

О ДВИЖЕНИИ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ

А.А. Андреев

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Украина, 61108, г.Харьков, ул.Академическая,1, e-mail:pavlenko@kipt.kharkov.ua*

Рассматривается распределение токов в окрестностях ячейки катодного пятна – эктона. Предполагается, что электроны из эмиссионного центра, обладающие энергией, недостаточной для преодоления потенциального барьера между боковой поверхностью плазменной струи и катодом, движутся по циклоидам у катода, а затем уходят к аноду. Тем самым, в окрестностях эктона создается поверхностная плазма и условия для возникновения новых эктонов. С этой точки зрения объясняется движение катодного пятна во внешнем магнитном поле

1. Введение

В настоящей работе рассматривается распределение токов в области катодного пятна вакуумной дуги, согласно которому делается попытка объяснить его поведение на поверхности катода, в том числе при воздействии внешних магнитных полей.

Изучению катодного пятна посвящены фундаментальные труды [1-4] и многие публикации в научных журналах, однако до сих пор не существует общепринятого объяснения его некоторых свойств, например, такого явления, как обратное движение в тангенциальном магнитном поле [1].

2. Свойства катодного пятна.

Остановимся кратко на известных свойствах катодного пятна, которые в дальнейшем будут иметь отношение к рассматриваемым вопросам.

Катодное пятно состоит из нескольких эмиссионных центров, названных ячейками [1], фрагментами катодного пятна [5] или эктонами [3].

Эктон представляет собой лавину электронов за счет микровзрывов, вызванных перегревом локальных участков катода. Об эктоне можно говорить, как о термоэмиссионном процессе, усиленном электрическим полем [6]. Время существования эктона составляет менее 10^{-9} с, плотность тока более 10^8 А/см². Диаметр эмиссионного центра эктона (судя по диаметру кратеров) составляет около 1 мкм [6].

В эктоне ток электронов из эмиссионного центра разделяется на две компоненты: ток на анод и обратный ток быстрых тепловых электронов (из «хвоста» максвелловского распределения) на катод. Обратный ток образует в окрестностях эктона кольцевые (тороидальные) структуры [7].

Ускорение и увеличение кратности заряда ионов происходит в пределах расстояния 10^{-3} см от катода. На этом расстоянии прекращаются реакции в плазме и ее состав не меняется. Вблизи катода температура электронов не превышает 5 эВ [6].

Движение катодного пятна осуществляется при токах, превышающих некоторые пороговые значения, за счет угасания (гибели) одних эктонов и одновременного возникновения новых. В высоком вакууме и на очищенных поверхностях новые эктоны возникают в непосредственной близости от прежнего эмиссионного центра, практически у края кратеров. При низком вакууме и загрязненной поверхности катода новые эктоны могут возникать на расстояниях до 100 мкм от прежних [3, 6, 7]. Вокруг вновь образовавшегося эктона возникают новые и катодное пятно в виде группы эктонов может перемещаться со скоростью до $1 \cdot 10^4$ см/с [3].

В случае существенного превышения тока дуги над пороговым на катоде могут существовать одновременно несколько катодных пятен. При сближении они активно отталкиваются друг от друга, но на большой поверхности катода держатся на вполне определенных расстояниях.

При отсутствии внешних магнитных полей обычно катодное пятно совершает беспорядочные перемещения по катоду. Если на протяженном катоде источник тока дуги подключен в одном месте, катодное пятно всегда стремится к месту токоподвода.

При наличии на катоде тангенциального магнитного поля катодное пятно движется перпендикулярно его направлению в сторону, противоположную предписываемой правилом Ампера [1]. При этом катодное пятно реагирует даже на небольшие поля (порядка единиц эрстед). При малых магнитных полях катодное пятно отклоняется от основного направления ("рыскает"), но с увеличением поля путь его движения становится более выпрямленным.

3. Распределение токов в окрестностях эктона

Магнитное поле, создаваемое током из эмиссионного центра может быть оценено из формулы зависимости для поля линейного проводника с током.

В окрестностях эктона будет существовать тангенциальное магнитное поле H_3 , созданное током эмиссионного центра I_3 , состоящим из кольцевого тока I_k и тока I_1 , достигшего анода. Оно составляет около 16 тысяч эрстед. Примем его толщину ориентировочно 10^{-3} см. Радиус кольцевых токов быстрых электронов в таком поле (с энергией ~ 5 эВ) будет менее $5 \cdot 10^{-4}$ см.

