

## РАСЧЕТ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ELCUT

Лыткин Л.К.<sup>1</sup>, Филатов Г.А.<sup>1</sup>, Цепилов Г.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «ТЕХНОКОМПЛЕКТ», (ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»), 141981, Московская обл. г. Дубна, ул. Школьная д. 10а. E-mail: nio@techo-com.ru.

Исследования полевой эмиссии электронов углеродными и алмазоподобными плёнками, также фуллеренами и нанотрубками вызывают в настоящее время повышенный интерес. Низковольтные холодные катоды с малым порогом по напряжению на основе таких структур найдут широкое применение в электровакуумных приборах различного типа. Однако низкая воспроизводимость традиционных структур при выполнении технологических процессов, и, как следствие, нестабильность их автоэлектронной эмиссии, требуют рассмотрения большого количества моделей таких приборов. Сложность геометрий электрических полей и потоков частиц в них не поддаются аналитическому рассмотрению, приходится прибегать к численному моделированию. Из довольно большого выбора программ в работе рассмотрен программный комплекс ELCUT, позволяющий решать большой ряд задач полевой эмиссии и моделирования эмиссионных полевых приборов. Показано использование этого комплекса для расчета электростатических полей в диодных и триодных структурах приборов, а так же для оценки потоков эмитируемых электронов полевыми катодами и обратных потоков ионов попадающих на катод и разогревающих его. Расчёты позволяют учесть неоднородность распределения напряжённости поля по эмитирующей поверхности катода, эффективность облучения катода ионами из различных точек объёма прибора.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, автоэмиссионная структура, алмазоподобные пленки.

## CALCULATION OF AUTOEMISSION STRUCTURES IN THE PROGRAM ELCUT

Lytkin L.K.<sup>1</sup>, Filatov G.A.<sup>1</sup> Tsepilov G.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>"TECHNOCOMPLEKT" JSC, Shkolnaya str., 10-a, Dubna, Moscow region, Russia, 141981, E-mail: nio@techno-com.ru

Of great interest one have in investigation field electrons emission by carbon and diamondlike thin film, fullerene and nanotubes. The cold cathodes with low electric field threshold emission have been attracted more and more attentions for its important applications in vacuum electronic devices. However, the present cold cathodes do not have so good performance, stability emission that it can be considered as commercial application on large scale. All of that need to be considered large number of geometric models device. Complicacy of the field distribution and particles flow do not fall under analytical solution. One need numerical simulation. The authors perform of used the soft ELCUT for numerical estimation any parameters of diode and triode geometry with field emission cathode like the geometric field enhancement, nonuniformity this parameter on surface area of emitter, intensity of the ions flow from different area volume of the device.

Keywords: autoelectronic emission, autoemission structures, diamond-like films.

Исследования полевой эмиссии электронов углеродными и алмазоподобными плёнками, также фуллеренами и нанотрубками вызывают в настоящее время повышенный интерес. Низковольтные холодные катоды на основе таких структур найдут широкое применение в электровакуумных приборах различного типа. Основной отличительной характеристикой эмиссии таких структур являются аномально малые величины порогового электрического поля  $E_p$ , при которых начинается эмиссия, причём минимальные значения коррелируют с более мелкодисперсными структурами. Однако низкая воспроизводимость традиционных структур при выполнении технологических процессов, и, как следствие, нестабильность их автоэлектронной эмиссии, препятствуют широкому промышленному применению таких катодов. Кроме того, при длительной эксплуатации приборов с автоэмиттерами,

изготовленными по традиционной технологии, происходит непредсказуемая деградация отдельных микроэмиттеров, связанная с их тепловым разрушением при прохождении автоэмиссионного тока через острие и вследствие бомбардировки ионным потоком.

### **Цель исследования**

Двухэлектродная система является простейшей электронно-оптической системой на основе полевого электронного катода, позволяющей получить эмиссионный ток. Однако, вследствие необходимости устранения недостатков в работе полевых эмиттеров, большинство электровакуумных приборов имеют более сложную структуру.

Триодные системы, по сравнению с диодными, позволяют учитывать влияние дополнительного электрода (модулятор, затвор, сетка). Модулятор обеспечивает быстрое управление эффективностью эмиссии. Данный электрод позволяет менять поле вблизи вершины эмиттера в значительных пределах при небольшом значении потенциала, что способствует снижению рабочего напряжения во всей системе.

Явление полевой эмиссии, при которой поле, вызывающее эмиссию, является одновременно и управляющим, и фокусирующим, требует учет влияния всех электродов исследуемой системы. В реальных электронно-вакуумных приборах всегда присутствуют элементы, изготовленные из диэлектриков, например, в качестве крепежных элементов, таким образом, для приборов на основе полевых эмиттеров для расчета электростатического потенциала следует учитывать влияние диэлектриков, входящих в рассматриваемую модель.

