

Влияние интерференции на полевую эмиссию электронов

© В.М. Лобанов,¹ Е.П. Шешин²

¹ Башкирский государственный аграрный университет,
450001 Уфа, Россия
e-mail: lobanovvm@mail.ru

² Московский физико-технический институт,
141700 Москва, Россия
e-mail: sheshin@mail.mipt.ru

(Поступило в Редакцию 18 мая 2010 г.)

Углеродные нанотрубки исследованы с помощью электронного проектора и дисперсионного энергоанализатора автоэлектронов. Зондовые вольт-амперные характеристики двух образцов имели волнообразные модуляции, обусловленные периодическими изменениями энергетических спектров автоэлектронов, происходившими при увеличении напряжения эмиссии. Отклонения тока от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 35\%$. В основу объяснения положена модель интерференции Юнга от двух когерентных источников.

Введение

Для углеродных автоэммиттеров к настоящему времени установлено существование энергетических спектров автоэлектронов двух видов — нормального, объяснимого в рамках модели свободных электронов, и широкого с двумя максимумами, разделенными интервалом ~ 0.5 eV. Появление второго максимума и возрастание ширины энергораспределения с увеличением тока катоды авторы [1] объясняют кулоновским взаимодействием электронов, эмитирующих из соседних эмиссионных центров на поверхности автокатода. В другой модели углеродный эмиттер представляется как металлическое острие, покрытое микрочастичками диэлектрика, образующими сплошную пленку на его эмиссионной поверхности; на границе диэлектрик–вакуум электроны разогреваются проникающим электрическим полем и получают возможность надбарьерного выхода в вакуум, давая дополнительный высокоэнергетический максимум в энергораспределении, расположенный на ~ 0.5 eV выше основного [2]. В предложенной нами модели появление дополнительного максимума в энергетическом спектре объясняется термополевой перестройкой эмитирующего углеродного кристаллита или вершины углеродной нанотрубки, в результате которой образуются поверхностные электронные состояния, дающие дополнительный низкоэнергетический максимум, расположенный на 0.3 – 0.5 eV ниже основного [3–5]. Широкий энергетический спектр автоэлектронов с дополнительным низкоэнергетическим максимумом, лежащим на ~ 0.5 eV ниже основного, был получен при исследовании эмиссии электронов из пентагонального кольца, закрывающего эмитирующий выступ на вершине углеродной нанотрубки [6].

Но известны энергетические спектры автоэлектронов из углеродных эмиттеров и с большим количеством максимумов, наблюдавшихся при исследовании эмиссии электронов из углеродных частиц на поверхности метал-

ла. При увеличении эмиссионного напряжения в энергораспределении автоэлектронов с двумя максимумами появлялся и возрастал дополнительный максимум на высокоэнергетическом склоне, одновременно уменьшался и исчезал максимум на низкоэнергетическом склоне спектра [7]. В работе [8] были изучены энергетические спектры автоэлектронов более 30 многостенных закрытых нанотрубок, все спектры были многопиковыми и разными. В некоторых спектрах в области низких энергий наблюдалось несколько пиков, один из которых был даже более интенсивным, чем основной.

Целью настоящей работы было исследование нормального и широкого энергетических спектров автоэлектронов из углеродных нанотрубок (НТ). Объектом исследования служили НТ, нанесенные методом электрофореза на вольфрамовую фольгу. Спектры широкого вида получались с помощью термополевой перестройки вершины НТ.

Условия и методика эксперимента

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

Поочередно исследовались два образца в сверхвысоковакуумной камере УСУ-4, оборудованной полевым электронным микроскопом-проектором Мюллера и электростатическим дисперсионным энергоанализатором с плоским анодом.

Первый образец приготавливался из полоски фольги размером $\sim 2 \times 1$ mm, которая приваривалась к танталовой дужке суппорта. После общего прогрета вакуумной камеры и достижения вакуумных условий не менее $5 \cdot 10^{-10}$ Торг образец прогревался в течение часа током накала дужки при температуре ~ 1000 К. Эмиссия автоэлектронов наблюдалась с края полоски фольги.

