

А.С. Лейченко, Д.В. Негров, А.С. Рауфов, Е.П. Шешин
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Применение автоэмиссионного катода из терморасширенного графита для формирования элемента дисплейной матрицы

Рассматривается автоэмиссионный катод на основе терморасширенного графита латеральной конструкции в качестве источника электронов в катодолюминесцентном приборе. За счёт изменения принципа построения электронно-оптической системы достигается существенное увеличение активной площади катода на единицу площади катодной подложки относительно традиционных конструкций, а использование углеродной фольги позволяет повысить стабильность и надёжность работы прибора при сохранении высоких эмиссионных характеристик. Проводится моделирование электронно-оптической системы и траекторий электронов для прибора с катодом в виде круглого отверстия. Демонстрируется эффективность предложенной конструкции для формирования локализованного электронного пучка и создания планарного дисплея низкого разрешения на его основе. Предлагается способ изготовления катода путём лазерного облучения углеродной фольги. Обсуждается реализация предложенной конструкции в экспериментальном образце.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, катодолюминесцентные источники света, электронная оптика, углеродные материалы, лазерная обработка материалов.

Введение. Дисплейные устройства, основанные на явлении автоэлектронной эмиссии, обладают всеми преимуществами обычных ЭЛТ-дисплеев. При этом такой дисплей можно сделать очень тонким, так как он не будет требовать ни сложной электронной оптики, как ЭЛТ-дисплей, ни системы подсветки, как ЖК-дисплей [1].

Автоэлектронная эмиссия возникает при наличии у поверхности проводника высокой напряжённости электрического поля ($\sim 10^7$ В/см). Реализовать такую величину напряжённости, управляя только потенциалами электродов, крайне затруднительно и малоэффективно. Для увеличения эффективности автоэлектронного эмиттера важную роль играет форм-фактор — геометрические параметры электронно-оптической системы и самого катода как части ее. Существуют различные подходы к построению электронно-оптической системы прибора с автокатодом: spindt-технология [2], тонкопленочные эмиттеры, основанные на эффекте Малтера [3], SED (surface emission device)-технология [4] и т. д. В данной работе рассматривается система с латеральным катодом, когда эмитирующая поверхность перпендикулярна плоскости модулятора и анода. Преимуществами такой системы являются увеличение относительно spindt-систем площади эмитирующей поверхности на единицу поверхности катодной подложки [5], защита эмитирующей поверхности катода от бомбардировки ионами остаточных газов, уменьшение ёмкости межэлектродного промежутка, а также возможность использования при изготовлении приборов экономичных технологий [5, 6, 7, 8]. Системы с латеральным эмиттером уже доказали свои преимущества в различных реализациях. Однако все они сталкиваются с серьёзной проблемой. Используемые в такой конструк-

ции тонкопленочные катоды имеют малую устойчивость к процессам деградации, что делает срок службы прибора недопустимо малым.

Терморасширенный графит. Терморасширенный графит (ТРГ) — это конструкционный материал, получаемый из обеззоленного графита путём его термической обработки. Он химически инертен и термостоек. Также ТРГ хорошо поддается механической обработке и способен обеспечивать стабильную эмиссию при относительно низком вакууме и на протяжении длительного времени. Благодаря развитой поверхности ТРГ является хорошим автоэлектронным эмиттером [9].

После успешного применения катодов из углеродной фольги в классической конструкции электронно-оптической системы [10] было предложено использовать фольгу в качестве латерального катода для создания планарного источника электронов. Преимуществами использования фольги в такой конструкции являются возможность создания массива эмиссионных центров из единой пластины фольги, уменьшение размеров конечного прибора, уменьшение и высокая точность установки межэлектродных расстояний, существенное увеличение площади эмитирующей поверхности автокатода и, как следствие, увеличение предельных рабочих токов конечного прибора. Для точечного эмиттера $S_T \sim r^2$, для латерального $S_{\text{л}} \sim D_{\text{к}} \cdot h$, где r — радиус закругления острия, $D_{\text{к}}$ и h — диаметр и толщина латерального катода. Поскольку $D_{\text{к}} \gg r$, а $h \sim r$, то получаем $S_{\text{л}} \gg S_T$.

