

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МАССИВЕ ОСТРЫХ КАТОДОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Шинкевич И.А.

Данилюк А.Л. – к.ф.-м.н., доцент

В данной работе приводятся результаты математического моделирования зависимости величины напряженности электрического поля на острие катода от геометрии исследуемой структуры. Для моделирования была выбрана простейшая катод-анодная структура, состоящая из подложки, нескольких углеродных нанотрубок и анода. Моделирование проводилось с использованием модуля "Electrostatics" программы "Comsol Multiphysics" версии 5.2.

Одной из основополагающих операций в вакуумной электронике является инжекция носителей заряда из металла (либо полупроводника) в вакуум в достаточном количестве и с малым разбросом по энергиям для последующего использования в конструируемом приборе [1]. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных способов инжекции электронов из катода в вакуум является автоэлектронная эмиссия из системы острых катодов [2]. Зависимость плотности тока эмиссии от напряженности электрического поля на острие катода  $E$  описывается уравнением Фаулера-Нордгейма [3]. Для расчета величины  $E$  в данной работе используется программный пакет Comsol Multiphysics, в котором решается уравнение Лапласа для массива вертикально ориентированных острых катодов, находящихся в электрическом поле  $E_0=U/h$ , где  $U$  – потенциал, прикладываемый между анодом и подложкой,  $h$  – расстояние между ними.

Для моделирования электрического потенциала использовался модуль «Electrostatics» программы «Comsol Multiphysics». Работа данного модуля основывается на решениях систем уравнений Максвелла в том или ином виде, которые дополнены материальными соотношениями, законом Ома и уравнением непрерывности для токов. Для расчета величин электрического потенциала в выбранной нами структуре использовалось решение уравнения Гаусса в диэлектрической среде.

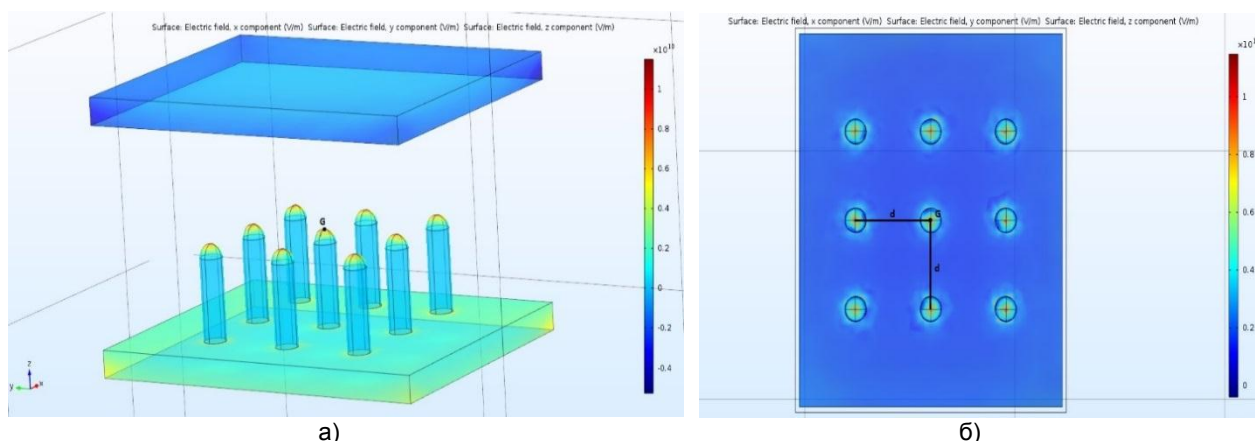


Рис. 1 – 3d модель исследуемой структуры; а) вид сбоку; б) вид сверху.

На рисунке 1 представлена исследуемая структура, состоящая из подложки, массива углеродных нанотрубок, выполняющих роль катодов, и анода. Высота каждой трубки – 174 нм, радиус – 50 нм. Производилось измерение величины напряженности электрического поля на острие центральной нанотрубки (точка G) при изменении расположения соседних нанотрубок относительно центральной (изменение величины  $d$ ). Расстояние изменялось от 100 нм до 250 нм с шагом в 10 нм. Величина напряжения между анодом и подложкой оставалась неизменной, и составляла 1000 В. Величина среднего поля между пластинами при этом составляет  $E_0=2 \cdot 10^9$  В/м.

