



## Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия: Учебное пособие. 1-е изд.

ISBN 978-5-8114-1232-7

Год выпуска 2012

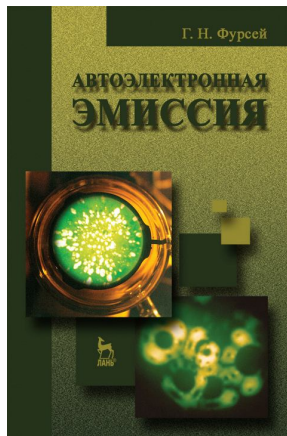
Тираж 1000 экз.

Формат 12,8 × 20 см

Переплет: твердый

Страниц 320

Цена 709,94 руб.



Книга посвящена автоэлектронной эмиссии, ее закономерностям, предельным возможностям эмиссионного процесса и приложению к задачам вакуумной нанозлектроники.

Учебное пособие предназначено для студентов физических и научно-технических факультетов, магистров, аспирантов и ученых, специализирующихся в области эмиссионной электроники, физики твердого тела, а также инженеров и технологов, работающих в области вакуумной нанозлектроники.

### Предисловие

Автоэлектронная эмиссия (АЭЭ) — уникальное квантовомеханическое явление туннелирования электронов из конденсированного состояния (твердого или жидкого) в вакуум. По эмиссионной способности она в десятки миллионов раз превосходит все известные виды эмиссии. Исключительно высокая плотность тока АЭЭ, а также отсутствие необходимости затрачивать энергию на сам эмиссионный процесс определяют исключительные возможности практического использования этого явления.

Сейчас автоэлектронная эмиссия фактически переживает второе рождение в связи с развитием принципиально новой области микро- и нанозлектроники — вакуумной микрозлектроники.

Точечные автоэмиссионные катоды находят применение в электронной микроскопии сверхвысокого разрешения, Оже-спектроскопии, электронной голографии атомного разрешения и других областях сверхтонкой диагностики поверхности.

Автоэлектронная эмиссия также инициирует и поддерживает генерацию мощных и сверхмощных электронных пучков (тысячи и миллионы ампер) при взрывной электронной эмиссии, являющейся основой современной сильноточной эмиссионной электроники [497...500].

Настоящее учебное пособие посвящено самому явлению автоэлектронной эмиссии, его закономерностям, предельным возможностям автоэмиссионного процесса и его приложению к задачам вакуумной микрозлектроники.

Исследования автоэлектронной эмиссии имеет большую предьсторию, которой посвящены обзоры и монографии. Среди них такие, как обзор В. П. Дайка и В. В. Долана (W. P. Dyke and W. W. Dolan), 1956 [27], монография М. И. Елинсона и Г. Ф. Васильева, 1958 [25], книга Р. Гомера (R. Gomer), 1961 [23], обзор Р. Фишера и Х. Ноймана (R. Fischer and H. Neumann), 1966 [149, 150], монография А. Г. Д. ван Оострума (A. G. J. van Oostrum), 1966 [17], Л. В. Свенсона и А. Е. Белла (L. W. Swanson and A. E. Bell), 1973 [19], сборник «Ненакаливаемые катоды» под редакцией М. И. Елинсона [28], книга А. Модиноса (A. Modinos), 1984 [29], специальный обзор по вакуумной микрозлектронике И. Броди и К. А. Спиндта (I. Brodie and C. A. Spindt), 1992 [87], обзор И. Броди и П. Р. Швобеля (I. Brodie and P. R. Chwoebel), 1994 [403], обзор Г. Н. Фурсей (G. N. Fursey), 1996 [152] и его монография, 2003 [471] и др.

В настоящее время появились новые данные о процессе АЭЭ и новые направления исследования. Кроме того, в связи с задачами вакуумной микрозлектроники возник особый интерес к ряду особенностей процесса автоэлектронной эмиссии в специфических условиях: в СВЧ-полях, при предельной плотности тока, при работе автоэмиссионных катодов в условиях очень коротких длительностей импульсов. Обозначились новые аспекты проблемы устойчивости и формирования поверхности автоэмиссионных катодов (АЭК). До сих пор практически не рассмотрены вопросы, связанные с АЭЭ из объектов нанометровых размеров (именно таких размеров эмиттеры используются в современной вакуумной микрозлектронике). Вновь проявляется большой интерес к автоэлектронной эмиссии из полупроводников и т. п. Но на сегодня все эти сведения в литературе отсутствуют или представлены недостаточно. Задача настоящего учебного пособия состоит в том, чтобы восполнить этот пробел.

