

05;11;12

## Образование колец вокруг первичного автоэмиссионного изображения и возможности их практического использования

© К.Н. Никольский, А.С. Батулин, А.И. Князев, Р.Г. Чесов, Е.П. Шешин

Московский физико-технический институт,  
141700 Долгопрудный, Московская область, Россия  
e-mail: nkn@lafeet.mipt.ru

(Поступило в Редакцию 25 марта 2003 г. В окончательной редакции 30 июля 2003 г.)

Исследованиями импульсной автоэлектронной эмиссии в электронном проекторе было установлено, что при приближении к предельно высоким плотностям тока происходит характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное эмиссионное изображение. При исследованиях плоских автоэмиссионных катодов не однократно было замечено появление колец. Для объяснения их появления была предложена модель, в основе которой лежит предположение о том, что вторичные электроны, эмитируемые с анода, под действием электрического поля возвращаются на анод, образуя наблюдаемое кольцо. Рассмотрены возможности использования этого явления при создании автоэмиссионных приборов.

### Введение

При изучении автоэмиссионных свойств плоских катодов, в частности катодов на основе графитовых порошков и катодов, изготовленные методом газофазного осаждения, мы неоднократно сталкивались с появлением ярких светящихся колец на эмиссионном изображении. Кольца представляют собой диффузно засвеченную область люминофора, окружающую основное автоэлектронное изображение. Диаметр колец зачастую превосходит размер основного изображения. Яркость колец увеличивается при увеличении эмиссионного тока.

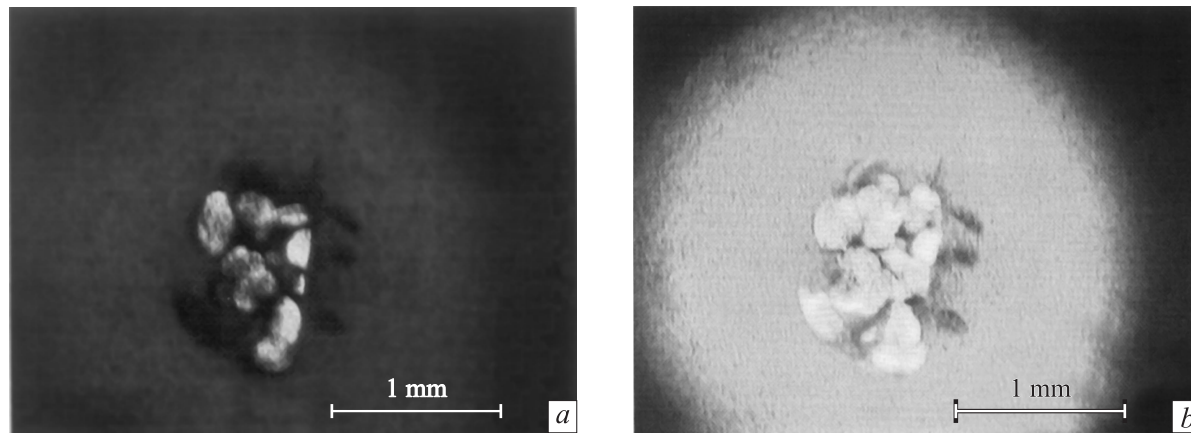
Исследованиями импульсной автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) в электронном проекторе [1–5] было однозначно установлено, что при приближении к предельно высоким плотностям тока происходит характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное эмиссионное изображение. Впервые этот эффект был описан в работе [1]. Кольцо наблюдали при изучении эмиссии с вольфрамового острия, когда плотности токов приближались к критическим значениям. Одновременно с появлением кольца наблюдался скачок эмиссионного тока. Авторы объяснили данный эффект термоавтоэлектронной эмиссией. Катод разогревается автоэлектронным током, что в свою очередь усиливает сам ток. В работах [2–5] на остриях из различных материалов изучались явления, предшествующие разряду, т.е. аномальное увеличение эмиссионного тока и „эффект кольца“. При определенных условиях наблюдалось несколько концентрических колец. Преддуговым явлениям авторы приписали тепловой характер, объяснив это их инерционностью и зависимостью от времени протекания автоэлектронного тока. Но окончательного объяснения природы колец в этих работах так и не было сделано из-за недостатка экспериментальных данных на тот период времени. Поэтому было высказано несколько гипотез образования колец: а) термоавтоэлектронная эмиссия с периферийно-

