

11;12

О природе "эффекта кольца" при интенсивной автоэлектронной эмиссии

© А.В. Батраков, Д.И. Проскуровский

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 14 декабря 1998 г.

Проведено моделирование траекторий электронов соответственно углового распределения эмиссионного тока с учетом саморазогрева катода и влияния на эмиссию объемного заряда. Показано, что природа колец связана с эмиссией периферических областей острия (конической части) и с компрессией тока из этих областей.

Исследованиями импульсной автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) в электронном проекторе было однозначно установлено [1–5], что при приближении к предельно высоким плотностям тока происходит характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное эмиссионное изображение. Авторы [1–5] показали, что появление яркого кольца может быть обусловлено термоавтоэлектронной эмиссией из периферийной области вершины катода при ее разогреве собственным эмиссионным током. Запаздывание появления тока в "кольце" относительно тока АЭЭ с вершины острия авторы [2–5] связали с инерционностью нагрева конической части острия. Однако сомнение в правильности такого объяснения "эффекта кольца" у авторов [2–5] вызвал тот факт, что ток в кольце за время импульса увеличивается на 2–3 порядка величины, тогда как температурная добавка к току АЭЭ в пределах применимости уравнения Фаулера–Нордгейма (ФН) [6] составляет всего несколько десятков процентов. Другая проблема, по мнению авторов [2–5], состоит в том, что при внимательном изучении эмиссионных изображений на них можно обнаружить несколько (2–3 и более) колец, и это может указывать на дифракционную природу их возникновения.

Обнаружение проявления "эффекта кольца" при длительностях напряжения в десятки наносекунд [7] привело к появлению иного объяснения природы колец [8,9]. Авторы [8,9] полагают, что при

быстром нагреве вершины острия током АЭЭ на его поверхности образуется очень тонкий слой "квазизидкого" металла. Вдоль границы, разделяющей этот слой и основной материал, распространяются волны с вертикальной поляризацией. На периферии вершины острия, где толщина жидкого слоя уменьшается, происходит увеличение амплитуды волн, отображающееся в виде колец на эмиссионном изображении. Данная модель выглядит малоубедительной, поскольку наличие жидкого металла в сильном электрическом поле ($\sim 10^8$ V/cm) за время $< 10^{-9}$ s неминуемо должно приводить к формированию конического выступа и его последующему взрыву [10].

Чтобы понять природу "эффекта кольца", нами выполнено численное моделирование поведения электронного потока в проекторе с использованием программы "SuperSAM" [11]. При этом прежде всего необходимо знать точное угловое распределение плотности тока АЭЭ по поверхности катода. Обратим внимание на тот факт, что "эффект кольца" начинает проявляться в условиях ограничения плотности тока АЭЭ пространственным зарядом эмитированных электронов [1–5]. В этих условиях существенно расширяется привершинная область автокатада, участвующая в автоэмиссии [1]. Кроме того, происходит значительное понижение электрического поля на поверхности автоэмиттера относительно значения поля, вычисленного из решения электростатической задачи, из-за экранирующего влияния пространственного заряда [12], что также необходимо учитывать при моделировании.

Модель проектора включала в себя острый катод с радиусом вершины $r_k = 0.2 \mu\text{m}$ и полууглом конической части $\Theta = 12^\circ$ и полусферический анод радиусом 2 см. Для каждого углового сегмента катода численно рассчитывалось геометрическое поле E_g , а затем с использованием выражения (3) из [12] вычислялось реальное поле E_k на этом участке катода. Эти величины E_k использовались для вычисления эмиссионной способности сегментов катода по уравнению Ф–Н. Полученные угловые распределения плотности тока при $\phi = 4.5$ eV представлены на рис. 1, *a*. Также была рассчитана вольт-амперная характеристика проектора путем интегрирования распределенной плотности тока по поверхности эмиттера (рис. 1, *b*). Кривая *c* на рис. 1, *a* соответствует моменту, когда начинается влияние пространственного заряда на ход вольт-амперной (точка *c* на рис. 1, *b*). С ростом ускоряющего напряжения существенно увеличивается доля тока, отбираемого с периферии вершины автоэмиттера. При этом вольт-амперная харак-