Очень много информации о свойствах автоэммиттеров несет автоэмиссионная микроскопия и накопленные к настоящему времени данные, полученные на основе автоэмиссионных изображений. Автоэмиссионные картины позволяют напрямую получать данные об изменении субмикроскопии эмитирующей поверхности, работе выхода и целом ряде характеристик эмитирующей поверхности. Также автоэмиссионная микроскопия открывает уникальные возможности изучения (in situ) процессов на поверхности в сверхсильных электрических полях ~ 108 В/см. В настоящем

учебном пособии я старался представить широкий спектр АЭ-изображений, полученных на различных материалах, — от металлов до полупроводников. Оригинальные автоэмиссионные изображения для разных объектов в широком диапазоне полей впервые публикуются в таком объеме.

Особое внимание в учебном пособии уделяется предельным возможностям АЭ-процесса (глава 3). Анализируются особенности АЭЭ в СВЧ-полях (глава 4). Подробно рассматривается АЭЭ из полупроводников (глава 5). Представлены сведения о статистике АЭЭ (глава 6). Большое внимание уделено анализу новых идей в теории АЭЭ (главы 1, 3) и базовым, отборочным экспериментам, позволяющим уточнить механизм явления в различных условиях (глава 3).

Прослежена связь между АЭЭ и возможностями создания на ее основе различных устройств вакуумной микроэлектроники. Автор попытался подробно осветить вопрос о новом классе низковольтных дисплеев (глава 8) и использовании точечных АЭ-катодов в электронно-зондовых системах (глава 7). Отдельно рассмотрена возможность применения в вакуумной микроэлектронике самоорганизующихся микроструктур на основе углеродных кластеров, обладающих очень низким порогом эмиссии, — таких как алмазоподобные пленки, фуллерены и нанотрубки и графены (раздел 8.6).

Написание этой книги было бы невозможно без помощи многих коллег, сотрудников и друзей, которые оказали мне неоценимую помощь при ее подготовке. Прежде всего я хотел бы выразить глубочайшую благодарность выдающимся специалистам в области вакуумной микроэлектроники Генри Грею (Henry Gray) и Чарльзу Спиндту (Charles Spindt) за многократные дискуссии, советы и предоставленные материалы по их публикациям. Я выражаю глубокую признательность Фрэнсису Шарбонье (Francis Charbonnier) за внимание к моей работе и всестороннюю поддержку.

Я благодарен профессору Броди (Aivor Brodie), доктору Швобелю (Paul Schwoebel) за участие в редактировании моей предыдущей книги «Автоэлектронная эмиссия в вакуумной микроэлектронике» [471], профессору Гиваргизову за предоставленные первоклассные фотографии автоионных изображений некоторых полупроводников и профессору Визарту (Dr. Thierry Visart) за блестящие автоионные изображения.

Я сердечно благодарен академику РАЕН профессору Синицыну за прочтение книги и ценные замечания, а также Д. В. Глазанову за полезные обсуждения книги и В. А. Пожинскому за техническую помощь.

И, наконец, я выражаю сердечную признательность моей жене Людмиле Фурсей за ее долготерпение и тот труд, который она взяла на себя, выслушивая и корректируя фрагменты этой книги.

Георгий Фурсей

---

## Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия: Учебное пособие. 1-е изд.

### Оглавление

[Предисловие ..... 5](#)

[Краткая историческая справка ..... 9](#)

[Глава первая. Автоэлектронная эмиссия металлов ..... 16](#)

1.1. Теория Фаулера — Нордгейма ..... 16

1.2. Термоавтоэлектронная эмиссия ..... 20

1.3. Поправки к теории автоэлектронной эмиссии металлов ..... 23

1.3.1. Нанометровые эмиттеры. Правомерность одномерного приближения ..... 25

1.3.2. Влияние структуры поверхности Ферми на автоэлектронную эмиссию ..... 41

1.3.3. Учет многочастичных эффектов ..... 43

1.4. Выводы ..... 48

[Глава вторая. Характеристики автоэлектронной эмиссии при высоких плотностях эмиссионного тока ..... 50](#)

2.1. Отклонения от теории Фаулера — Нордгейма в экстремально сильных электрических полях ..... 50

