

Периодические отклонения автоэмиссионного тока из углеродной нанотрубки от прямой Фаулера—Нордгейма

© В.М. Лобанов, Е.П. Шешин

Башкирский государственный аграрный университет, Уфа

E-mail: LobanovVM@bsau.ru

Московский физико-технический институт (государственный университет)

E-mail: sheshin@lafaet.mipt.ru

Поступило в Редакцию 16 октября 2006 г.

Углеродные нанотрубки исследованы с помощью электронного проектора и дисперсионного энергоанализатора автоэлектронов. В исследованном диапазоне напряжений эмиссии наблюдались периодические изменения энергораспределений автоэлектронов из двух образцов, соответствующие им вольт-амперные характеристики зондовых токов имели периодические отклонения в область меньших токов. Отклонения тока от прямой Фаулера—Нордгейма достигали у образцов соответственно 20 и 50%. В основу объяснения положена интерференционная модель термоэлектронной эмиссии при высоких напряжениях.

PACS: 79.60.Jv

Экспериментальными исследованиями автоэлектронной эмиссии из углеродных эмиттеров к настоящему времени установлено существование энергораспределений автоэлектронов двух видов: нормального с одним максимумом, соответствующего модели свободных электронов, и широкого с двумя максимумами с интервалом $0.3\text{--}0.5\text{ eV}$, для объяснения которого предложено несколько физических моделей, основанных на суперпозиции потоков электронов от соседних эмитирующих микровыступов автокатода с несовершенной вершиной [1], на представлении углеродного автокатода в виде металла, покрытого тонким слоем диэлектрика [2], на явлении самопроизвольной термополевой перестройки вершины углеродного эмиттера [3,4]. Перечисленные модели объединяет экспериментальный факт неизменности взаимного

расположения максимумов энергораспределения во всем диапазоне исследуемых напряжений эмиссии.

Однако известно энергораспределение автоэлектронов с двумя максимумами и совершенно иной динамикой поведения, наблюдавшееся при исследовании эмиссии электронов из углеродных частиц на поверхности металла [5]. При увеличении эмиссионного напряжения дополнительный максимум, так же как и в [2], появлялся на основании высокоэнергетического склона энергораспределения, постепенно возрастал, смещался в область низких энергий и занимал положение основного. Одновременно основной максимум смещался в область низких энергий, превращаясь в дополнительный низкоэнергетический. Если в [2] все основные изменения энергораспределения на этом прекращались, то здесь продолжение увеличения напряжения эмиссии приводило к дальнейшему смещению максимума в низкоэнергетическую область, уменьшению и исчезновению. Энергораспределение, как и в начале, становилось нормальным. Продолжение увеличения напряжения вновь приводило к появлению дополнительного максимума на основании высокоэнергетического склона энергораспределения, и преобразование энергораспределения повторялось. В исследованном диапазоне напряжений эмиссии преобразование нормального энергораспределения в широкое с двумя максимумами наблюдалось несколько раз. Описанное периодическое изменение энергораспределения воспроизводилось при исследовании автоэлектронной эмиссии из других частиц.

Таким образом, для углеродных автоэммиттеров известны, по крайней мере, два широких энергораспределения с двумя максимумами, которые в экспериментальной практике трудно различимы. Их исследование было выполнено в основном на углеродных эмиттерах с формами вершин, далекими от совершенства. Углеродная нанотрубка (УНТ) с полусферической вершиной, лишенной даже атомарных ступенек, предоставляет возможность провести более качественные измерения в этом направлении.

Целью настоящей работы было исследование энергораспределения автоэлектронов из углеродных нанотрубок (НТ) с замкнутой вершиной. Объектом исследования служили НТ, нанесенные методом электрофореза на вольфрамную фольгу.

Методика. Предварительный осмотр нескольких срезов фольги в просвечивающем электронном микроскопе JEM 100S показал, что нанотрубки на краю фольги были отдельно стоящими, имели разную длину, диаметры и обладали полусферическими вершинами.