Таким образом, в окрестностях эктона у поверхности катода существуют скрещенные $E \times H$ поля, в которых электроны движутся в радиальных от эмиссионного центра направлениях по циклоидам, высота которых равна [11]

$$h = \frac{2mc^2 E}{eH^2}$$

Высота циклоид близка к диаметрам лармовских окружностей электронов

$$r = \frac{mvc}{eH}$$

Магнитное поле H_1 , созданное током $I_1 = I_3 - I_k$, удерживает кольцевые токи в радиальных направлениях. Электроны, обладающие энергией, недостаточной для преодоления потенциального барьера, отклоняются магнитным полем H_3 к катоду, отражаются от его поверхности и движутся в радиальных направлениях от центра к периферии по циклоидам (рис.1), образуя токи I_3 . Вследствие этого плазма над эктоном

обедняется электронами, что способствует появлению бугра потенциала над ним [10].

Величина тока I_2 , протекающего по катоду у его поверхности к эмиссионному центру, в радиальном направлении уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от него. Соответственно уменьшается и магнитное поле H_2 этого тока.

Поверхностный ток I_3 и его магнитное поле H_3 уменьшаются обратно пропорционально расстоянию от эмиссионного центра в радиальных направлениях.

Магнитные поля H_1 , H_2 и H_3 и поверхности катода совпадают по направлению и это суммарное поле $\Sigma H = H_1 + H_2 + H_3$ удерживает электроны у катода. По мере удаления от эмиссионного центра все три составляющие ΣH уменьшаются, при сохранении энергии электронов их высоты циклоид h возрастают до величины, превышающей характерные размеры области эктона (условно 10^{-3} см) и уходят на анод. Быстрые электроны (за исключением кольцевых) уходят к аноду на малых расстояниях от эмиссионного центра, более медленные покидают поверхность катода на больших расстояниях. В процессе перемещения у поверхности катода электроны десорбируют газы, частично ионизируют их (ступенчатая ионизация) и образующаяся поверхностная плазма способствует возникновению новых эктонов [6].

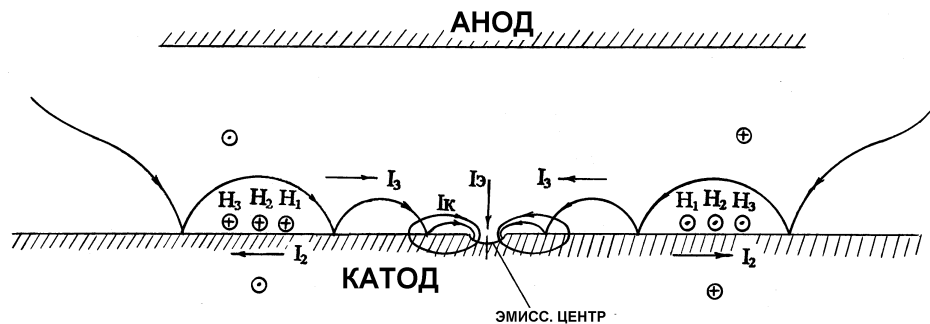


Рис.1 Распределение токов в окрестностях эктона

При низком вакууме и загрязненной поверхности, на которой имеется большое количество адсорбированных газов, для десорбции которых достаточно доли электронвольта на один атом [3], из-за частых столкновений энергия электронов уменьшается и при уменьшающемся тангенциальном поле ΣH высоты их циклоид увеличиваются не столь интенсивно, их пробег (в пределах толщины - 10^{-3} см) увеличивается. Радиус создаваемой ими поверхностной плазмы в окрестностях эктона увеличивается и становится возможным возникновение новых эктонов на расстоянии до 100 мкм. От эктона из прикатодной области в сторону анода исходит ток в виде трубки, диаметр которой определяется вакуумными условиями и степенью загрязненности катода.

В случае, если ток разряда I_2 течет по катоду в одном преимущественном направлении, его магнитное поле H_2 в этом направлении при удалении эмиссионного центра не ослабевает, электроны удерживаются в прикатодной области на большом расстоянии, создавая условия для возникновения новых эктонов (рис. 2). С противоположной стороны эмиссионного центра из-за отсутствия поля H_2 электроны достаточно быстро уходят к аноду и вероятность появления новых эктонов снижается. Поэтому на катоде пятно всегда движется к токоподводу.

Это явление широко используется в планарных, а также торцевых испарителях для удержания катодных пятен в пределах испаряемой поверхности при помощи выступа вдоль ее краев [8, 9].

Если два эктона возникают рядом, их магнитные поля направлены встречно, взаимно компенсируются, возникает ток электронов от поверхности катода к аноду и магнитное поле этого тока направлено встречно магнитным полям обоих эктонов. В этом

месте ухудшаются условия возникновения новых эктонов, в то время как вдали от эктонов такие условия существуют (рис. 3). Таким образом, эктоны расходятся.