2.2. Эффект пространственного заряда при автоэлектронной эмиссии ..... 51

2.3. Влияние на автоэлектронную эмиссию пространственного заряда релятивистских электронов ..... 55

2.4. К вопросу о форме потенциального барьера в сильных электрических полях ..... 61

2.5. Выводы ..... 67

[Глава третья. Максимальные плотности тока автоэлектронной эмиссии ..... 68](#)

3.1. Теоретический предел автоэмиссии ..... 68

3.2. Эффекты, предшествующие взрыву автоэлектронного эмиттера ..... 70

3.2.1. Общие сведения ..... 70

3.2.2. Эксперименты Дайка ..... 71

3.2.3. Предпробивные эффекты ..... 72

3.2.4. Развитие предпробивных процессов во времени ..... 74

3.2.5. Исследование локальных эффектов ..... 75

3.3. Нагрев как причина нестабильности автокатода ..... 77

3.3.1. Экспериментальное доказательство разогрева эмиттера в предпробивной фазе ..... 77

3.3.2. Анализ термических процессов ..... 79

3.3.3. Теория Ноттингам-эффекта ..... 81

3.3.4. Анализ нагрева эмиттера в трехмерном случае ..... 87

3.4. Перестройка автоэлектронного эмиттера при высоких плотностях тока (миграционные обострения) ..... 92