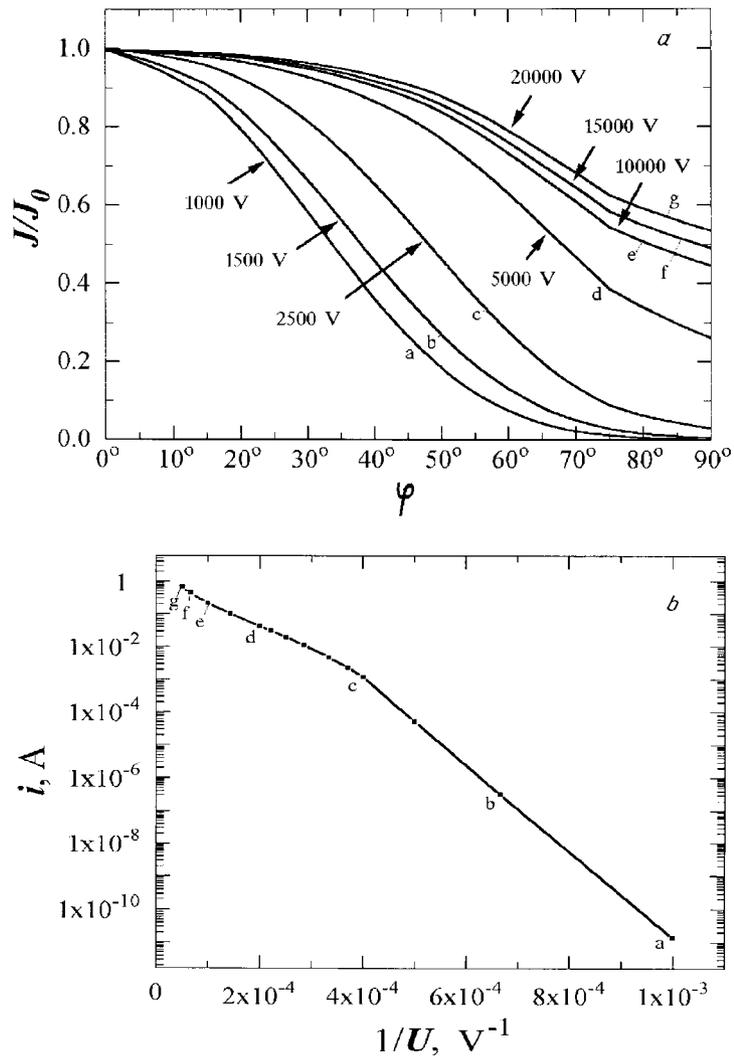


Рис. 1. Угловые распределения плотности тока на катоде (а) и рассчитанная вольт-амперная характеристика. Буквенные индексы на вольт-амперной характеристике (b) соответствуют индексам распределений плотности тока (a).

теристика все в большей степени отклоняется от характеристики Ф–Н в сторону меньших токов. Рост тока с ростом напряжения происходит как за счет роста плотности тока, так и за счет вовлечения периферии в эмиссионный процесс.

Таким образом, ключевыми являются две ситуации: АЭЭ ограничена лишь полусферической частью острия (кривые $a-c$ на рис. 1, a) и заметная доля эмиссии приходится на периферию вершины острия (кривые $d-g$). Примеры результатов моделирования электронного потока в проекторе для этих ситуаций представлены на рис. 2.

Анализируя полученные данные, можно отметить следующее. При отсутствии заметной эмиссии с конической части острия сгущение электронных траекторий на периферии электронного изображения на аноде не наблюдается (рис. 2, a , кривая 1). В случае же ограничения плотности тока пространственным зарядом электронов, когда наблюдается заметная эмиссия с боковой поверхности острия, происходит сгущение траекторий электронов, эмитируемых конической частью острия, на периферии эмиссионного изображения (рис. 2, b). Это проявляется в появлении высокого пика на угловом распределении плотности тока на аноде проектора (рис. 2, a , кривая 2). Таким образом, эмиссия с периферии действительно объясняет сам факт существования кольца на эмиссионном изображении.