### **Материал и методы исследования**

Исследование закономерностей формирования электронных и ионных потоков в автоэмиссионных структурах является всегда актуальным для получения информации, принципиально необходимой для выявления путей повышения качества электронно-оптических систем и микровакуумных приборов в целом. В связи с этим возникает необходимость рассматривать большое количество моделей электронно-оптических процессов в различных автоэмиссионных структурах. Моделирование их сводится, в основном, к следующему:

- определению распределения поля электростатического потенциала и его напряженности путём решения уравнения Лапласа с граничными условиями, соответствующими заданным потенциалам всех электродов структуры;
- определению плотности распределения автоэмиссионного тока по поверхности эмиттера в соответствии с законом Фаулера–Нордгейма и генерации электронов с начальными условиями по координатам и скоростям;
- интегрирование уравнений движения автоэлектронов в найденном электрическом поле;

- генерации начальных скоростей ионов остаточного газа и материала электродов согласно функции вероятности столкновения атомных частиц;
- интегрирование уравнений движения ионов в найденном электрическом поле и расчёт плотности токов на каждый электрод автоэмиссионной структуры.

Другой важной задачей, дающей обоснование феноменологии закона Фаулера–Нордгейма, является квантовомеханическое исследование механизмов туннелирования и получение вольт – амперных характеристик микроструктур вакуумных приборов.

Используемые для решения полевых задач численные методы требуют большого количества вычислений, поэтому для усовершенствования процесса расчета на базе данных методов создано большое число программных продуктов. Некоторые программные средства, которые могут применяться для решения полевых задач автоэмиссионных структур и приборов, приведены в [3].

Общей характеристикой таких программ как ANSYS [1,2], Maxwell [4] и ELCUT [5] является решение полевой задачи на основе метода конечных элементов.

ELCUT при сравнении вышеупомянутых программ на первый взгляд обладает ограниченными возможностями. Программирование произвольных трехмерных объектов в ELCUT возможно только для множества объектов, являющихся с точки зрения геометрии телами вращения, а осесимметричные задачи решаются и дают те же результаты, что и в трехмерной постановке. Начиная с версии ELCUT 6.0, геометрическая модель в 3D образуется преобразованием с 2D геометрии (плоскостного чертежа) в 3D объемную модель. Каждый объект чертежа вытягивается в третье измерение заданием высот. Преимуществом же ELCUT безусловно является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, большое количество примеров, поставляемых с программой, а также развитые возможности по обработке результатов расчета и низкая стоимость лицензии.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Пользователь сам определяет различные виды геометрий как в диодных, так и триодных структурах. Программа ELCUT позволяет подбирать шаг сетки конечных элементов автоматически. Например, на рисунок 1 автоматически подобран шаг сетки конечных элементов (зеленый цвет) для модели диода, представленного в виде трёхострийного катода. Лучше всего вариации шага сетки видно на геометрии с неравными высотами пирамидок. Последним этапом задания условий решаемой задачи является указание желаемых физических свойств в геометрии пользователя и определение граничных условий в ELCUT. Граничные условия для уравнения Лапласа в этой простой задаче задаются только на катоде (выделен красным) и аноде (верхняя линия сетки). На открытых краях сетки (геометрии)

предполагается симметричное распределение поля. Программа автоматически выполняет эти условия.

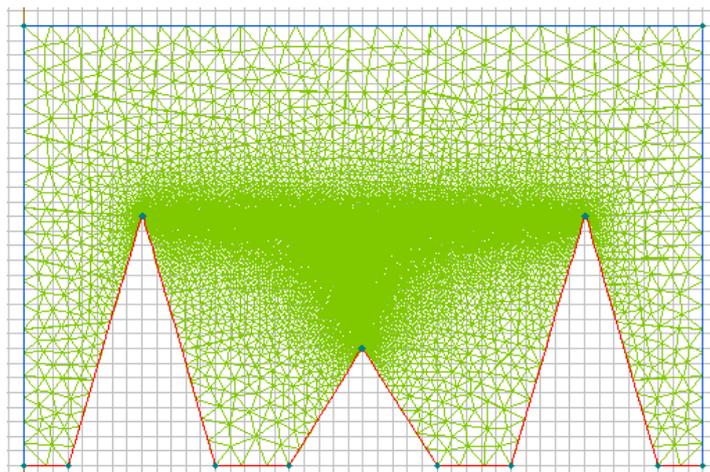


Рис. 1. Сетка для модели диода

Высокие острия создают напряжённость поля в области острия существенно большее по величине и в более широкой области. Таким образом, повышается рабочая эмитирующая поверхность острия. В ранних исследованиях эффект увеличения эмитирующей площади не учитывался.