го участка острия, б) выступы на поверхности эмиттера, в) дифракция электронов. Из представленных гипотез основной и наиболее подтвержденной экспериментально является гипотеза а). Однако ее основным недостатком является невозможность объяснения увеличения тока в кольце за время импульса на 2–3 порядка, в то время как температурная добавка к току АЭЭ в пределах применимости уравнения Фаулера–Нордгейма составляет всего несколько десятков процентов. В работе [6] проведено моделирование и показано, что образование кольца может быть объяснено автотермоэлектронной эмиссией с периферийной части острия. Однако авторы [6] подчеркивают, что такая модель не в состоянии объяснить появление нескольких колец на эмиссионном изображении.

### Модель образования колец в случае плоской геометрии анод–катод

В работах [1–5] кольца появлялись в предпробойный период. Их возникновение сопровождалось самопроизвольным нарастанием тока, приводящим к пробое и гибели катода. В наших экспериментах в отличие от [1–5] кольца существовали длительное время и их появление не было связано с гибелью эмиссионного центра. Например, на рис. 1, а показан момент зарождения кольца. Дальнейшее увеличение тока в 4 раза привело к существенному увеличению интенсивности кольца без разрушения катода (рис. 1, б).

Таким образом, наблюдаемые нами кольца нельзя отнести к предпробойному режиму, исследованному в [1–5]. В конструкциях с плоским автоэмиссионным катодом более реалистичным представляется следующий механизм возникновения колец. Электроны, попадая на анод, выбивают с его поверхности вторичные электроны, которые под действием электрического поля возвращаются на анод и образуют кольцо.



**Рис. 1.** Эмиссионное изображение колец при различных значениях тока и напряжения между катодом и анодом: *a* — напряжение 2.84 kV, ток 10  $\mu$ A; *b* — напряжение 4.07 kV, ток 40  $\mu$ A.

Рассмотрим модель плоского диода с расстоянием между анодом и катодом  $L$  (рис. 2). При напряжении на аноде, равном  $U$ , поле в промежутке анод–катод равно  $E = U/L$ . При рассмотрении движения вторичных электронов вблизи анода мы пренебрежем существованием на катоде эмиссионных центров. Они вызывают локальное усиление поля вблизи катода, но не влияют существенным образом на поведение электронов вблизи анода. Рассмотрим движение вторичного электрона, имеющего начальную энергию  $\varepsilon_S$  и вылетающего под углом  $\alpha$  с поверхности анода.

Простые вычисления траектории движения электрона в однородном постоянном электрическом поле позволяют найти удаление от точки вторичной эмиссии в плоскости анода

$$r = 2 \frac{\varepsilon_S}{eU} L \sin 2\alpha, \quad (1)$$

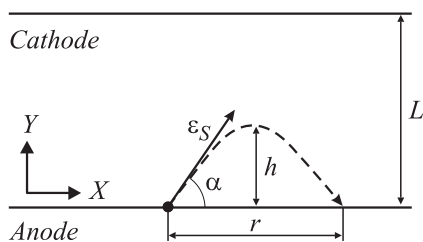
при этом максимальное удаление от анода составляет

$$h = \frac{\varepsilon_S}{eU} L (\sin \alpha)^2. \quad (2)$$

Таким образом, для внешнего радиуса кольца, образованного электронами с начальной энергией  $\varepsilon_S$ , получим

$$r_{\max} = 2L \frac{\varepsilon_S}{eU}. \quad (3)$$

Предполагая, что основную роль играют упругоотраженные электроны (они, в частности, дадут кольцо



**Рис. 2.** Модель образования кольца в плоском диоде.

максимального размера), можно считать  $\varepsilon_S/eU \approx 1$ . Следовательно, максимальный диаметр кольца равен  $D_{\max} \approx 4L$ .