3.5. Максимальные плотности автоэмиссионного тока ..... 94

|   |     |
|---|-----|
| 3.5.1. Общие сведения .....   | 94  |
| 3.5.2. Экспериментальные значения плотности тока при разной длительности протекания автоэмиссионного тока .....                         | 95  |
| 3.5.3. Предельные плотности автоэлектронного тока, полученные при глубоком охлаждении эмиттера .....                                    | 96  |
| 3.5.4. Рекордные плотности тока из нанометровых автоэммиттеров .....  | 100 |
| 3.6. Выводы .....   | 104 |
| <b><u>Глава четвертая. Автоэлектронная эмиссия в быстропеременных полях .....</u></b>   |     |
| 4.1. Общие сведения .....   | 105 |
| 4.2. Условие адиабатичности. Время туннелирования .....   | 106 |
| 4.3. Экспериментальная проверка теории Фаулера — Нордгейма в условиях СВЧ-полей .....   | 110 |
| 4.4. Максимальные плотности тока АЭЭ в СВЧ-полях .....  | 114 |
| 4.5. Ионная бомбардировка автокатода .....  | 114 |
| 4.6. Распределение электронов по энергиям: пролетные эффекты .....  | 117 |
| 4.7. Автоэлектронная эмиссия с поверхности жидкого металла .....  | 121 |
| 4.8. Выводы .....   | 124 |
| <b><u>Глава пятая. Автоэлектронная эмиссия из полупроводников .....</u></b>   |     |
| 5.1. Общие сведения .....   | 126 |
| 5.2. Очистка поверхности автоэммиттера .....  | 128 |
| 5.3. Вольт-амперные характеристики .....  | 135 |
| 5.4. Сохранение исходных свойств автоэлектронного эмиттера .....  | 135 |
| 5.5. Падение напряжения на образце и изменение размеров автоэмиссионной картины .....   | 138 |
| 5.6. Теория автоэлектронной эмиссии полупроводников .....   | 143 |
| 5.6.1. Общие сведения .....   | 143 |
| 5.6.2. Теория Стрэттона .....   | 145 |
| 5.6.3. Модель полупроводникового эмиттера, основные уравнения .....   | 148 |
| 5.6.4. Приближение нулевого тока в теории автоэлектронной эмиссии полупроводников .....   | 152 |
| 5.6.5. Автоэлектронная эмиссия полупроводников р-типа в приближении «ненулевого тока» .....   | 154 |
| 5.6.6. Влияние сильного внутреннего поля на автоэлектронную эмиссию .....   | 157 |
| 5.6.7. Автоэлектронная эмиссия из полупроводников n-типа .....  | 159 |
| 5.6.8. Результаты численных расчетов .....  | 161 |
| 5.7. Переходные процессы при автоэлектронной эмиссии из полупроводников .....   | 169 |
| 5.7.1. Общие сведения .....   | 169 |
| 5.7.2. Изменение автоэлектронной эмиссии во времени .....   | 171 |
| 5.8. Стабильный полупроводниковый АЭЭ-катод .....   | 173 |
| 5.9. Исследование адсорбции .....   | 175 |
| 5.9.1. Общие сведения .....   | 175 |
| 5.9.2. Адсорбция кислорода на германии .....  | 176 |
| 5.9.3. Адсорбция кислорода на германии в сильном электрическом поле .....   | 177 |
| 5.10. Выводы .....  | 179 |
| <b><u>Глава шестая. Статистика автоэлектронной эмиссии (численность элементарного акта эмиссии) .....</u></b>                           |     |
| 6.1. Формулировка проблемы .....  | 180 |
| 6.2. Методика исследования статистики АЭЭ .....   | 181 |
| 6.3. Статистика АЭЭ с атомарно-чистой поверхности металлов .....  | 185 |
| 6.4. Статистика АЭЭ металлов при криогенных температурах .....  | 187 |
| 6.5. Численность элементарного акта при АЭЭ из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) .....  | 190 |
| 6.6. Исследование статистики АЭЭ при высокой прозрачности потенциального барьера .....  | 192 |
| 6.7. Выводы .....   | 194 |
| <b><u>Глава седьмая. Точечные автоэлектронные катоды в электронной микроскопии и других электронно-оптических устройствах .....</u></b> |     |
| 7.1. Введение .....   | 195 |
| 7.2. Оптимальная кристаллографическая ориентация автоэмиссионного катода .....  | 196 |
| 7.3. Локализация автоэлектронной эмиссии в результате термополевой самодиффузии .....   | 198 |
| 7.3.1. Локализация АЭЭ посредством перестройки поверхности .....  | 198 |
| 7.3.2. Локализация в результате роста микровыступов .....   | 201 |
| 7.3.3. Большие микровыступы .....   | 202 |
| 7.3.4. Малые (нанометровые) микровыступы .....  | 204 |
| 7.4. Локализация автоэлектронной эмиссии посредством локального уменьшения работы выхода .....  | 209 |
| 7.4.1. Основные идеи локализации с использованием избирательной адсорбции .....   | 209 |
| 7.4.2. Вольт-амперные характеристики вольфрамовых эмиттеров, покрытых цирконием .....   | 210 |
| 7.4.3. Влияние вакуумных условий на устойчивость локализирующего покрытия .....   | 212 |
| 7.4.4. Zr-W-катод с источником Zr, распределенным в объеме .....  | 214 |
| 7.4.5. Стабилизация эмиссионных свойств Zr-W-покрытий при обработке в кислороде .....   | 215 |
| 7.4.6. Формирование локальных эмиссионных областей при адсорбции Zr на W в сильном электрическом поле .....                             | 216 |
| 7.5. Автоэлектронная эмиссия из атомноострых нановыступов .....   | 218 |
| 7.6. Применение автоэмиссионных катодов электронно-оптических устройствах .....   | 220 |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 7.7. Выводы .....  | 223                 |
| <a href="#">Глава восьмая. Успехи в приложении вакуумной наноэлектроники .....</a>                     | <a href="#">224</a> |
| 8.1. Введение .....  | 224                 |
| 8.2. Краткая историческая справка, основные этапы развития .....                                       | 225                 |
| 8.3. Основные приложения автоэлектронной эмиссии в вакуумной микро- и наноэлектронике .....            | 230                 |
| 8.4. Полевая эмиссионная микроскопия .....   | 231                 |
| 8.5. Автоэмиссионные дисплеи .....   | 237                 |
| 8.5.1. Принцип работы автоэмиссионного дисплея .....   | 237                 |
| 8.5.2. Требования к остриям и сроку службы матричных автокатодов .....                                 | 241                 |
| 8.5.3. Сравнительная характеристика основных типов дисплеев. Преимущества АЭД .....                    | 243                 |
| 8.6. Миниатюрные автоэмиссионные триоды и усилители на основе многоэмиттерных матриц (FE Arrays) ..... | 246                 |
| 8.7. СВЧ-устройства для усиления миллиметровых волн .....  | 250                 |
| 8.8. Нанолитография .....  | 254                 |
| 8.9. Сенсоры магнитного поля .....   | 255                 |
| 8.10. Датчики внешнего давления .....  | 256                 |
| 8.11. Масс-спектрометры с автокатадами .....   | 257                 |
| 8.12. Газовые лазеры .....   | 258                 |
| 8.13. Многоэмиттерные автоэмиссионные катоды на основе нанокластеров углерода .....                    | 259                 |
| 8.14. Выводы .....   | 272                 |
| <a href="#">Библиографические ссылки .....</a>   | <a href="#">274</a> |

---