При сравнении величины измеренного в эксперименте тока автоэмиссии, учёт геометрического фактора лишь через коэффициент усиления поля  $\beta_g$  в уравнении Фаулера – Нордгейма не совсем корректен. Уравнение записано для плотности эмиссионного тока, поэтому для получения фактической величины тока, измеряемого на экспериментах, необходимо определять (знать) площадь области эмиссии. Вариация напряженности электрического поля по поверхности эмиссии приводит к необходимости либо использовать усреднённое значение напряжённости поля, либо решать интегральные соотношения для уравнений Фаулера-Нордгейма.

Программный комплекс ELCUT, в том числе способен выдавать расчетные значения напряженности электрического поля в узлах сетки. На рисунке 2 графически представлен расчет напряженности электрического поля для геометрии катода изображенного на рисунке 1 (чем больше величина напряженности, тем светлее линии). Кроме того, на рисунке 2 представлены треки электронов (розовые кривые), исходящие из вершины правой пирамидки. Задавая энергию и углы вылета электронов из катода, можно оценить коэффициент сбора электронов на аноде  $\alpha$ .

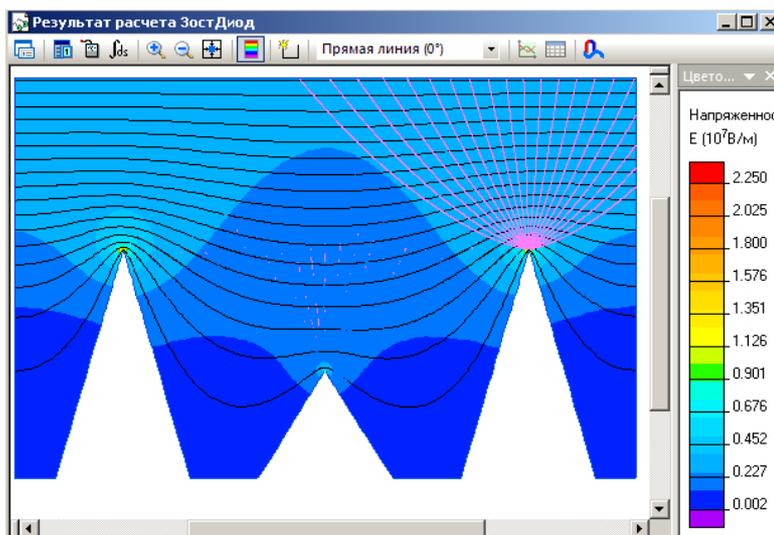


Рис.2. Расчет электростатических полей для модели диода

Рассмотрим для модели триода с плёночным катодом расчет электростатических полей, траектории эмитируемых полевыми катодами электронов и траектории обратных ионов, попадающих на катод и разогревающих его. Распределение напряженности электрического поля в области катода представлено на рисунке 3. Величина поля в области катода определяется значениями напряженности на электродах и геометрией катода, в частности его радиусом и высотой.

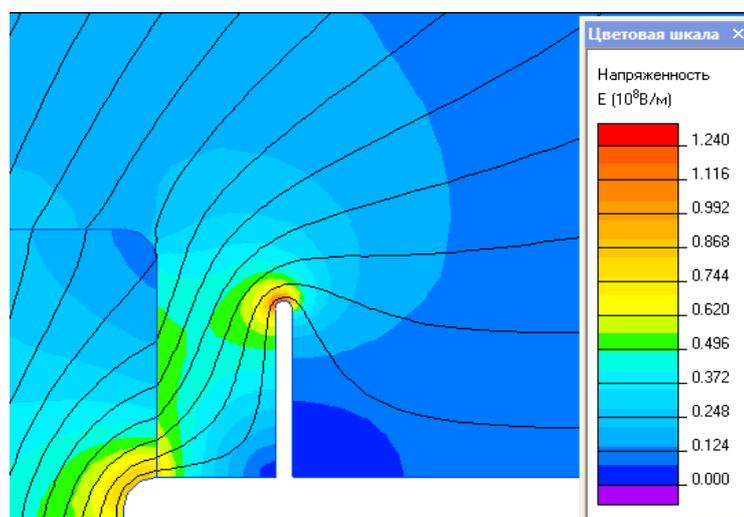


Рис.3. Распределение напряжённости (E) электрического поля в триоде в области катода

Конструкция управляющего электрода должна обеспечивать как высокую напряжённость электрического поля в области катода, так и защиту острий от облучения их обратным потоком ускоренных ионов. Источником ионов может являться любое вещество, находящееся между катодом и анодом и подвергающееся бомбардировке эмитируемым электронным пучком, или находящееся в области высокой напряжённости электрического поля. Это, в первую очередь, сам анод и управляющие электроды, поддерживающие диэлектрики, а также остаточный газ. При этом в отличие от элементов конструкции, ионы

остаточного газа не имеют фиксированной точки рождения, поэтому необходимо обследовать обширную область, откуда ускоренные ионы могут бомбардировать острия катода. ELCUT позволяет задать координаты источника ионов, энергию и углы вылета, массу ионов, количество исходящих траекторий из данной точки пространства. Количество траекторий, достигших катода, даёт оценку эффективности облучения ионами катода из выбранной области.