В сверхвысоковакуумной камере УСУ-4, оборудованной полевым электронным микроскопом-проектором Мюллера и электростатическим дисперсионным энергоанализатором с плоским анодом, поочередно исследовались два образца, которые приготавливались из полосок фольги размерами $\sim 2 \times 1$ mm. После достижения вакуумных условий в рабочей камере не хуже $5 \cdot 10^{-10}$ Torr образцы очищались термодесорбцией.

Для очистки первого образца между источником высокого напряжения и эмиттером включалось балластное сопротивление и эмитирующие УНТ прогревались джоулевым теплом протекавшего тока эмиссии [6]. Эмиссия автоэлектронов наблюдалась с угла перегнутой полоски фольги. Эмиссионная картина представляла собой несколько овальных пятен различной яркости, располагавшихся в линию. Наиболее яркое пятно выводилось на зондовое отверстие энергоанализатора.

Эмиссия автоэлектронов второго образца наблюдалась с края полоски фольги. Дужка, на которой крепилась полоска фольги, в течение часа прогревалась током накала при температуре ~ 1000 K. Эмиссионная картина состояла из единственного овального пятна, которое выводилось на зондовое отверстие энергоанализатора.

Измерения энергораспределения автоэлектронов (ЭРА) проводились по методике, изложенной в [7]. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) зондового тока строились по значениям тока электронов, проходившего через энергоанализатор, и соответствующим значениям анодных напряжений U_a .

Эксперимент и результаты. Измерения энергораспределений автоэлектронов начинались сразу после прогрева образцов. Интервал сканирования ЭРА составлял 5 meV, а интервал изменения анодных напряжений 20 V.

ЭРА первого образца измерялись в диапазоне анодных напряжений 2860 ÷ 3900 V. С увеличением анодного напряжения энергораспределение автоэлектронов претерпевало периодические изменения, представленные на рис. 1, *a* и *b*, состоявшие в следующем: в начале максимум ЭРА сдвигался в область низких энергий (сдвиг достигал ~ 0.3 eV), одновременно уменьшалась крутизна высокоэнергетического склона ЭРА и увеличивалась крутизна низкоэнергетического, основание высокоэнергетического склона удлинялось и на нем появлялся минимум, который с ростом анодного напряжения перемещался в центр ЭРА, превращая его в широкое с двумя максимумами, разделенными интервалом ~ 0.3 eV,

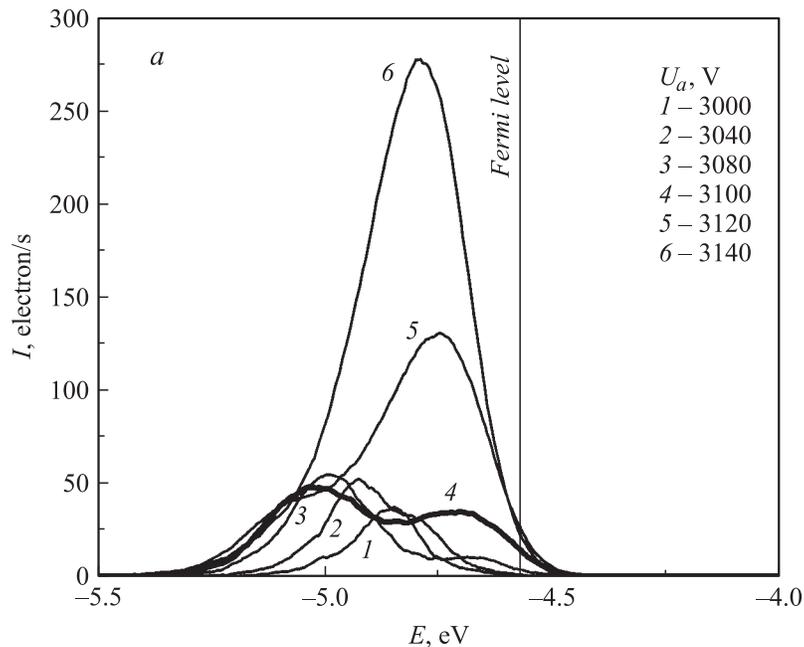


Рис. 1. Преобразование нормального ЭРА первого образца (1, 6 на *a* и 7 на *b*) в широкое с двумя максимумами (3, 4, 5 на *a* и 10, 11, 12 на *b*) при увеличении анодного напряжения от 3000 до 3380 V.