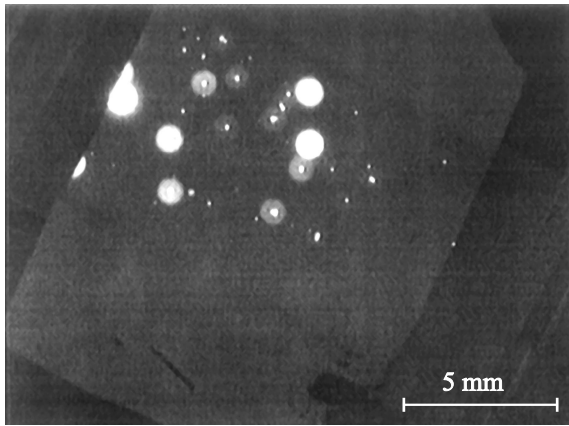
Таким образом, диаметр кольца определяется лишь расстоянием между катодом и анодом и не зависит от тока катода и напряжения анод–катод. Поскольку упругоотраженные электроны составляют лишь часть от всех вторичных электронов, выбиваемых с анода, а также с учетом того, что электроны вылетают с поверхности под различными углами, вся область от внешней границы кольца до эмиссионного изображения эмиттера будет „засвечена“.

## Экспериментальные данные

Для проверки описанной модели был проведен эксперимент по наблюдению „колец“ в плоских диодных конструкциях при различных расстояниях анод–катод. Расстояние регулировалось при помощи стеклянных спейсеров различной толщины: 200, 400 и 600  $\mu$ m. В качестве анода выступала стеклянная пластина с прозрачным проводящим покрытием и слоем люминофора.

На рис. 3 приведено изображение, полученное на люминесцентном экране при расстоянии анод–катод 200  $\mu$ m. Хорошо видно, что существует несколько ярких колец, каждое из которых образовалось вокруг индивидуального эмиссионного центра. Также нетрудно заметить, что все кольца одного диаметра, хотя, сравнивая интенсивность колец, можно заключить, что их вклады в общий эмиссионный ток различен. Таким образом, эмиссионный ток не влияет на размер кольца.

Зависимость диаметра колец от расстояния анод–катод хорошо видна на рис. 4. Она описывается формулой (3). Изменение рабочего напряжения при постоянном расстоянии анод–катод на размере кольца не сказывается. Таким образом, можно заключить, что основной механизм образования кольца состоит в упругом отражении электронов от поверхности анода.



**Рис. 3.** Эмиссионное изображение нескольких колец различной яркости (напряжение 1.8 kV, ток всего катода 80  $\mu$ A).

Для определения критической плотности тока, при которой происходит возникновение кольца, был изготовлен диод с катодом диаметром  $\sim 150 \mu\text{m}$ , т.е. заведомо меньше размера кольца при расстоянии анод–катод 600  $\mu\text{m}$ . Для такого катода, измерив полный ток, легко установить критическую плотность тока, при которой происходит зажигание кольца. Для сохранения плоской геометрии катод размещался в центре металлической пластины, плоскость которой была параллельна плоскости анода.