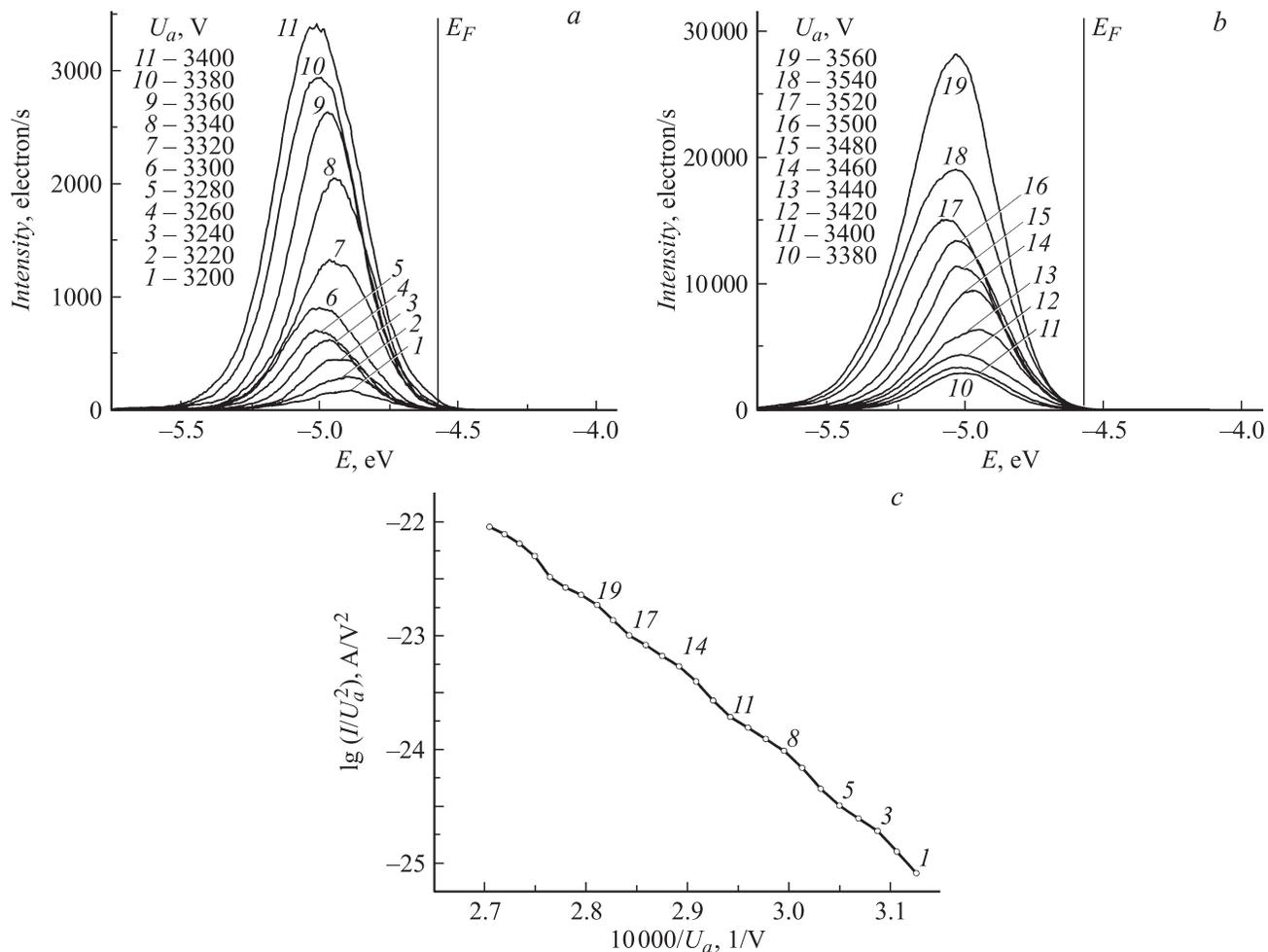


Рис. 1. *a, b* — периодические изменения энергетического спектра автоэлектронов из первой углеродной нанотрубки при увеличении напряжения эмиссии от 3200 до 3560 В; *c* — вольт-амперная характеристика зондового тока первой углеродной нанотрубки.

Эмиссионная картина на экране проектора состояла из единственного овального пятна, которое выводилось на зондовое отверстие энергоанализатора.

Второй образец изготавливался из полоски фольги размером $\sim 3 \times 1$ мм, которая перегибалась и приваривалась к никелевой трубке суппорта. Через шлюзовое устройство образец вводился в вакуумную камеру. После общего прогрева камеры и достижения вакуумных условий не менее $5 \cdot 10^{-10}$ Торр между источником высокого напряжения и эмиттером включалось балластное сопротивление, и вершина нанотрубки прогревалась джоулевым теплом постепенно повышавшегося тока эмиссии до момента стабилизации эмиссионной картины на экране проектора, после чего ток эмиссии понижался. Эмиссия автоэлектронов наблюдалась с угла перегнутой полоски фольги, эмиссионная картина представляла собой несколько овальных пятен различной яркости, которые поочередно выводились на зондовое отверстие энергоанализатора.

Измерения энергетических спектров автоэлектронов проводились по методике, использованной в [5]. Вольт-

амперные характеристики (ВАХ) зондового тока строились по значениям тока электронов, проходившего через энергоанализатор, и соответствующим значениям анодных напряжений U_a . Термополевая перестройка вершины НТ проводилась после включения балластного сопротивления между источником высокого напряжения и эмиттером.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Измерения энергетических спектров автоэлектронов начинались сразу после прогрева образцов. Измерение спектров первого образца производилось с интервалом 5 мэВ в диапазоне анодных напряжений 3200–3700 В с интервалом по анодному напряжению 20 В. При низких анодных напряжениях спектры очищались от шумов сглаживанием методом наименьших квадратов. На рис. 1 представлены спектры, изме-