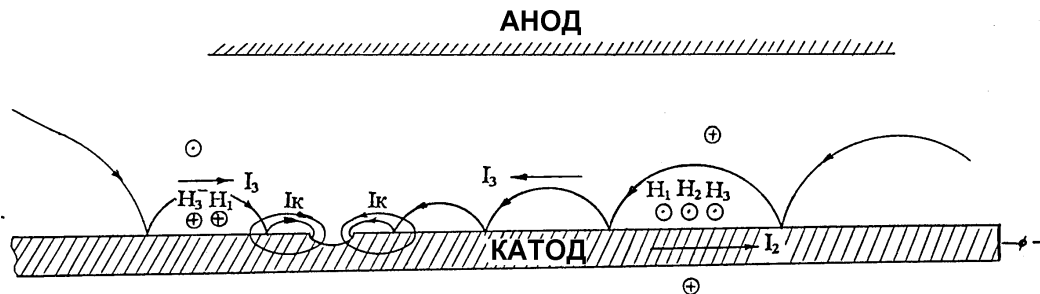


Рис.2 Распределение токов в окрестностях эктона при подключении

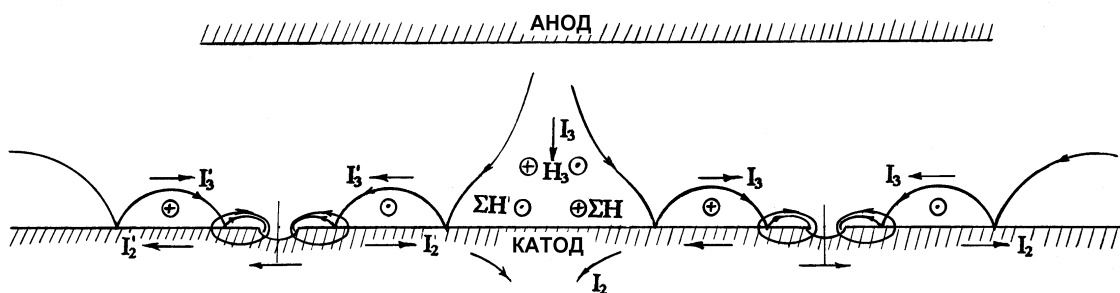


Рис. 3 Схема взаимодействия двух эктонов

Однако эти процессы происходят только в прикатодной области (условно 10^{-3} см). Выше этой зоны действует закон Ампера, трубки токов от отдельных эктонов взаимно притягиваются, что вероятно и является причиной того, что эктоны группируются в одно катодное пятно. В таком случае внутри катодного пятна магнитные поля отдельных эктонов взаимно компенсируются и электроны уходят от катода; вне его эктоны взаимодействуют с поверхностью как было сказано выше и в целом катодное пятно ведет себя подобно отдельному эктону.

При наложении на катод внешнего тангенциального магнитного поля оно складывается с ΣH в антиамперовом направлении, при этом электроны удерживаются у катода, создавая поверхностную плазму и условия для возникновения новых эктонов. С противоположной стороны пятна внешнее поле направлено противоположно ΣH и электроны уходят от катода вблизи эмиссионного центра. На расстояниях от эмиссионного центра, где магнитное поле ΣH эктона становится меньшим внешнего магнитного

поля $H_{в}$, электроны, двигаясь по циклоидам, разворачиваются перпендикулярно ему в антиамперовом направлении, образуя полосу поверхностной плазмы (рис. 4). Поэтому катодное пятно столь чувствительно даже к небольшим тангенциальным магнитным полям.

В пределах этой полосы могут возникать новые эктоны и катодное пятно рыскает, отклоняясь от прямолинейного пути. Ширина этой полосы зависит от величины внешнего магнитного поля, вакуумных условий и наличия адсорбированных на катоде газов – чем ниже вакуум и меньше внешнее поле, тем шире полоса поверхностной плазмы. С увеличением внешнего поля электроны разворачиваются на меньшем расстоянии от эмиссионного центра, плазменная полоса сужается и путь катодного пятна становится более выпрямленным, направленная скорость катодного пятна будет увеличиваться.

Если магнитное поле $H_{в}$ направлено к катоду под углом α , трубка тока I_4 от катодного пятна направлена вдоль магнитных силовых линий и магнитное поле этого тока H_4 со стороны острого угла скла-

дывается с остальными тремя составляющими магнитного поля, удерживающими электроны у катода (Рис. 5). Поверхностная плазма в этом направлении будет плотнее и катодное пятно смещается в сторону острого угла, образуя т.н. угол Робсона [12]. При этом чем ниже вакуум, тем больше десорбированных элект-

тронами газов, плотнее и протяженнее поверхностная плазма и тем больше угол Робсона, что подтверждается экспериментально.