Результаты математического моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменения напряженности электрического поля в зависимости от расстояния между нанотрубками

d, нм	100	110	120	130	140	150	160	170
E, В/м	$4,29 \cdot 10^9$	$4,47 \cdot 10^9$	$4,04 \cdot 10^9$	$4,13 \cdot 10^9$	$4,54 \cdot 10^9$	$4,30 \cdot 10^9$	$4,03 \cdot 10^9$	$4,14 \cdot 10^9$
d, нм	180	190	200	210	220	230	240	250
E, В/м	$3,97 \cdot 10^9$	$4,13 \cdot 10^9$	$4,26 \cdot 10^9$	$4,31 \cdot 10^9$	$4,04 \cdot 10^9$	$4,21 \cdot 10^9$	$3,95 \cdot 10^9$	$4,10 \cdot 10^9$

Для наглядности на рисунке 2 результаты моделирования представлены в виде графика.

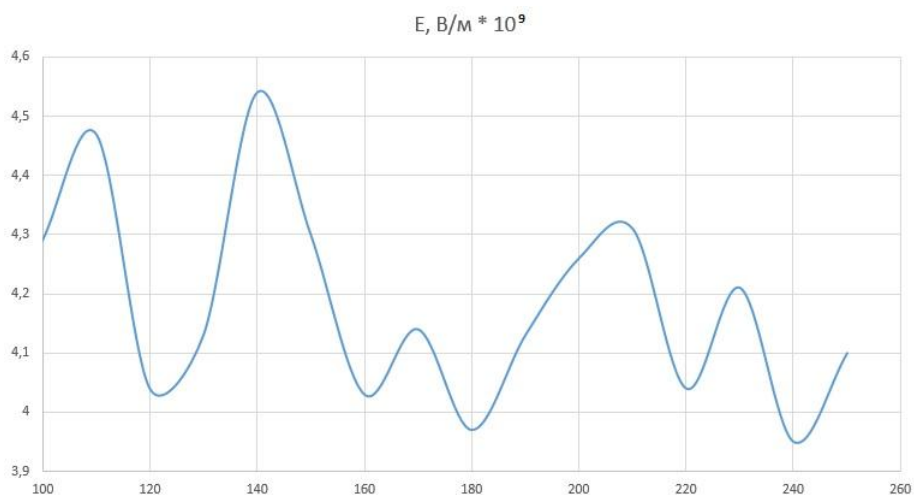


Рис. 2 – Графическое изображение зависимости напряженности электрического поля от геометрии расположения нанотрубок.

Как видно из графика на рисунке 2 зависимость напряженности электрического поля на острие центрального катода от взаимного расположения нанотрубок носит сложный нелинейный характер, близкий к синусоидальному. Средний коэффициент усиления поля, определяемый отношением напряженности поля на вершине нанотрубки к ее средней величине  $E_0$  составляет от 2 до 2.25.

Полученные результаты отличаются от известных в литературе тем, что обычно наблюдается нелинейная зависимость от расстояния  $d$  только с одним максимумом. Наличие многопиковой зависимости говорит о том, что в трехмерном случае возникают дополнительные факторы, влияющие на распределение напряженности электрического поля в массиве нанотрубок. Эти факторы могут быть связаны с распределением заряда в нанотрубках и экранированием электрического поля отдельной нанотрубки полями соседних нанотрубок. Исследование этих факторов требует проведения дополнительных расчетов.

Полученные результаты необходимы для дальнейших исследований трехмерного распределения электрических полей в вакуумных наноструктурах.

Список использованных источников:

1. Трубецков Д.И. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике / Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. – Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1996. 238 с.
2. Тарасенко Н.И. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе / Тарасенко Н.И., Кравченко В.Ф. – М: ФизМатЛит, 2006. – 192 с.
3. Fuzinato F. Field Emission Simulations of Carbon Nanotubes and Graphene with an Atomic Model/ Fuzinato F. / Journal of Nanomaterials and Molecular Nanotechnology – 2014 – Vol. 3, Issue 4 1000153.