высокого значения ξ требуется лишь обеспечить достаточную для эффективной эмиссии γ скорость ионов в КПП. Это уже известный аномальный разряд — частный случай плотного с полностью сформированным КПП.

Если включить параллельно множество разрядов с полым анодом, взяв анодом сетку, получим открытый разряд [1]. Теперь удовлетворить условиям эффективного формирования пучков на большой площади можно при давлениях до сотен Torr, если взять $A, d < 1$ mm (A — характерный размер отверстий в сетке). Рабочие напряжения здесь обычно не превышают $15 \div 20$ kV. Коэффициент прохождения пучка в пространство дрейфа η будет лежать в пределах $\eta \approx \xi \div \xi\mu$ (μ — геометрическая прозрачность сетки); $\eta \approx \xi$, если ток на перемычке сетки мал, что может реализоваться в простейшем разряде [11, рис. 2] и просматривается на начальной стадии еще не успевшего развиваться плотного разряда [3, рис. 1] при импульсном возбуждении. Отметим: различия в использовании режима разрядов с полым анодом и открытого диктуются исключительно их применениями.

4. В [1] для ОР был предложен нетрадиционный механизм разряда — фотоэлектронный, наиболее ярко сформулированный в [2]: ОР „является по сути несамостоятельным, с инициацией и поддержкой УФ подсветкой из заанодной области“. Процессы ионизации стали считать вредным фактором, снижающим КПД. Критика фоторазряда дана в [4] и последующих публикациях с итогом в [5]. В работах продемонстрировано: ОР, так же как и разряд с полым анодом, сохраняет все свойства известных форм тлеющего разряда, а фотоэлектронный механизм находится в глубоких и неразрешимых противоречиях с опытом.

Противоречий множество и, что очень важно, они носят общий и принципиальный характер. Приведем наиболее яркие. Для фоторазряда коэффициент фотоэмиссии γ_b должен быть больше единицы, иначе разряд не начнется (под γ_b здесь подразумевается число электронов, выбитых с катода излучением, приходящихся на один электрон, выле-

тевший в пространство дрейфа). Тогда ток будет нарастать до величины, ограничиваемой законом степени „ $3/2$ “. Но такие токи в ОР никогда не достигаются.

Можно обратиться к любым типичным осциллограммам, подчеркнем — любым, например, полученным в [3, рис. 1]: ток пучка начинает падать в условиях, наиболее благоприятных для возбуждения фотоэмиссии, — на спаде U [4], когда скорость электронов не столь велика. Вообще не понятно, почему фоторазряд требует для роста тока пучка и КПД завышения U , как это наблюдается во всех известных опытах, включая эксперименты с лазерными средами. В них (см., например, [12]) отмечается слишком высокая прозрачность активных сред для электронных пучков, что не позволяло в полной мере реализовать высокую эффективность лазеров на ОР. Казалось бы, чего проще для фоторазряда — давайте снизим напряжение, получим больший ток пучка и повысим КПД. Однако на опыте с уменьшением U падает не только анодный ток, но, в наибольшей мере, ток пучка и КПД.

Или обратимся, например, к кривым, полученным в [2, рис. 3]: почему для фоторазряда, снижая давление, а следовательно, снижая взаимодействие пучка с газом, требуется еще больше снижать это самое взаимодействие наращиванием U , чтобы сохранить тот же ток.

Почему не меняются токи пучка и разряда в целом [13, рис. 3], или они могут даже возрасти [5, рис. 6], при сокращении области фотоподсветки перемещением коллектора вблизи анодной сетки. Примеры, причем общего характера, можно продолжить. Остановимся еще на одном.

В [5, рис. 4] было обращено внимание на характерный для ОР ход кривой тока от длины разрядного промежутка (рис. 2), который, как видно (сравнить с рис. 1), присущ тлеющему разряду. Поведение этой кривой совершенно не укладывается в рамки фоторазряда. Ведь речь идет об изменении тока на 2 порядка. Возникает вопрос: причем здесь фоторазряд? Он никак не может так зависеть от d . Подчеркнем, в опыте сохранялся КПД ξ , близкий к единице, причем даже при $d > l_n$ нормального тлеющего разряда, когда уже наличие отверстий в аноде не сказывается на параметрах разряда и термин открытый разряд здесь уже не уместен.