а затем на низкоэнергетический склон и далее, уменьшался и исчезал. Энергораспределение вновь становилось нормальным. С увеличением анодного напряжения минимум четырежды проходил по ЭРА.

Периодические изменения ЭРА отразились на величине зондового тока и его вольт-амперной характеристике (рис. 2), которая имела периодические отклонения от прямой в координатах Фаулера–Нордгейма, достигавшие $\pm 25\%$. Интервал между значениями анодного напряжения, соответствовавшими одинаковым изменениям энергораспределения автоэлектронов и отклонениям ВАХ зондового тока, с увеличением анодного напряжения постепенно увеличивался и составлял ~ 200 , ~ 240 и ~ 260 V.

Измерения ЭРА второго образца производились в диапазоне анодных напряжений 3200–3700 V. При увеличении напряжения эмиссии

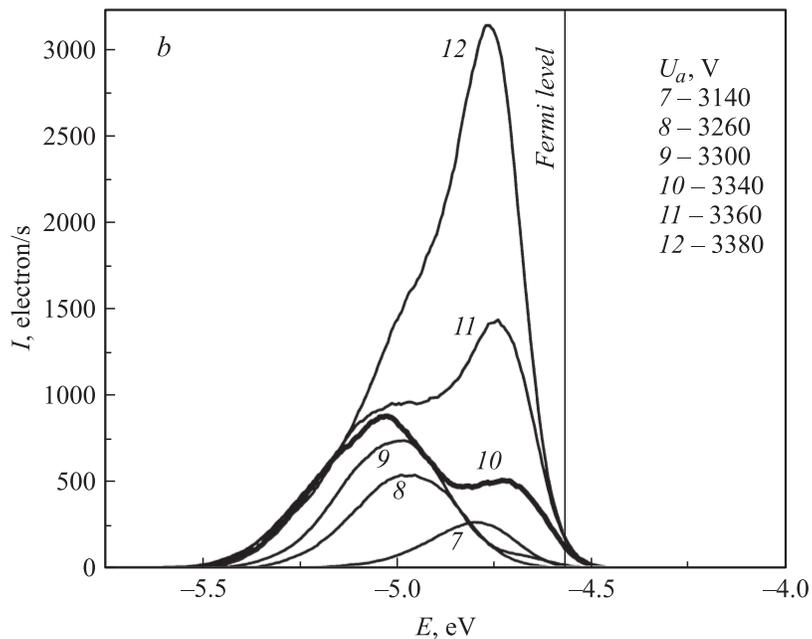


Рис. 1 (продолжение).

наблюдались периодические смещения вершины ЭРА в область низких, а затем в область высоких энергий в пределах интервала 4.8–5.1 eV. При смещении вершины ЭРА в область низких энергий крутизна высокоэнергетического склона уменьшалась, а низкоэнергетического — увеличивалась. При смещении вершины ЭРА в область высоких энергий, наоборот, крутизна высокоэнергетического склона увеличивалась, а низкоэнергетического — уменьшалась. Периодические изменения ЭРА отразились на величине зондового тока и вольт-амперной характеристике, которая имела периодические отклонения от прямой в координатах Фаулера–Нордгейма. Период отклонений ВАХ зондового тока по анодному напряжению составлял ≈ 100 V, отклонения значений зондового тока от прямой достигали $\pm 10\%$.