Моделирование электронно-оптической системы. Для более детального понимания работы предлагаемого прибора проведено моделирование электронно-оптической системы. Исследовалось плоское автоэлектронное устройство вертикальной конструкции и подкатодным модулято-

ром. Исследование подобной конструкции с катодами из углеродных нанотрубок представлено в работе [11]. Конструкция устройства изображена на рис. 1.

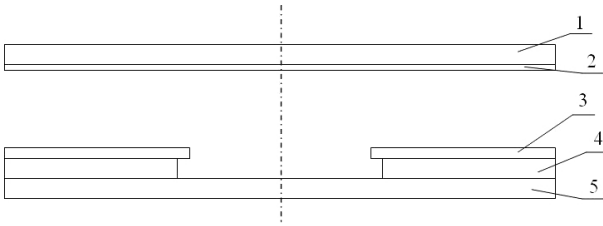


Рис. 1. Конструкция устройства. 1 — анод (стекло с ITO-слоем), 2 — слой люминофора, 3 — катод (TRG), 4 — изолятор, 5 — модулятор

Для использования такой конструкции в качестве пикселя автоэмиссионного дисплея необходимо, чтобы изображение, формируемое электронами на аноде, было не больше определённого диаметра.

В данной конструкции электроны, эмитированные с торца катода, будут двигаться преимущественно к центру конструкции за счёт модулятора. На рис. 2 показан результат численного решения уравнения Лапласа и уравнений движения электронов вблизи эмитирующей части катода. Видно, что траектории электронов (показаны чёрным), начинающиеся на эмиттере, направлены к центру конструкции.

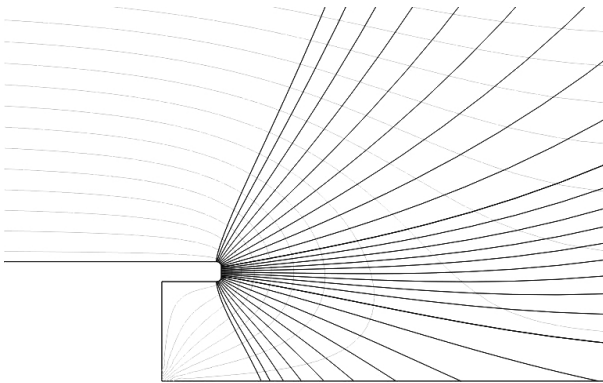


Рис. 2. Результат моделирования траекторий электронов вблизи эмитирующей части катода

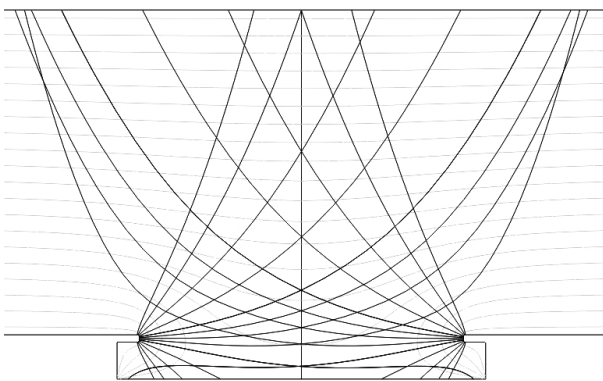


Рис. 3. Траектории электронов в автоэлектронном источнике света

Благодаря этому диаметр изображения можно сделать примерно равным диаметру отверстия

в катоде при подходящем положении анода. На рис. 3 показан результат моделирования всей конструкции в целом. Размер изображения действительно примерно соответствует размеру отверстия в катоде.

Также можно видеть, что токоперехват не превышает 30%. При этом, если использовать для модулятора материал с высоким коэффициентом вторичной эмиссии [7], возможно увеличить эффективность за счёт вторичных электронов, эмитирующих с модулятора.

Возможные траектории вторичных электронов показаны на рис. 4. Также видно, что они фокусируются благодаря полю, создаваемому катодом.