Проведенный анализ формирования ЭП в различных условиях тлеющего разряда основан на наиболее общих подходах, и поэтому с очевидностью обобщается на весь диапазон условий, практически

реализуемых в ОР. Важно еще раз подчеркнуть, что тлеющий разряд с положительной ВАХ, который чаще используется в ОР, при любых параметрах pd принадлежит к одной его разновидности — плотному разряду, поэтому в нем не меняется и механизм генерации ЭП. Это вовсе не означает, что ЭП можно получать при любых значениях, например, давления p . Ограничения возникают из-за развития неустойчивостей в прикатодной области вследствие высокой концентрации электрического поля у катода.

5. В заключение проанализируем опыты [6], в которых вне ускорительного промежутка ($d = 1 \text{ mm}$, $U = 2.4 \text{ kV}$, $p_{\text{He}} = 16 \text{ Torr}$), вблизи (2 mm) сетчатого анода располагалась дополнительная сетка (в обеих сетках $A = 0.2 \text{ mm}$), соединенная с анодом. Вспомогательный разряд ($U = 0 \div 35 \text{ V}$) между этой сеткой и коллектором (расстояние 20 mm , плюс на коллекторе) сопровождался ростом тока в ускорительном зазоре до 2 раз, что было, якобы, обусловлено, дополнительной фотоподсветкой от этого вспомогательного разряда.

В опытах ток в ускорительном промежутке был на порядок меньше, чем того требует параметр j/p^2 для установления полностью сформированного КПП, т.е. разряд работал на провисании поля, когда на него большое влияние оказывают условия вблизи анодной сетки, например размещение там дополнительных электродов, посторонних источников заряженных частиц и т.д. Приведем пример. Если в режиме, близком к простейшему разряду, поднести заземленный электрод или прикоснуться им к разрядной трубке со стороны дрейфа вблизи сетки, то из-за изменения там распределения провисшего поля ток уменьшается [11, рис. 1] и даже разряд может совсем потухнуть (интересно, как подобный эффект можно связать с фоторазрядом?).

В действительности рост тока в [6] был вызван полем вспомогательного разряда ($E/p = 0 \div 1.1 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$), которое организует по направлению к сеткам дополнительный поток ионов, подхватываемый затем полем, провисшим из ускорительного промежутка (в месте расположения дополнительной сетки, по расчету [14]: $E/p = 0.95 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$). Заметим, параметр E/p здесь близок к $E/p \approx 1 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$ в положительном столбе нормального тлеющего разряда.

Подведем итоги. Имеется более чем достаточно аргументов общего и принципиального характера о несостоятельности фотоэлектронного механизма открытого разряда, и нет никакой необходимости заострять

внимание на тех или иных эффектах частного характера, однозначная интерпретация которых затруднительна. Подобные эффекты неисчерпаемы и при внимательном рассмотрении служат лишь дополнительным подтверждением преобладания атом-электронной эмиссии, что находится в согласии с давно установившимися представлениями о тлеющем разряде и подтверждается расчетом для открытого разряда [15].

Автор благодарит А.А. Черненко за расчет провисания поля в сетчатом аноде.

Список литературы

- [1] Бохан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 1. С. 88–95.
- [2] Колбычев Г.В., Колбычева П.Д., Пташник И.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 2. С. 59–67.
- [3] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–648.
- [4] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 20. С. 37–40.
- [5] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 3. С. 33–38.
- [6] Бохан А.П., Бохан П.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 6. С. 7–12.
- [7] Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [8] Клярфельд Б.Н., Гусаева Л.Г., Покровская–Соболева А.С. // ЖТФ. 1966. Т. 36. В. 4. С. 704–713.
- [9] Клименко К.А., Королёв Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138–142.
- [10] Yu Z., Rossa J.J., Collins G.J. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 1. P. 131–136.
- [11] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 13. С. 17–22.
- [12] Бохан П.А., Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 10. С. 620–623.
- [13] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 9. С. 1823–1831.
- [14] Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 487 с.
- [15] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 24. С. 89–94.