Траектории электронов с катода на анод представлены на рисунке 4 (слева). Из рисунка отчетливо видно, что конфигурация геометрии триода не является помехой на пути траекторий электронов с катода на анод. Траектории ионов с поверхности анода представлены на рисунке 4 (справа). Сетка в триоде выступает также и в роли защиты катода от ионного потока с анода. Рисунок 4 (справа) наглядно демонстрирует, что в данной геометрии, ионы с анода не являются причиной для разрушения пленочного катода.

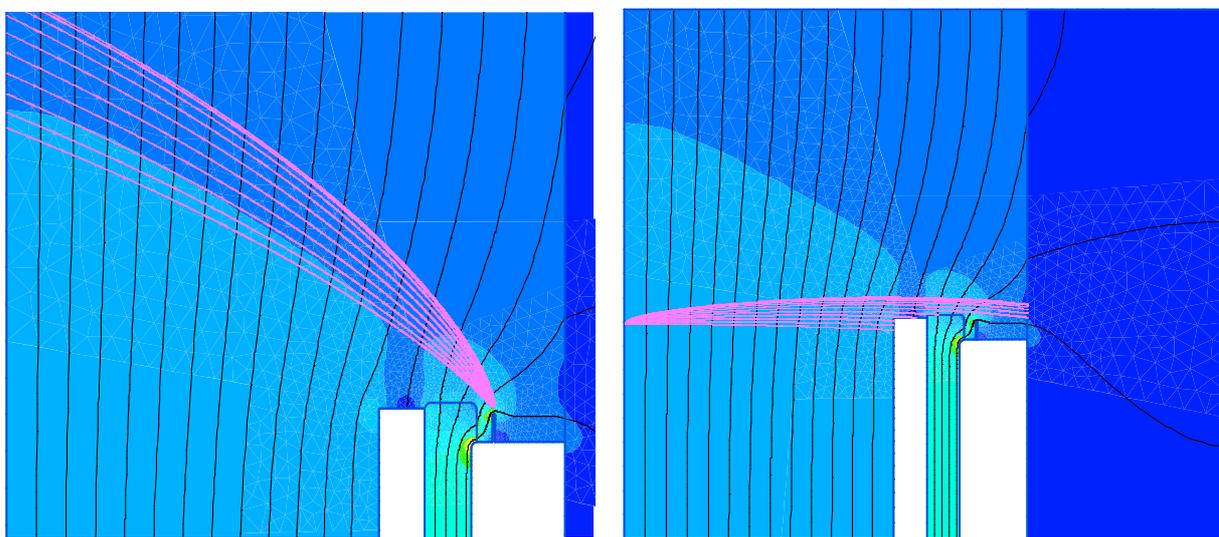


Рис.4. Траектории электронов с катода (слева).

Траектории ионов с анода (справа)

### Заключение

В работе мы принципиально не оперируем числовыми значениями, поскольку вариантов возможных геометрических решений множество и, конкретные числа будут относиться к конкретным геометриям, окончательные решения которых в работе не приведены.

*Расчет автоэмиссионных структур проводится в рамках работы по разработке перспективных технологий и конструкций изделий интеллектуальной силовой электроники для применения в аппаратуре промышленного назначения и в специальных системах (триод с автоэмиссионным катодом на основе алмазоподобных пленок) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 14.429.11.0001 от 03 октября 2013 г.*

## Список литературы

1. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. — М.: ДМК Пресс, 2005. — С.640.
2. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. — М.: Издательство МЭИ, 2003.
3. Шевченко С. Ю., Волохин В. В., Окунь А. А. Анализ программных средств расчета электрических полей установок высоких напряжений. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» — 2011. — Вип. 49: — Техніка та електрофізика високих напруг. — С. 190-194.
4. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v 11. – User’s guide./ Ansoft corporation. — Pittsburgh, Ansoft corporation, 2006.
5. Elcut. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 6 Руководство пользователя [Электронный ресурс]. / ООО «ТОР». – СПб: ООО «ТОР», 2013. — 259 с. URL: <http://elcut.ru/demo/manual.pdf> (дата обращения: 10.09.14).

### Рецензенты:

Акишин П.Г., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник (доцент), заместитель начальника отдела, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна;

Иванов В.В., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник (доцент), главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.