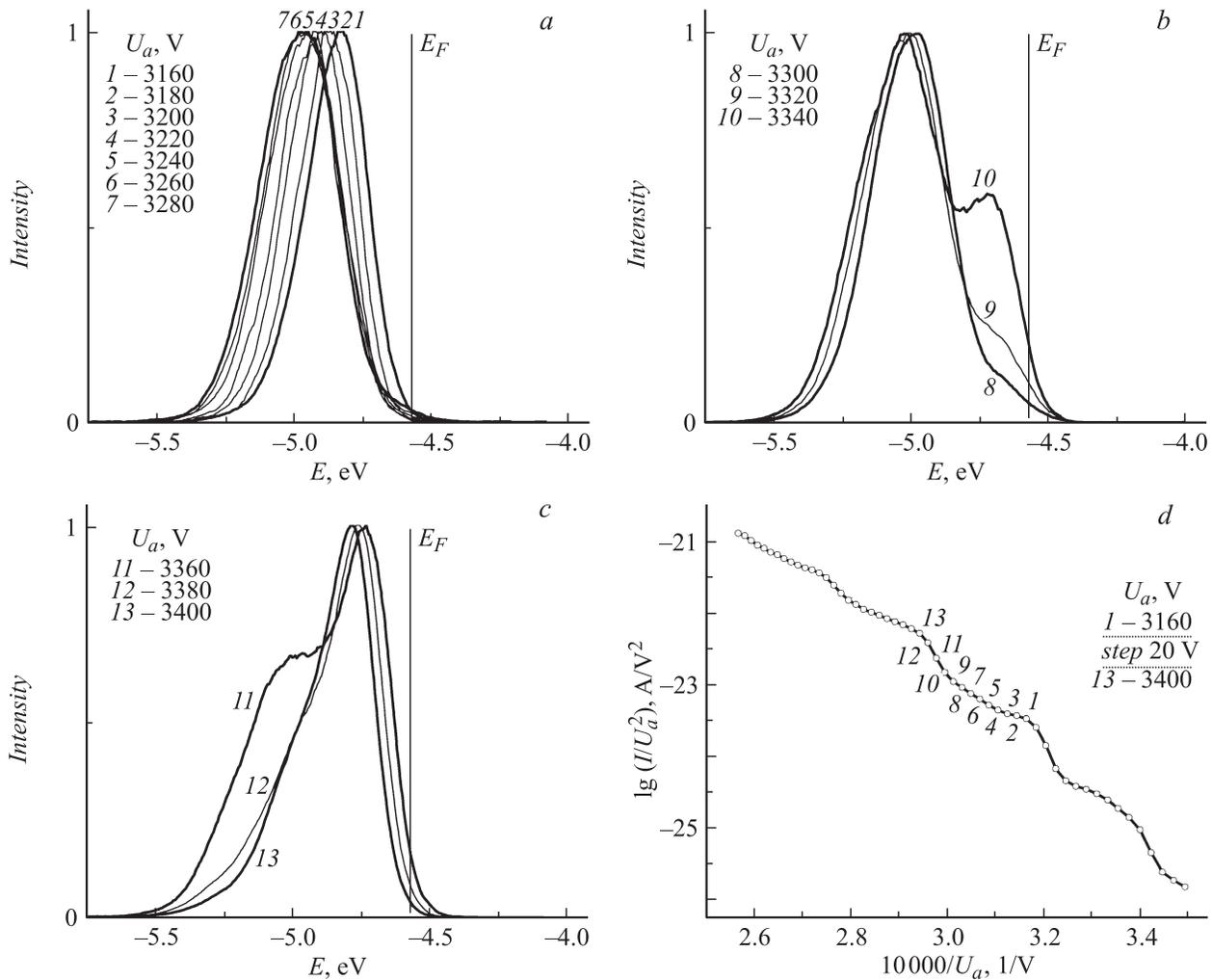


Рис. 2. *a–c* — изменения энергетического спектра автоэлектронов из второй нанотрубки при увеличении анодного напряжения в интервале $\Delta U_a = 240$ В; *d* — соответствующая спектрам ВАХ зондового тока ((ВАХ(I)).

ренные при увеличении анодных напряжений в диапазоне 3200–3560 В.

В диапазоне анодных напряжений 3200–3280 В с увеличением напряжения эмиссии вершина спектра смещалась в область низких энергий в интервале от 4.8 до 5.1 eV, при этом крутизна высокоэнергетического края уменьшалась, а низкоэнергетического — увеличивалась. Далее, при напряжении 3300 и 3320 В, наблюдалось значительное уширение и увеличение крутизны высокоэнергетического края и смещение вершины спектра в область высоких энергий, при этом крутизна низкоэнергетического края уменьшалась. При дальнейшем увеличении напряжения эмиссии смещения вершины в область низких энергий, а затем в область высоких энергий, изменения крутизны низко- и высокоэнергетического краев спектра, уширения высокоэнергетического края повторялись в том же порядке.

Периодические изменения энергетического спектра автоэлектронов отразились на ВАХ зондового тока (рис. 1, *c*), которая имела волнообразную модуляцию с периодом изменений по анодному напряжению ≈ 100 В,

равным периоду изменения спектра. Смещениям вершины спектра в область низких энергий соответствовали отклонения ВАХ в область меньших токов, а уширениям высокоэнергетического края и смещениям вершины спектра в область высоких энергий соответствовали отклонения ВАХ в область больших токов. Отклонения значений тока от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 14\%$.

Вольт-амперная характеристика полного тока эмиссии нанотрубки, измеренная при отрицательном эмиссионном напряжении на катоде, имела волнообразную модуляцию с тем же периодом. Отклонения значений полного тока от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 5–6\%$.

Сканирование спектров второго образца проводилось с интервалом 5 meV в диапазоне анодных напряжений 2860–3960 В с интервалом по анодному напряжению 20 В. При низких анодных напряжениях спектры очищались от шумов сглаживанием методом наименьших квадратов.