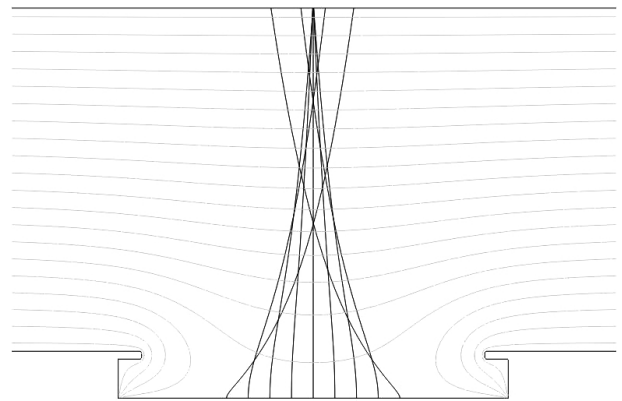


Рис. 4. Возможные траектории вторичных электронов

Итак, мы видим, что такое устройство хорошо подходит на роль пикселя или субпикселя для дисплейной матрицы благодаря небольшому размеру изображения на аноде. Процесс изготовления матрицы ввиду простоты конструкции отдельных элементов также представляется довольно простым и технологичным.

Эксперимент. Для реализации предложенной конструкции необходимо формирование отверстий в фольге TRG. При этом эмитирующая поверхность образуется на срезе фольги выпирающими «чешуйками». Нами рассматривались два вида обработки: механическая (протыкание, вырезание, сверление) и лазерная. При обработке лазерным излучением за счёт сверхбыстрого нагрева поверхности происходит изменение её структуры [12]. В случае латерального катода лазерное излучение используется для создания отверстий в катодной пластине и одновременно формирования по периметру этих отверстий развитой эмитирующей поверхности. Управляя мощностью и диаметром лазерного луча, можно создавать катодные отверстия определённой формы и морфологии.

Было проведено сравнение эмиссионных характеристик катодов обоих типов обработки. Катоды одинаковых геометрических размеров помещались в идентичные электронно-оптические системы. Проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в диодном режиме, где анодом служил модулятор (рис. 1). Характерные

ВАХ диодов с катодами, прошедшими различную обработку, представлены на рис. 5. Рабочие напряжения катодов после лазерной обработки в 3 раза ниже, а форм-фактор, оцененный с помощью тео-

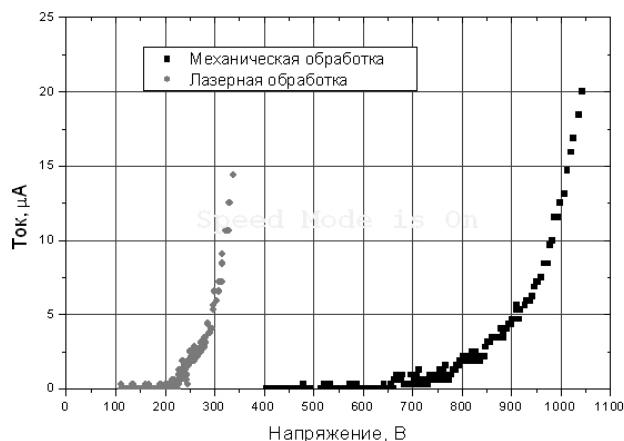


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики диодов с катодами, прошедшими различную обработку, в обычных координатах — слева и координатах Фаулера–Нордгейма — справа

На основании полученных результатов было решено использовать лазерную обработку фольги для формирования катодных отверстий.

Дальнейшие испытания катодов проводились в триодной конструкции: катодная пластина, отделенная от модуляторной подложки слоем изолятора контролируемой толщины с отверстиями в областях катодов, модуляторная пластина представляла собой стекло с проводящим слоем серебра, на расстоянии 3 мм от модуляторной пластины при помощи изолирующих спейсеров устанавливался люминесцентный анод. Во время эксперимента в системе поддерживалось давление порядка 10^{-6} Торр. На рис. 6 представлен триод.