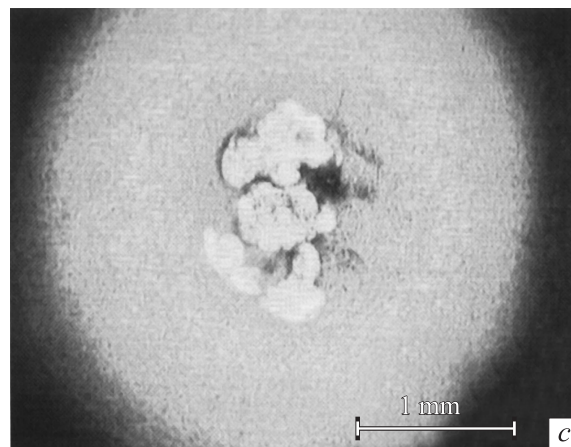
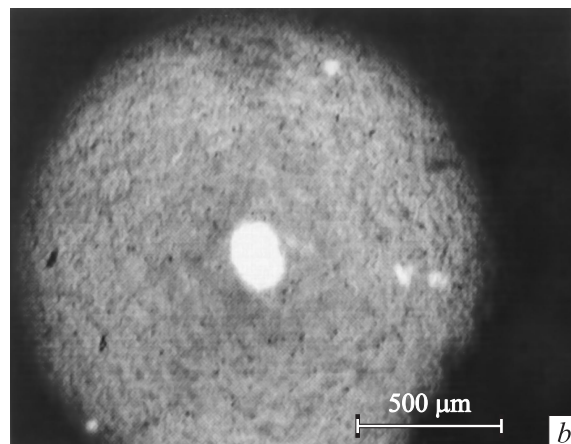
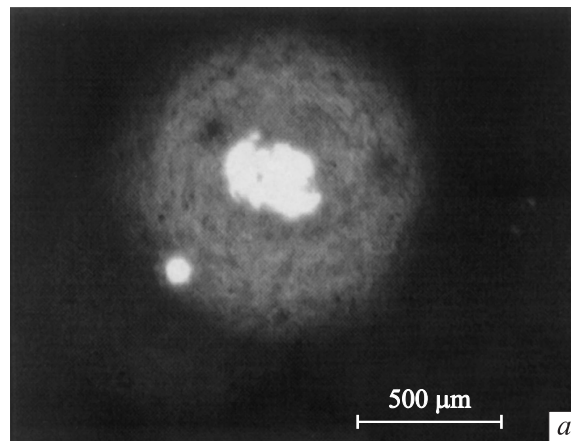
Было установлено, что кольцо начинает зарождаться при плотности тока в первичном пятне  $\sim 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ . Диаметр кольца, наблюдаемого в этом случае, также не зависел ни от тока катода, ни напряжения анод–катод и определялся выражением (3).

В работах [1–5] эффект образования кольца наблюдался в случае сферической геометрии. Анод представлял собой сферическую колбу, покрытую проводящим слоем и люминофором, в роли эмиттера выступало острие, расположенное в центре сферы. В связи с этим были проведены расчеты, аналогичные (1)–(3), откуда видно, что радиус кольца, которое должно было бы образовываться, в соответствии с приведенной теорией приблизительно равнялся бы диаметру колбы. Из этого следует, что эффект, который наблюдался при низких плотностях тока, в условиях эксперимента, описанного в работах [1–5], увидеть принципиально невозможно.

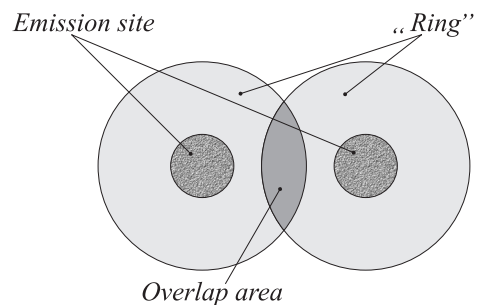
### Возможности практического применения

В зависимости от условий применения автокатода данный эффект может играть как вредную, так и полезную роль. Например, размер кольца будет ограничивать разрешение в случае плоского дисплея. Однако этот эффект может быть полезен при создании источников света на основе автоэмиссионных катодов, где необходимо добиться равномерной засветки люминофора.