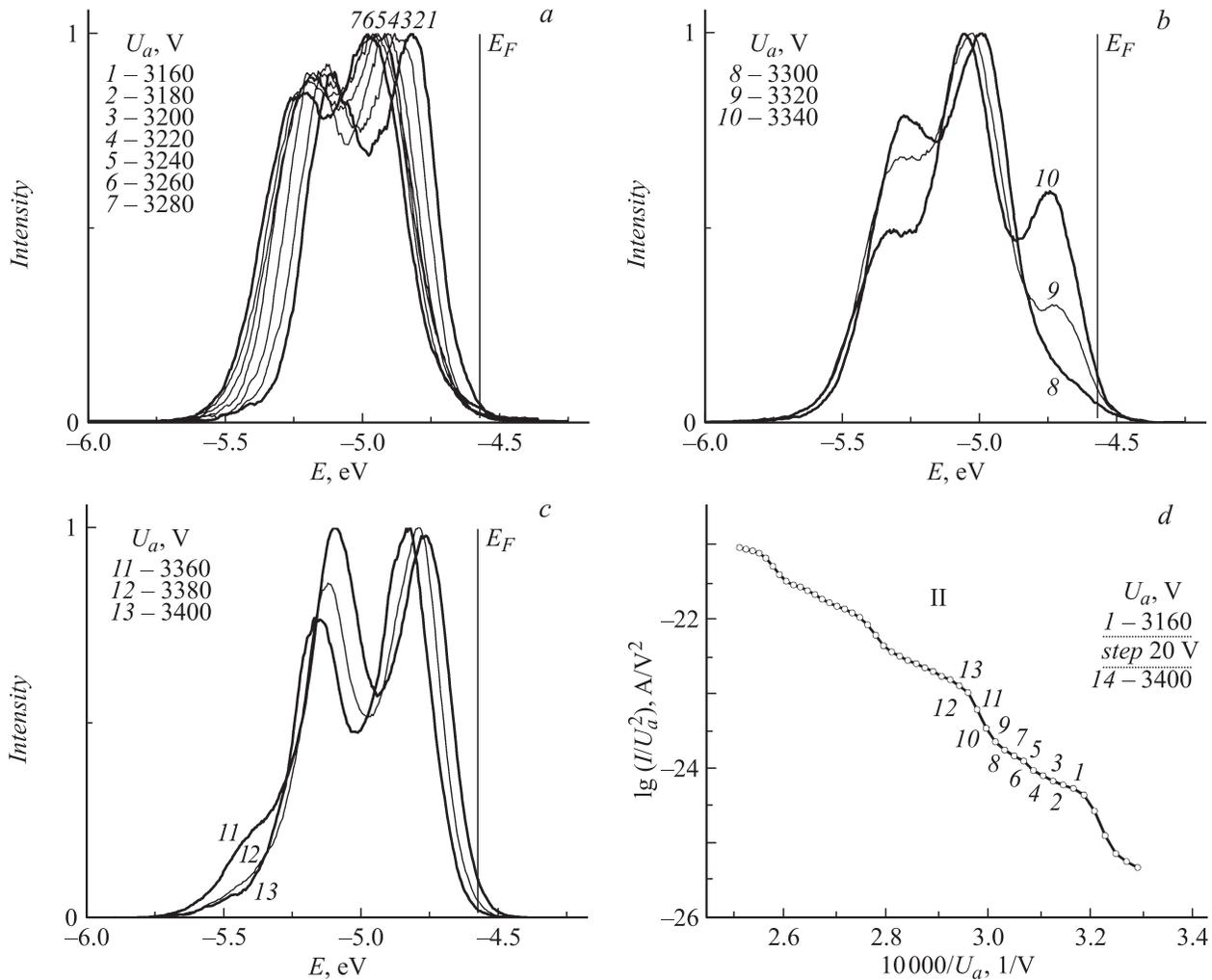


Рис. 3. *a–c* — изменения энергетического спектра автоэлектронов из второй нанотрубки после термополевой перестройки ее вершины при увеличении анодного напряжения в интервале $\Delta U_a = 240$ В; *d* — соответствующая спектрам ВАХ зондового тока ((BAX(II))).

На рис. 2, *a–c* представлены энергетические спектры автоэлектронов, измеренные в диапазоне анодных напряжений 3160–3400 В. При $U_a = 3160$ В спектр имел один максимум, соответствовавший энергии ≈ 4.8 эВ. С увеличением анодного напряжения максимум сдвигался в область низких энергий и при $U_a = 3260$ В достигал положения ≈ 5 эВ. Одновременно со смещением спектра уменьшалась крутизна его высокоэнергетического края и увеличивалась крутизна низкоэнергетического. При $U_a = 3280$ В на основании высокоэнергетического края появлялся дополнительный максимум, который увеличивался с ростом анодного напряжения, и при $U_a = 3300$ – 3360 В спектр становился двухпиковым и широким, дополнительный максимум превышал основной. При $U_a = 3380$ – 3400 В спектр продолжал смещаться в область низких энергий, основной максимум уменьшался и исчезал на низкоэнергетическом склоне, спектр становился однопиковым, а в положении ≈ 4.8 эВ основного максимума оказывался дополнительный высокоэнергетический.

Описанные изменения спектра наблюдались в диапазонах анодных напряжений 2940–3160, 3160–3400, 3400–3660, 3660–3940 В. Таким образом, с увеличением напряжения эмиссии интервал анодных напряжений, в котором воспроизводились изменения спектра, постепенно увеличивался и составлял ≈ 220 , ≈ 240 , ≈ 260 и ≈ 280 В.

На рис. 2, *d* представлена соответствующая измеренным спектрам ВАХ зондового тока (BAX(I)) в диапазоне анодных напряжений 2860–3900 В. Вольт-амперная характеристика имела волнообразную модуляцию: отклонения BAX(I) в область меньших токов соответствовали смещениям вершины спектра в область низких энергий, отклонения BAX(I) в область больших токов соответствовали появлению и росту дополнительного высокоэнергетического максимума в спектре. Таким образом, модуляция BAX(I) отражала изменения спектра, и интервалы изменений BAX(I) соответствовали интервалам изменений спектра. Отклонения значений тока BAX(I) от усредняющей пря-

мой Фаулера–Нордгейма в пределах интервала достигали $\pm 35\%$.

Для проведения термополевой перестройки вершины нанотрубки между эмиттером и источником высокого напряжения включалось балластное сопротивление. Термополевая перестройка вершины НТ была зарегистрирована при подъеме полного тока эмиссии до 420 нА, который затем упал до 350 нА. Зондовый ток эмиссии упал почти на порядок, а в энергетическом спектре автоэлектронов появился дополнительный низкоэнергетический максимум на ≈ 0.4 eV ниже основного.

На рис. 3, *a–c* представлены энергетические спектры автоэлектронов, измеренные при анодных напряжениях 3160–3400 В. При $U_a = 3160$ В спектр имел два максимума, положение основного соответствовало энергии ≈ 4.8 eV. С увеличением анодного напряжения спектр сдвигался в область низких энергий и при $U_a = 3260$ В основной максимум достигал положения ≈ 5 eV, интервал между максимумами оставался неизменным, относительная высота изменялась незначительно. Одновременно со смещением спектра уменьшалась крутизна его высокоэнергетического края. При $U_a = 3280$ В на основании высокоэнергетического края появлялся дополнительный максимум, который увеличивался с ростом анодного напряжения, и при $U_a = 3300–3360$ В спектр становился трехпиковым. При $U_a = 3300–3400$ В трехпиковый спектр продолжал смещаться в область низких энергий, в положении основного максимума оказывался дополнительный высокоэнергетический, низкоэнергетический максимум уменьшался и исчезал, спектр вновь становился двухпиковым.

