

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Излагаемая в книге работа была начата несколько лет назад, когда М. В. Карасев познакомил авторов с сотрудниками МИЭТ\* Н. А. Дюжевым и М. А. Махибородой. В их докладе на семинаре было сказано, что математическим моделированием эмиссии электронов из малоразмерных катодов мало кто занимался. Основной проблемой, которую они называли, было моделирование теплопереноса с возможным проплавлением катода.

Глобальное (далее в книге объясняется, что означают эти слова) описание теплопереноса с учетом проплавления может быть дано в рамках системы фазового поля — современного обобщения задачи типа Стефана. Модель фазового поля уже около 15 лет изучалась в математической литературе, но специалистам в области электроники, как оказалось, не была известна. Результат внедрения этой модели излагается в предлагаемой читателю книге.

Отметим, что в книге Г. Фурсея\*\* подробно изучен процесс туннелирования электронов для полупроводников и металлов. Однако в этой работе в результате численного моделирования получается очень высокая температура катода, но возможность проплавления не учитывается.

Предварительные результаты, полученные авторами монографии ранее в результате исследования процесса эмиссии электронов изложены в статьях [2–4].

Монография в основном посвящена математическому моделированию — описанию математической модели теплопереноса в кремниевом катоде малого (нано) размера с учетом возможного частичного расплавления. Математически это сложная задача, и полностью свойства решения системы фазового поля, на которой основано наше исследование, не описаны. Мы приводим известные аналитические результаты. Но основная мысль, которую мы проводим в этой книге, следующая. Вместо чисто математического подхода можно исполь-

---

\* Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

\*\* G. Furcey “Field Emission in Vacuum Microelectronics” [1].

зовать подход, основанный на понимании структуры решения и компьютерных вычислений. Понимание структуры решения может быть основано на построении и изучении свойств асимптотических решений. Дальнейшее сравнение результатов численных экспериментов с асимптотическими решениями позволяет делать заключение о характеристиках процесса.

Далее, не все детали физических процессов, происходящих в катодe (особенно при появлении жидкой фазы), описаны в соответствующей литературе. Поэтому при численных экспериментах мы делали некоторые дополнительные предположения, которые основаны больше на здравом смысле, чем на физической теории (см. раздел 4.7). Полученные при этом результаты могут оказаться полезными при дальнейших экспериментах и развитии физической теории. Кроме того, в книге кратко приведены сведения из физической литературы, поясняющие свойства математической модели.

Все физические параметры, входящие в нашу модель, могут быть определены из физической литературы — различных справочников и т.д. Единственное исключение — это выражение, описывающее эффект Ноттингама. Все физические константы, входящие в него, известны, однако сама формула получена на основе туннелирования через потенциальный барьер из полуплоскости в пространство. Таким образом, реальная геометрия катода в этой формуле не учитывается. На практике этот учет осуществляется с помощью так называемого «форм-фактора» — множителя, входящего в выражение для потока тепла с поверхности эмиттера. Этот множитель является единственным «подгоночным» параметром в нашей задаче и может быть легко определен экспериментально с помощью сравнения теоретической величины плотности эмиссионного тока (с плоской поверхности эмиттера) и реального эмиссионного тока, наблюдаемого в эксперименте.

Структура книги следующая. В главе 1 описана история открытия явления электронной эмиссии и ее виды. Далее приведена математическая постановка задачи автоэлектронной эмиссии из полупроводникового катода малого размера. В главе 2 кратко приводятся некоторые сведения из физики твердого тела, в частности, — формулы для удельной проводимости, коэффициентов термо-ЭДС и Томсона для полупроводников. В ней также приводится математическое описание процесса туннелирования через потенциальный барьер на границе катод-вакуум, формула для плотности автоэмиссионного тока в случае металлов и описание ее особенностей в случае авто-

электронной эмиссии из полупроводниковых катодов. В конце второй главы приведено описание теории Фаулера–Нордгейма и эффекта Ноттинггама для случая эмиссии из металлов. В главе 3 обсуждаются модель фазового поля и основные свойства ее решений. Приводятся формулы для асимптотических решений системы фазового поля в простейшем и некоторых специальных случаях. В главе 4 приведены формулы для численного решения системы уравнения фазового поля, алгоритм численного решения задачи (в том числе его реализация с использованием современных многопроцессорных систем и гибридных систем на основе графических ускорителей) и обсуждаются результаты численных экспериментов.

Авторы выражают глубокую благодарность заведующему кафедрой прикладной математики НИУ ВШЭ\* М. В. Карасеву за многочисленные дискуссии и комментарии.

Авторы выражают глубокую благодарность ректору МТУСИ\*\* профессору А. С. Аджемову за помощь в публикации монографии.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору кафедры высшей математики НИУ ВШЭ\* В. М. Четверикову за многочисленные замечания по рукописи данной монографии.

Исследования В. Г. Данилова и В. И. Кретьева поддержаны Программой фундаментальных исследований НИУ ВШЭ\*.

В. Ю. Руднев и Р. К. Гайдуков выражают глубокую благодарность МТУСИ\*\* и НИУ ВШЭ\* за поддержку своих исследований.

---

\* Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

\*\* Московский технический университет связи и информатики.