Рис. 6. Автоэмиссионное изображение латерального катода ($U_a = 1500$ В, $U_m = 500$ В, $I_k = 10$ мкА)

Характерный размер автоэмиссионного изображения катода ~ 1 мм практически совпадает с

диаметром катодного отверстия, что подтверждает предположения, сделанные в ходе моделирования электронно-оптической системы.

При увеличении эмиссионного тока и приближении к предельно высоким плотностям тока происходило характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное автоэмиссионное изображение, что связано с вторичной эмиссией электронов с поверхности анода. Подробное описание данного эффекта приведено в работе [12]. Этот эффект может быть нейтрализован добавлением защитной сетки у анода или использованием материалов с малым коэффициентом вторичной эмиссии, если необходима качественная локализация области люминесценции, соответствующей отдельному катоду (создание автоэмиссионного дисплея). В случае, когда нужно увеличить равномерность засветки анода, кольца вторичной эмиссии дают положительный эффект.

При увеличении эмиссионного тока и приближении к предельно высоким плотностям тока происходило характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное автоэмиссионное изображение, что связано с вторичной эмиссией электронов с поверхности анода. Подробное описание данного эффекта приведено в работе [12]. Этот эффект может быть нейтрализован добавлением защитной сетки у анода или использованием материалов с малым коэффициентом вторичной эмиссии, если необходима качественная локализация области люминесценции, соответствующей отдельному катоду (создание автоэмиссионного дисплея). В случае, когда нужно увеличить равномерность засветки анода, кольца вторичной эмиссии дают положительный эффект.

Закключение. Использование углеродной фольги в качестве материала латерального автоэмиссионного катода позволило увеличить площадь рабочей поверхности катода, снизить токовую нагрузку на отдельные эмиссионные центры, уменьшить габариты прибора и размер автоэмиссионного изображения отдельного катода. Предложенная конструкция может быть использована для создания плоского дисплея, источника света большой площади, а также других электровакуумных приборов с мощным безынерционным источником свободных электронов.

Литература

1. *Arfaoni I. [et al.]. Toward lighting devices and flat panel displays based on carbon nanotube field emitter // IVESC Proc. — 2002. — P. 139.*

2. *Spindt [et al.]*. Field emission cathode structures and devices utilizing such structures // US Patent 3,755,704. — 1973.

3. *Fink R.L., Tolt Z.L., Theusen L.H., Yanuv Z., Kasano K., Tatsuda K.* // Proc. Int. Displays Workshop. — 1999. — FED1-5. — P. 911–912.

4. *Sagawa M., Kusunoki T., Suzuki M., Tsuji K.* // SID 01 Digest. — 2001. — V. 14.2. — P. 193–195.

5. *Abanshin N.P. [et al.]*. Thin-film planar edge-emitter field emission flat panel display // US Patent 6,590,320. — 2003.

6. *Johnson B.R., Aikinwande A.I., Murphey D.* // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1997. — V. 15. — P. 535–538.

7. *Karpov*. Edge emitter with secondary emission display // U.S. Patent 6,023,126. — 2000.

8. *Takeuchi Yu. [et al.]*. Electron emitting device and field emission display using the same // U.S. Patent 7,088,049. — 2006.

9. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и авто-эмиссионные свойства углеродных материалов. — М.: МФТИ, 2001.

10. *Leychenko A.S., Starikov P.A., Shehin E.P.* Electron source based on the carbon foil field emission cathode // Proceedings of IFES. — 2008.

11. *Choi Y.U. [et al.]*. A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display // Applied surface science. — 2004. — V. 221. — P. 370–374.

12. *Образцов А.Н. [и др.]*. Влияние лазерного облучения на морфологию и эмиссионные свойства наноуглеродных плёнок // ЖТФ. — 2005. — Т. 75, вып. 6. — С. 136–139.

13. *Никольский К.Н., Батурин А.С., Князев А.И., Чесов Р.Г., Шешин Е.П.* Образование колец вокруг первичного эмиссионного изображения и возможности их практического использования // ЖТФ. — 2004. — Т. 74, вып. 2. — С. 110–113.

Поступила в редакцию 06.10.2009.