Важно также было уточнить роль термодобавки к АЭЭ в проявлении "эффекта кольца". Для этого нами проведено численное моделирование нагрева острия током АЭЭ для описанной выше геометрии катода с целью выяснения влияния нагрева на угловое распределение плотности тока на катоде и аноде в близких к экспериментам [1–4] условиях. Значение E_g на вершине острия принималось равным $7 \cdot 10^7$ В/см. При этом реальные значения напряженности электрического поля и плотности эмиссионного тока вычислялись с учетом пространственного заряда эмитированных электронов. В качестве источника тепла в уравнении теплопроводности принимался лишь Джоулев нагрев. Плотность тока в теле эмиттера вычислялась путем интегрирования эмиссионной плотности тока по поверхности эмиттера. Для вычисления плотности тока АЭЭ использовалось уравнение Ф–Н для расширенного автотермоэмиссионного диапазона [6]. Поскольку это уравнение применимо при относительно небольших температурах, условием окончания импульса напряжения считался момент достижения вершиной эмиттера температуры 2000 К. В результате моделирования было установлено,

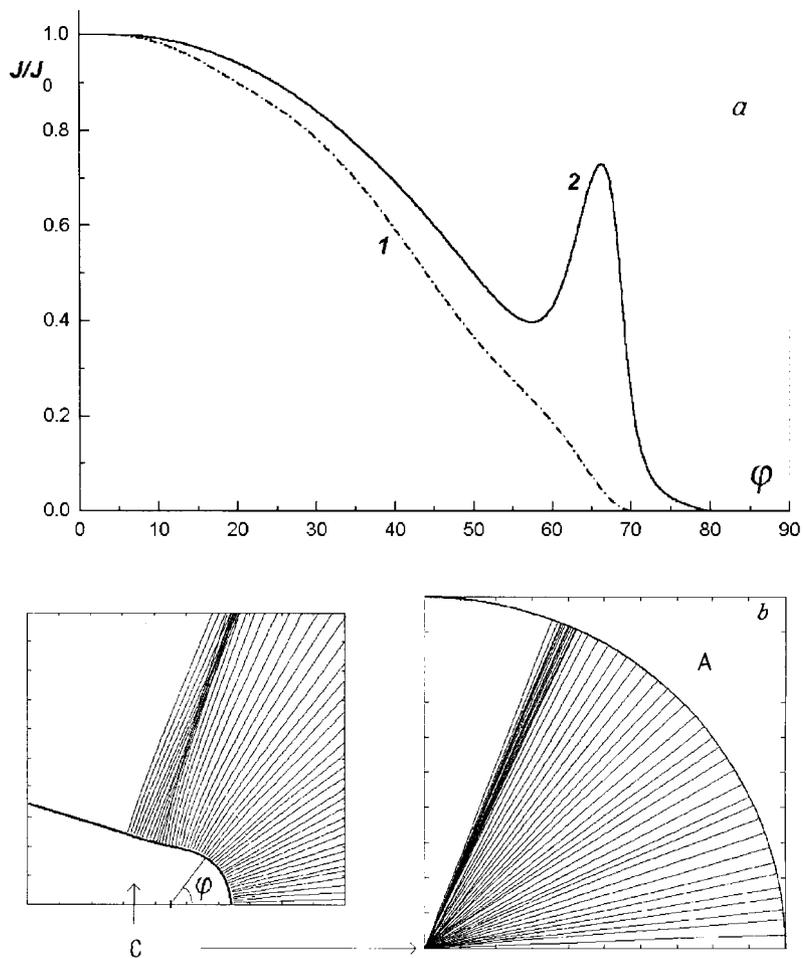


Рис. 2. Распределение плотности тока на поверхности анода (*a*) для распределений эмиссионной плотности тока согласно кривой *c* (1) и кривой *d* (2) на рис. 1 и вычисленные для второго случая траектории электронов (*b*). *A* — анод; *C* — катод.