На рис. 3, *d* представлена соответствующая ВАХ зондового тока (ВАХ(II)) в диапазоне анодных напряжений 3040–3960 В. ВАХ(II), так же как и ВАХ(I), имела волнообразную модуляцию с теми же интервалами изменений по анодному напряжению. Отклонения ВАХ(II) в область меньших токов соответствовали смещениям основного максимума спектра в область низких энергий, а отклонения ВАХ(II) в область больших токов соответствовали появлению и росту дополнительного высокоэнергетического максимума. Отклонения значений тока ВАХ(II) от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 35\%$.

Наблюдавшиеся изменения энергетического спектра автоэлектронов из первой нанотрубки (см. рис. 1) находились в хорошем согласии с алгоритмом изменений, предшествующих термополевой перестройке углеродного эмиттера [3,4]. Однако смещение спектра в область низких энергий с ростом анодного напряжения, сопровождавшееся уменьшением крутизны высокоэнергетического и увеличением крутизны низкоэнергетического краев, и последующее уширение высокоэнергетического края спектра не заканчивались термополевой перестройкой вершины нанотрубки. Наоборот, при дальнейшем увеличении анодного напряжения восстанавливался спектр нормального вида, а затем изменения спектра повторялись в том же порядке при больших напряжениях несколько раз. Но модель термополевой перестройки

углеродного эмиттера предполагала лишь однократное изменение формы спектра, и не могла объяснить периодических изменений спектра и модуляций ВАХ первой нанотрубки.

Изменения энергетического спектра автоэлектронов из второй нанотрубки после прогрева (см. рис. 2) также находились в хорошем согласии с алгоритмом изменений, предшествующих термополевой перестройке углеродного эмиттера. Но вместо уширения высокоэнергетического края на нем появлялся и затем увеличивался дополнительный высокоэнергетический максимум, поведение которого было близко к изложенному в [2]. Но и модель надбарьерной эмиссии электронов, использованная в [2], также предполагала лишь однократное изменение спектра. Таким образом, модели термополевой перестройки и надбарьерной эмиссии оказались непригодны для объяснения изменений спектра и модуляций ВАХ(I).

Изменения энергетического спектра автоэлектронов из второй нанотрубки после термополевой перестройки ее вершины были очень близки к поведению спектров, полученных при исследовании эмиссии из углеродных частиц на поверхности металла [7], когда в энергораспределении автоэлектронов с двумя максимумами при увеличении эмиссионного напряжения периодически появлялся и возрастал дополнительный максимум на высокоэнергетическом склоне, одновременно уменьшался и исчезал максимум на низкоэнергетическом склоне спектра. При этом поведение одного из максимумов резко отличалось от поведения двух других, а ВАХ полного тока обладала гистерезисом. Модель, примененная авторами [7] для объяснения наблюдавшихся явлений, была развита в теорию эмиссии горячих электронов из углеграфитовых автокатодов, в которой углеграфитовый катод представлялся металлом, покрытым аморфным диэлектриком с многодолинной зоной проводимости. Но упорядоченное строение и металлическая или полупроводниковая проводимость углеродных нанотрубок не позволяли применить и эту модель.

В предыдущих наших исследованиях [5] прямолинейная ВАХ зондового тока нанотрубки смещалась на половину порядка вниз после термополевой перестройки ее вершины. Если в верхнем положении ВАХ формировалась только электронами, эмитировавшими из объема, то в нижнем — как объемными, так и поверхностными, эмитировавшими с поверхностных электронных состояний и дававшими дополнительный низкоэнергетический максимум в энергетическом спектре автоэлектронов. Эмиссия электронов с поверхностных состояний не изменяла прямолинейности ВАХ, так как относительная величина дополнительного низкоэнергетического максимума спектра почти не зависела от напряжения эмиссии.

Измерение ВАХ(I) и ВАХ(II) в настоящем исследовании показало, что термополевая перестройка вершины нанотрубки не повлияла на период и амплитуду волнообразных модуляций, на положение их максимумов и минимумов, которые из положения на ВАХ(I) просто

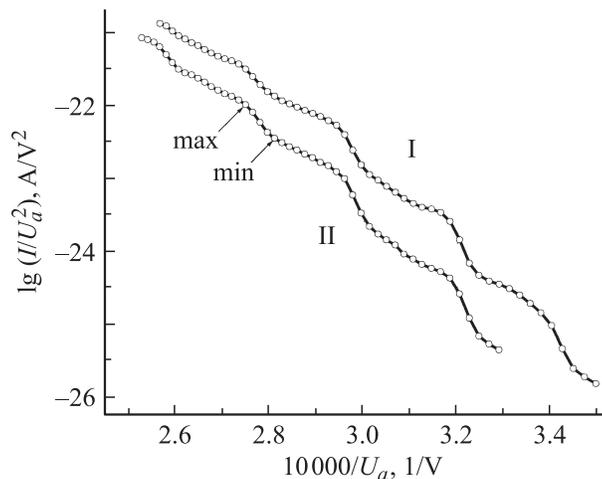


Рис. 4. ВАХ зондового тока второй нанотрубки после прогрева и после термополевой перестройки ее вершины.

сместились вертикально вниз на ВАХ(II) (рис. 4), указывая на жесткую привязанность модуляций к значениям анодного напряжения и на независимость модуляций тока и периодических изменений спектра от термополевой перестройки вершины нанотрубки, ее саморазогрева и очистки, перехода решетки в неравновесное состояние, образования поверхностных электронных состояний. Таким образом, одинаковая модуляция ВАХ показывала, что она была обусловлена периодическими изменениями спектра объемных электронов, не затрагивающими спектра электронов, туннелировавших с поверхностных электронных состояний. Перечисленные особенности ВАХ в совокупности с необыкновенной периодичностью и воспроизводимостью изменений спектра до и после термополевой перестройки вершины нанотрубки указывали на интерференционную природу периодических изменений энергетического спектра автоэлектронов, туннелирующих из объема нанотрубки.