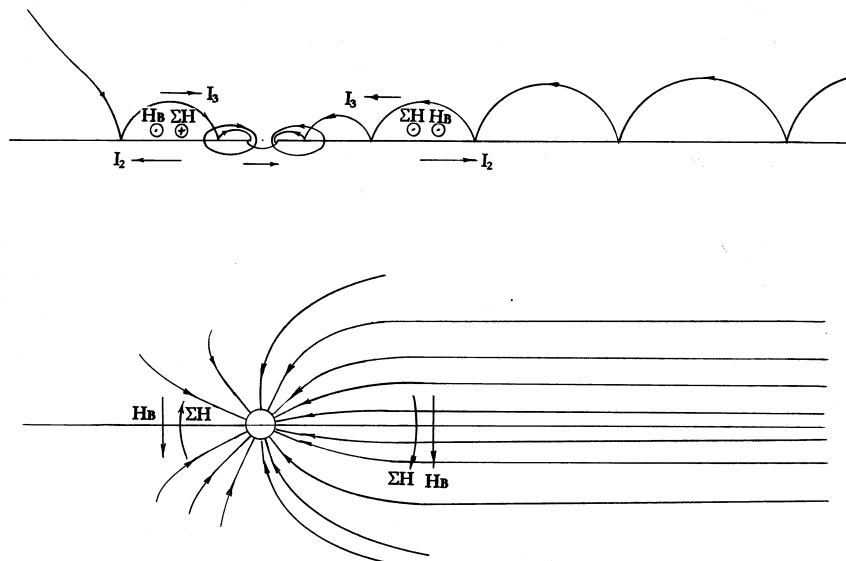


Рис. 4 Распределение токов в окрестностях эктона при внешнем тангенциальном магнитном поле

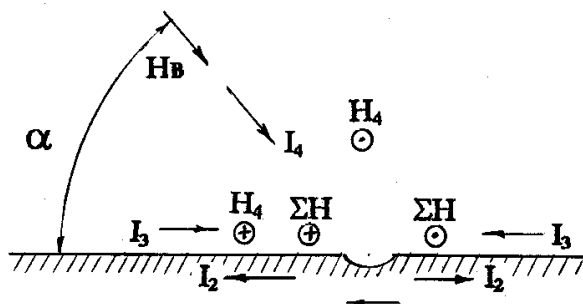


Рис.5 Смещение эктона при наклонном внешнем магнитном поле

При малых углах α электроны от катодного пятна уходят сразу вдоль магнитных силовых линий и дополнительное магнитное поле H_4 не оказывает на эволюцию пятна существенного влияния. С увеличением угла α часть электронов, удерживается у поверхности катода. Магнитное поле H_4 , складываясь с ΣH , способствует удержанию их у поверхности катода, создавая условия для возникновения новых эктонов, вследствие чего катодное пятно смещается в сторону острого угла, увеличивая угол Робсона.

Автор выражает благодарность И.И.Аксенову, Н.С.Ломино и В.И.Карасю за полезные советы при обсуждении статьи и внимание к работе

Литература

1. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М., «Наука», 1968.
2. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М., «Наука», 1970.
3. Месяц Г.А. Эктоны, ч. 1 и 2, Екатеринбург, УИФ «Наука», 1993-1994.
4. Лафферти Дж. Вакуумные дуги. М., «Мир», 1982.
5. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги.// УФН, 1978, т. 125, вып. 4, С.665
6. Месяц Г.А. Эктон - лавина электронов из металла.// УФН, 1995, т. 165, № 6, С. 601.
7. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Парфенов А.Г. О величине катодного падения потенциала вакуумной дуги.//ДАН СССР, 1990, т. 310, № 2, С. 344.
8. Sablev L.P., Andreev A.A., Kunchenko V.V., Grigoriev S.N. Vacuum-Arc Evaporator of Metals with an Extended Planar Cathode.// Proc. of the TATF '98, Germany, Regensburg 1998, P. 323.
9. Romanov A.A. and Andreev A.A. Method and Apparatus for Controlling Plasma Generation in Vapor Deposition.// U.S. pat. № 4512867, 1982.
10. Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. Высоко-скоростные потоки плазмы вакуумных дуг // ЖЭТФ, 1964, т.47 вып.8, С.495.
11. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. М., Атомиздат, 1966.
12. Баренгольц С.А., Литвинов Е.А., Садовская Е.Ю., Шмелев Д.Л.. Движение катодного пятна вакуумной дуги во внешнем магнитном поле.// ЖТФ, 1998, т. 68, №6, С.60.