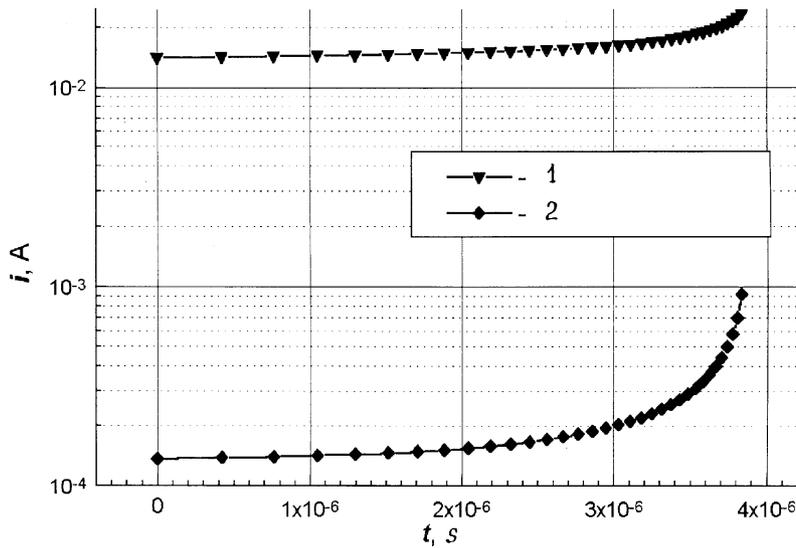


Рис. 3. Зависимости общего тока (1) и тока с периферии (2) от времени.

что переход от АЭЭ к автотермоэлектронной эмиссии приводит к резкому росту доли тока с периферии в общем токе (рис. 3). Поскольку практически весь ток с конической части острия уплотняется в кольцо, плотность тока в кольце на аноде также растет значительно быстрее, чем эмиссионная плотность тока с вершины и ток с острия в целом. Рост тока в кольце происходит как за счет увеличения эмиссионной плотности тока, так и за счет увеличения площади эмиссии. Наблюдаемое в [3–5] насыщение тока в кольце разумно связать с переходом к квазистационарному тепловому режиму эмиттера. Однако верхнее ограничение по температуре на использование уравнения Ф–Н не позволило нам осуществить моделирование нагрева острия для больших температур.

Таким образом, проведенный анализ однозначно связывает появление кольца на автоэмиссионном изображении с вовлечением периферийной части вершины острия в эмиссионный процесс. Выяснение же природы возникновения нескольких колец, возможно, потребует проведения более точного моделирования.

Авторы выражают признательность И.В. Пегелю за помощь при проведении численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-17208) и Сибирского отделения Российской академии наук (грант конкурса-экспертизы молодежных проектов 1997 г.).

Список литературы

- [1] Dyke W.P., Trolan J.K., Martin E.E., Barbour J.P. // Phys. Rev. 1953. V. 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 // 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. В. 7. С. 1310–1315.
- [6] Craig Miller H. // J. Vac. Sci. Technol. 1980. V. 17. N 3. P. 691–695.
- [7] Жуков В.М., Полежаев С.А. // РиЭ. 1988. Т. 33. № 11. С. 2360–2365.
- [8] Жуков В.М., Егоров Н.В. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 3. С. 170–173.
- [9] Жуков В.М., Егоров Н.В., Прудников А.П. // Поверхность. 1993. № 6. С. 33–37.
- [10] Батраков А.В., Попов С.А., Прокуровский Д.И. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 4. С. 280–285.
- [11] Myakishev D.G., Tunov M.A., Yakovlev V.P. // Int. J. Mod. Phys. A (Proc. Suppl.) 2B. 1993. V. 2. P. 915.
- [12] Batrakov A.V., Pegel I.V., Proskurovsky D.I. // Proc. of XVIIIth Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Eindhoven. The Netherlands. 1998. P. 44–47.