Использование интерференционной модели Юнга для двух когерентных источников позволило построить интерпретацию ВАХ(I) в терминах интерференционных максимумов и минимумов, наблюдавшихся при анодных напряжениях 3140, 3380, 3640, 3920 В и соответственно при 3060, 3300, 3560, 3840 В, хорошо ложившуюся на экспериментальные наблюдения. Перемещение интерференционных минимумов и максимумов по энергетическому спектру автоэлектронов при увеличении напряжения эмиссии в направлении низких энергий соответствовало увеличению энергии электронов и уменьшению их длин волн. Процессы смещения спектра в низкоэнергетическую область, вытягивания основания высокоэнергетического края (см. рис. 2, а) соответствовали наложению интерференционного минимума на высокоэнергетический край спектра и пологому участку ВАХ. Появление дополнительного высокоэнергетического максимума соответствовало перемещению интерференционного минимума в область максимума спектра, что спектр раздваивало (см. рис. 2, б, в). Смещение

интерференционного минимума на низкоэнергетический край спектра соответствовало быстрому росту спектра, крутому участку ВАХ и подходу интерференционного максимума со стороны высоких энергий.

Но в исследованиях углеродных нанотрубок с помощью полевого электронного проектора интерференция наблюдалась в виде отчетливых полос на экране проектора, располагавшихся между изображениями когерентных источников — пятиугольников, закрывавших эмитирующие выступы вершины нанотрубки. Полосы наблюдались как при низких, так и при высоких температурах разогрева вершины нанотрубки — 60 и 1300 К [8,9]. В нашем исследовании изображение вершины нанотрубки на экране проектора при нормальной температуре представляло собой овальное пятно ровного контраста размером $\approx 2 \times 3$ мм.

Четырехступенной манипулятор сверхвысоковакуумной установки УСУ-4 позволял перестраивать положение вершины нанотрубки относительно энергоанализатора в горизонтальной плоскости. Овальное пятно изображения вершины нанотрубки было просканировано еще в трех точках (рис. 5, а) с шагом 20 В в диапазоне анодных напряжений 3500–3700 В, при которых зондовые токи были высокими и спектры практически не требовали сглаживания. Исходное положение было принято за 0 по лимбу манипулятора, положения зондового отверстия слева -2° и -1° , положение справа $+1^\circ$.

В интервале анодных напряжений 3500–3700 В интерференционному минимуму тока на ВАХ(II) соответствовало значение анодного напряжения 3560 В, что отражалось на спектре появлением дополнительного высокоэнергетического максимума (см. рис. 5, с и 8 на рис. 3, б), а интерференционному максимуму тока — значение анодного напряжения 3640 В, соответствовавшее спектру с едва заметным дополнительным максимумом на низкоэнергетическом склоне (см. рис. 5, d и 12 на рис. 3, с).

В измеренных спектрах, как и ранее в [5], проявлялась ориентационная зависимость дополнительного низкоэнергетического максимума: его относительная величина была одинакова в положениях -2° и -1° и уменьшалась от положения -1° к $+1^\circ$. Изменения спектров, измеренных в положениях -2° , -1° и $+1^\circ$, полностью повторяли последовательность изменения спектра в положении 0° , представленную на рис. 3, а–с. По спектрам были построены ВАХ зондовых токов, имеющие волнообразные модуляции и представленные на рис. 5, б, и таблица, показывающая зависимость положения интерференционных максимумов и минимумов на ВАХ и на изображении нанотрубки от напряжения эмиссии.

Как видно из таблицы, интерференционные минимумы обнаруживаются в областях зондирования при следующих анодных напряжениях: -2° — 3610 В, -1° — 3590 В, 0 — 3560 В и $+1^\circ$ — 3540 В, а интерференционные максимумы: -2° — 3690 В, -1° — 3670 В, 0 — 3640 В и $+1^\circ$ — 3620 В. Таким образом, таблица