Наблюдавшееся движение дополнительного минимума по ЭРА первого образца (см. рис. 1) практически воспроизводило картину изменений ЭРА, описанную в [5] при автоэлектронной эмиссии из

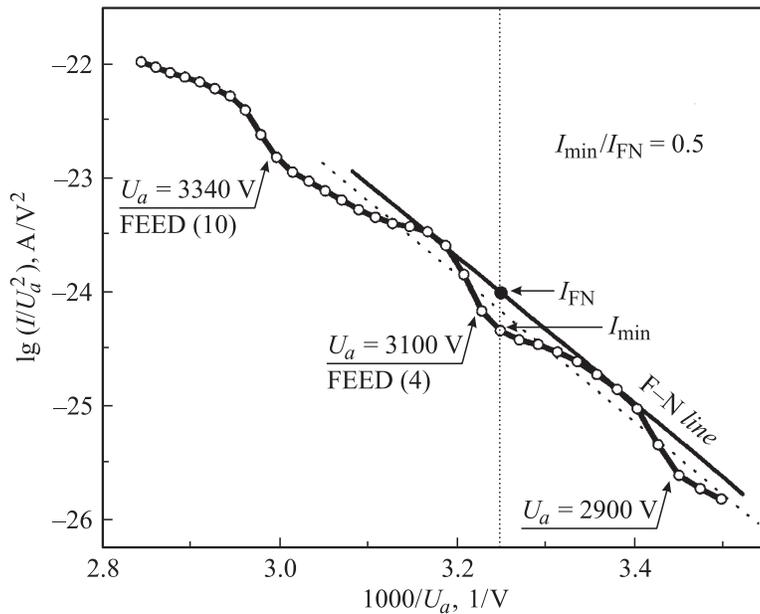


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика зондового тока первого образца с периодическими отклонениями от прямой.

углеродных частиц на поверхности металла. В упомянутой работе не представлены ВАХ токов зондируемых областей. Но вольт-амперная характеристика полного тока с периодическими отклонениями от прямой Фаулера–Нордгейма известна по работе [8], в которой исследовалась отдельная нанотрубка, установленная на W -острие. Отклонения тока от теоретической прямой достигали $\pm 25\%$, с увеличением напряжения эмиссии интервал между значениями напряжения, при которых ток отклонялся от прямой в область меньших, а затем больших значений, постепенно увеличивался, что согласуется с нашими результатами.

Сопоставление измеренных энергораспределений автоэлектронов и вольт-амперных характеристик зондового тока показало, что зондовый ток отклонялся от значений, соответствующих прямой Фаулера–Нордгейма, только в меньшую область вследствие периодического прохождения по энергораспределению дополнительного минимума, появлявшегося на высокоэнергетическом склоне ЭРА и постепенно

смещавшегося в область низких энергий. Таким образом, периодические отклонения зондового тока от значений, соответствующих прямой Фаулера–Нордгейма, в меньшую область достигали 50% у первого образца и 20% — у второго.

В качестве рабочей гипотезы для объяснения периодических преобразований нормального энергораспределения автоэлектронов в широкое с двумя максимумами, сопровождающихся периодическими отклонениями вольт-амперной характеристики зондового тока от прямой Фаулера–Нордгейма в область меньших токов при увеличении напряжения эмиссии, была привлечена интерференционная модель термоэлектронной эмиссии при высоких напряжениях [9]: при увеличении анодного напряжения толщина барьера, постепенно уменьшаясь, в области уровня Ферми периодически принимала значения, соответствовавшие интерференционному максимуму коэффициента отражения электронов, что приводило к появлению дополнительного минимума в нормальном энергораспределении автоэлектронов и оно становилось двухпиковым, и отклонению вольт-амперной характеристики в область меньших токов.

Список литературы

- [1] *Heinrich H., Essig M., Geiger J.* // *Appl. Phys.* 1977. V. 12. P. 197–202.
- [2] *Latham R.W., Wilson D.A.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1983. V. 16. P. 455–463.
- [3] *Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М.* // *ЖТФ.* 2002. Т. 72. В. 9. С. 108–111.
- [4] *Лобанов В.М.* // *ЖТФ.* 2005. Т. 75. В. 11. С. 92–96.
- [5] *Athwal C.S., Latham R.V.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1984. V. 17. P. 1029–1043.
- [6] *Purcell S.T., Vincent P., Journet C. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. N 10. P. 105502.
- [7] *Бахтизин Р.З., Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М.* // *ПТЭ.* 1987. № 4. С. 247.
- [8] *Fransen M.J., van Rooij Th.L., Kruit P.* // *Appl. Surf. Sci.* 1999. V. 146. P. 312–327.
- [9] *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. С. 159.