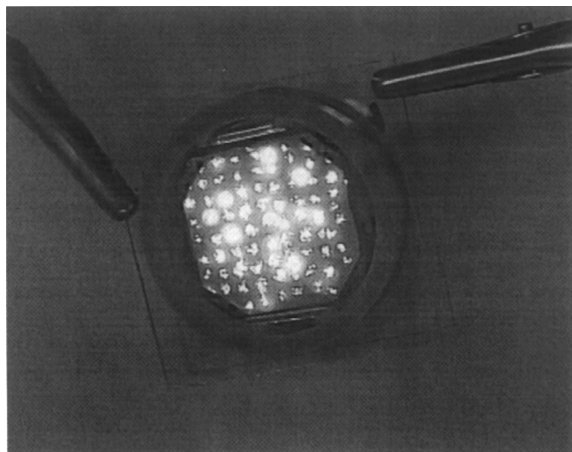
Ниже приведено описание тестовой конструкции источника света с использованием колец. Источник света состоит из двух параллельных пластин: анода и катода. Анод изготовлен из стеклянной пластины с проводящим покрытием и слоем люминофора. Расстояние между анодом и катодом устанавливается при помощи стеклянных спейсеров и составляет 0.8 mm. Катод изготовлен из графитовой фольги, приклеенной на стеклянную пластину. Эмиссионные центры располагались периодически на поверхности. Размер каждого центра около 1 mm. Рас-



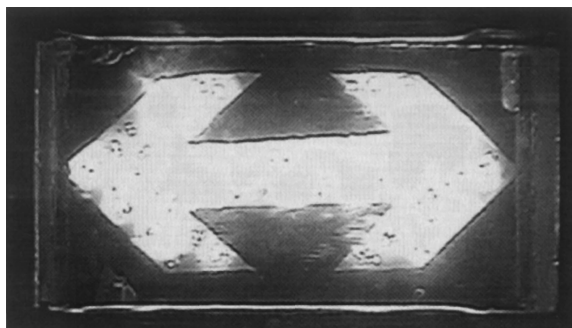
**Рис. 4.** Эмиссионные изображения колец при различных расстояниях анод–катод: *a* — 200, *b* — 400, *c* — 600  $\mu\text{m}$ .



**Рис. 5.** Взаимное расположение двух ближайших эмиссионных центров.



**Рис. 6.** Лампа с равномерной засветкой.



**Рис. 7.** Изображение статической светящейся надписи.

стояние между центрами 2.5 mm. В такой конструкции диаметр колец будет равен 3.2 mm и кольцо от одного центра не будет покрывать другой центр (рис. 5).

Это позволит избежать разрушения эмиссионного центра под действием ионов остаточных газов, образованных соседними центрами. В то же время все кольца будут перекрываться друг с другом, тем самым обеспечивая равномерную засветку анода. Конструкция была помещена в вакуумную колбу с давлением остаточных газов менее  $10^{-6}$  Торг. Затем были проведены автоэмиссионные испытания. Фотография работающего прибора приведена на рис. 6.

Еще одним из приборов, использующих кольцевую засветку, может быть статическая светящаяся надпись. На рис. 7 приведен один из вариантов такого прибора.

## Заключение

В данной работе построена модель образования колец, отличная от ранее описанных в литературе [1–6], для объяснения появления колец на автоэмиссионном изображении. Приведенная модель относится к процессам, происходящим на аноде, и поэтому может наблюдаться и наблюдается в приборах с термокатодами. Установлено, что диаметр колец зависит только от расстояния анод–катод, а интенсивность кольца определяется плотностью первичного тока и коэффициентом отражения электронов от материала покрытия анода.

Проведенные исследования показали, что обнаруженные кольца могут быть успешно использованы при создании различных приборов требующих равномерной засветки анода. Примером таких приборов являются источники света на основе автоэмиссионных катодов и статическая светящаяся надпись.

## Список литературы

- [1] Dyke W.P., Trolan J.K., Martin E.E. et al. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. N 5. P. 1043–1053.
- [2] Сокольская И.Л., Фурсей Г.Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1474–1483.
- [3] Сокольская И.Л., Фурсей Г.Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1484–1494.
- [4] Фурсей Г.Н., Толкачева И.Д. // РиЭ. 1963. Т. 8. № 7. С. 1210–1221.
- [5] Фурсей Г.Н. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 7. № 9. С. 1210–1315.
- [6] Батраков А.В., Проскуровский Д.И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 57.