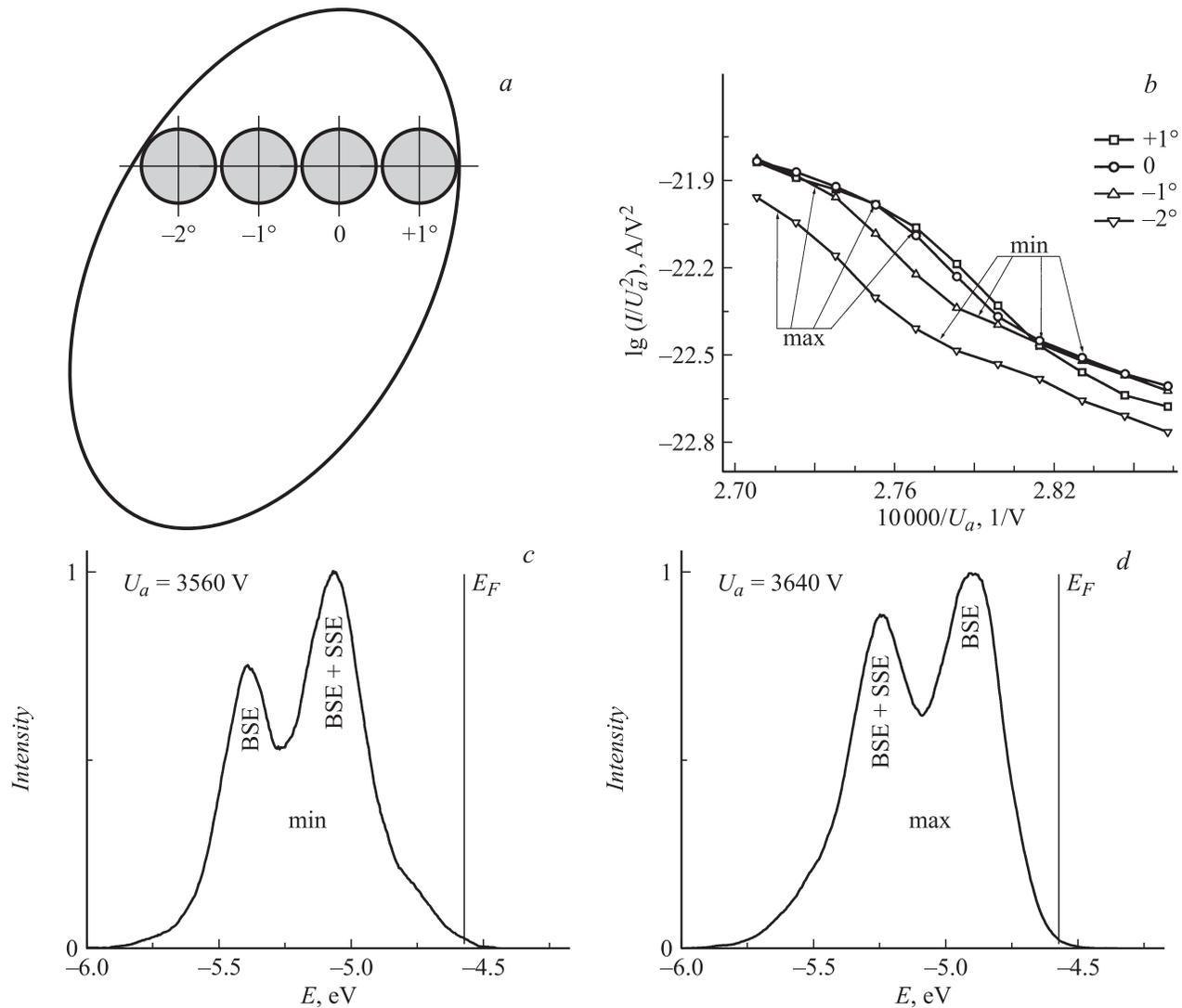


Рис. 5. *a* — положения зондового отверстия энергоанализатора на овале эмиссионного изображения вершины нанотрубки, *b* — ВАХ зондовых токов при анодных напряжениях $U_a = 3500\text{--}3700\text{ В}$; *c, d* — энергетические спектры автоэлектронов, соответствующие интерференционному минимуму и максимуму соответственно.

Зависимость положения интерференционных максимума и минимума на изображении вершины нанотрубки от напряжения эмиссии

Напряжение эмиссии, V	-2°	-1°	0	$+1^\circ$
3500				
3520				
3540				Min
3560			Min	
3580		Min		
3600	Min			
3620				Max
3640			Max	
3660		Max		
3680	Max			
3700				

демонстрирует перемещение интерференционных минимума и максимума по изображению нанотрубки при увеличении напряжения эмиссии, т. е. перемещение интерференционной полосы. Интервал по анодному напряжению между максимумом и минимумом составлял $\approx 80\text{ В}$ во всех положениях зондирования. При $U_a = 3620\text{ В}$ интерференционные максимум и минимум оказались на краях изображения вершины нанотрубки, что позволило оценить расстояние между ними величиной $\approx 1.5\text{ мм}$, а ширину интерференционной полосы на крае энергоанализатора, с учетом периода изменений спектра по анодному напряжению величиной 4.5 мм .

Детальное изучение перемещения интерференционного минимума в интервалах анодных напряжений $3060\text{--}3160$, $3300\text{--}3400$ и $3560\text{--}3660$, V позволило установить шаг его перемещения по спектру в этих интервалах: $\approx 250\text{ мэВ}/40\text{ В}$, $\approx 300\text{ мэВ}/40\text{ В}$ и $\approx 350\text{ мэВ}/40\text{ В}$ соответственно, что, в свою очередь, позволило разобратся в преобразованиях спектра, происходивших за

один период изменений, и установить, что изменения спектра на рис. 3, *a*, соответствовавшие пологому участку ВАХ, вызывались „срезанием“ высокоэнергетического края спектра объемных электронов интерференционным минимумом (спектры 1–4 на рис. 3, *a*) и формированием низкоэнергетического максимума результирующего спектра объемными электронами, а высокоэнергетического — наложением максимума поверхностных электронов (спектры 5–7 на рис. 3, *a*); изменения спектра на рис. 3, *b, c* вызывались наложением максимума поверхностных электронов на интерференционный минимум спектра объемных электронов и перемещением интерференционного минимума по спектру объемных электронов, проявлявшемся в росте высокоэнергетического и уменьшении низкоэнергетического максимумов результирующего спектра.

Таким образом, высокоэнергетические максимумы спектров на рис. 5, *c* и 8 на рис. 3, *b* представляли собой суперпозицию объемных и поверхностных электронов, средний максимум спектров 9–11 на рис. 3, *b, c* — наложение максимума поверхностных электронов на интерференционный минимум объемных, высокоэнергетические максимумы спектров на рис. 5, *d* и 12 на рис. 3, *c* были сформированы объемными электронами, а низкоэнергетические — и объемными, и поверхностными электронами в полном соответствии термодатной перестройкой вершины нанотрубки.

Кроме того, интерференция объемных электронов позволила визуально убедиться в симметрии максимума поверхностных электронов (см. спектры 9–11 на рис. 3, *b, c*) и, так же как и в случае углеродных кристаллитов, в гауссовом распределении плотности поверхностных электронных состояний.

Если в исследованиях [8,9] интерференция электронных волн при полевой эмиссии из углеродной нанотрубки наблюдалась визуально на экране электронного проектора в виде темных и светлых полос максимумов и минимумов, то в нашем исследовании изображения вершин нанотрубок на экране проектора были овальной формы и ровного контраста. Темных полос на изображении не наблюдалось, поскольку интерференционные минимумы были узкими и действовали лишь на часть энергетического спектра автоэлектронов. Сканирование спектров в четырех точках изображения показало, что при заданном напряжении эмиссии распределение интерференционных максимумов и минимумов на экране проектора полностью соответствовало модели Юнга для двух когерентных источников.

На интерференции электронных волн должна отражаться дефектность реальных эмитирующих структур, влияющая на форму, размеры и расположение когерентных источников, от которых зависят амплитуды и направления вторичных волн. Слабая интерференция, обусловленная дефектами эмитирующих выступов, вполне объясняет периодические изменения спектров и волнообразные модуляции ВАХ первой нанотрубки на рис. 2.

В исследованиях [3,4] по термодатной перестройке эмитирующих кристаллитов углеродных волокон было показано, что „гистерезис“ ВАХ полного тока углеродного автокатода, наблюдавшийся в исследованиях [7], представлял собой суперпозицию эмиссионных токов отдельных кристаллитов, которые с повышением напряжения эмиссии поочередно претерпевали термодатную перестройку, изгибая ВАХ в область меньших токов, а при понижении напряжения эмиссии давали в среднем на полпорядка меньшие токи. В тех же исследованиях неоднократно наблюдались изменения спектров, подобные представленным на рис. 1, дававшие 1.5–2 периода волнообразных модуляций на ВАХ зондовых токов, но были оставлены без внимания. Учитывая детальное совпадение изменений спектра второй нанотрубки в настоящем исследовании с изменениями спектров, наблюдавшимися в исследованиях [2,7], можно утверждать, что в исследованиях [2,7] по полевой эмиссии электронов из углеродных эмиттеров, так же как и в настоящем исследовании, изменения спектров были обусловлены тремя факторами: интерференцией объемных электронов, термодатной перестройкой эмитирующих углеродных структур и эмиссией электронов с поверхностных электронных состояний, дававших в энергетическом спектре автоэлектронов дополнительный низкоэнергетический максимум на ≈ 0.5 eV ниже основного.

Заключение

Исследованы полевые эмиссионные свойства закрытых углеродных нанотрубок с полусферическими вершинами. В широком диапазоне эмиссионных напряжений измерены энергетические спектры автоэлектронов и ВАХ зондовых токов.

Энергетические спектры автоэлектронов имели периодические изменения во всем диапазоне напряжений эмиссии. У первой нанотрубки они заключались в периодическом смещении вершины спектра в область низких, а затем высоких энергий и соответственно уменьшении либо увеличении крутизны высокоэнергетического и низкоэнергетического краев спектра. Период изменений в диапазоне анодных напряжений 3200–3700 В составлял 100–200 В. Вольт-амперная характеристика имела волнообразную модуляцию с тем же периодом, отклонения значений тока от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 14\%$.

У второй нанотрубки периодические изменения энергетического спектра автоэлектронов заключались в смещении вершины спектра в область низких энергий, появлении на основании высокоэнергетического края и последующем росте дополнительного высокоэнергетического максимума, перемещавшегося в положение основного максимума, смещении основного максимума в область низких энергий, его уменьшении и исчезновении. В диапазоне анодных напряжений 2860–3960 В

период изменений спектра постепенно увеличивался и составлял ≈ 220 , ≈ 240 , ≈ 260 и ≈ 280 V. ВАХ имела волнообразную модуляцию с тем же периодом, отклонения значений тока от усредняющей прямой Фаулера–Нордгейма в пределах одного периода достигали $\pm 35\%$.

После термополевой перестройки вершины второй нанотрубки зондовый ток эмиссии упал почти на порядок, а в энергетическом спектре автоэлектронов появился дополнительный низкоэнергетический максимум от поверхностных электронных состояний на ≈ 0.4 eV ниже основного. Изменение состояния поверхности вершины нанотрубки не повлияло на периодические изменения спектра и волнообразные модуляции ВАХ.

Объяснение наблюдаемых явлений строилось на модели интерференции Юнга от двух когерентных источников и было подтверждено сканированием энергетических спектров автоэлектронов в четырех точках изображения вершины нанотрубки. Сканирование показало перемещение интерференционной полосы по изображению нанотрубки при увеличении напряжения эмиссии, ширина этой полосы была оценена величиной 4.5 nm.

С помощью метода полевой электронной спектроскопии установлено, что причиной волнообразных модуляций ВАХ зондового тока и периодических превращений энергетических спектров автоэлектронов из одно- и двухпиковых в двух- и трехпиковые и обратно была интерференция эмитированных электронов. Интерференционные картины не наблюдались визуально на изображениях, но состояли из чередовавшихся максимумов и минимумов интерференционных полос, которые перемещались по экрану при изменении напряжения эмиссии. При измерении ВАХ зондового тока нанотрубок их волнообразная модуляция показала перемещение по экрану в первом случае пяти, а во втором — четырех интерференционных полос.

Список литературы

- [1] Heinrich H., Essig M., Geiger J. // Appl. Phys. 1977. Vol. 12. P. 197–202.
- [2] Latham R.V., Wilson D.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. Vol. 16. P. 455–463.
- [3] Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М. // ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 9. С. 108–111.
- [4] Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 3–10.
- [5] Лобанов В.М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 92–96.
- [6] Takakura A., Hata K., Saito Y. et al. // Proc. of the 47th Int. Field Emission Symp. Berlin, 2001. EP.05.
- [7] Athwal C.S., Latham R.V. // J. Phys D: Appl. Phys. 1984. Vol. 17. P. 1029–1043.
- [8] Hata K., Takakura A., Saito Y. // Surf. Sci. 2001. Vol. 490. P. 296–300.
- [9] Oshima C., Matsuda K., Kona T., Mogami Y., Yamashita T. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. Vol. 21. N 4. P. 1701–1704.