

17,12

Влияние легирования атомами цезия и калия многостенных углеродных нанотрубок, выращенных в электрической дуге, на их эмиссионные характеристики

© К.Р. Израэльянц, А.П. Орлов, А.Б. Ормонт[¶], Е.Г. Чиркова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

[¶] E-mail: ormont.73@mail.ru

(Поступила в Редакцию 7 сентября 2016 г.)

Исследовано влияние атомов цезия и калия, нанесенных на многостенные углеродные нанотрубки, выращенные в электрической дуге, на их эмиссионные характеристики. Обнаружено, что вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии образцов с многостенными углеродными нанотрубками данного типа, легированных цезием или калием, сохраняют свою прямолинейность в координатах Фаулера–Нордгейма в пределах нескольких порядков изменения эмиссионного тока. Показано, что нанесение атомов цезия и калия приводит к значительному увеличению эмиссионного тока и уменьшению работы выхода ϕ исследуемых эмиттеров с многостенными нанотрубками. Установлено, что работа выхода уменьшается при оптимальной толщине покрытия атомами цезия до $\phi \sim 3.1$ eV, а в случае легирования калием — до $\phi \sim 2.9$ eV. Найдены оптимальные условия нанесения цезия и калия для достижения максимального эмиссионного тока.

DOI: 10.21883/FTT.2017.04.44289.344

1. Введение

Углеродные нанотрубки представляют собой низковольтные автоэлектронные эмиттеры, поскольку характеризуются большим отношением длины к диаметру (aspect ratio), малым диаметром и острыми кончиками. Нанесение щелочных металлов на автоэлектронные эмиттеры на основе углеродных нанотрубок — как многостенных, так и одностенных — позволяет существенно улучшить их эмиссионные характеристики, т.е. увеличить эмиссионный ток и сделать эмиттеры еще более низковольтными (см., например, [1–4]). Влияние щелочных металлов на эмиссионные характеристики нанотрубок проявляется прежде всего в интеркаляции (внедрении) атомов щелочных металлов в нанотрубки. В случае многостенных нанотрубок (МСНТ) при наличии в их стенках дефектов существенное влияние, как указано в [1], оказывают процессы интеркаляции между слоями атомов углерода внутри нанотрубок. Для одностенных нанотрубок (ОСНТ), как показано в [5,6], интеркаляция идет между пучками нанотрубок. При интеркаляции меняется плотность электронных состояний нанотрубок и уменьшается работа выхода.

Другой возможной причиной уменьшения работы выхода и увеличения автоэмиссионного тока может быть образование двойного электрического слоя из электронов и адсорбированных положительных ионов щелочных металлов. Такая модель развита для эмиттеров из тугоплавких металлов (см. обзор [7]) и может быть использована для случая нанесения атомов щелочных металлов на МСНТ [1].

Данных по исследованию влияния щелочных металлов на эмиссионные характеристики эмиттеров с углеродными нанотрубками (УНТ) в научной литературе мало.

Исследования подобного рода проводились в основном на ОСНТ [2,4]. Между тем эта информация важна при разработке технологических процессов легирования эмиттеров на основе УНТ щелочными металлами для улучшения их эмиссионных параметров и при оценке результатов применения разрабатываемых процессов. Для решения этой задачи важным шагом является исследование характеристик таких эмиттеров.

Ранее нами исследовалось влияние легирования цезием на эмиссионные характеристики МСНТ и ОСНТ, изготовленных методом химического осаждения углерода на различные подложки (ситалл, кварц) в присутствии катализаторов [1,2]. Наиболее ясная для понимания эмиссионных процессов картина была получена в случае влияния цезия на эмиссию из ОСНТ [2], поскольку на эмиссионных характеристиках ОСНТ в координатах Фаулера–Нордгейма после нанесения цезия всегда присутствовали прямолинейные участки. В случае МСНТ характеристики сложнее интерпретировать из-за наличия скачков тока и заметных отклонений от линейности.

Важным оставался вопрос о том, существуют ли среди различных МСНТ нанотрубки, эмиссионные вольт-амперные характеристики которых в представлении Фаулера–Нордгейма после покрытия МСНТ щелочными металлами спрямлялись бы без скачков и отклонений от линейности, т.е. описывались теорией Фаулера–Нордгейма для проводников. В нашем распоряжении имелись МСНТ, выращенные иначе, чем исследованные в [1], — в электрической дуге — и имеющие иную пространственную структуру. Влияние легирования этих МСНТ щелочными металлами на их эмиссионные характеристики изучено не было.

В настоящей работе поставлена задача исследовать эмиссионные характеристики синтезированных в дуге

МСНТ, легированных цезием и калием, а также сравнить особенности влияния цезия на характеристики поразному синтезированных МСНТ (в дуге и методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ)).

2. Методика эксперимента

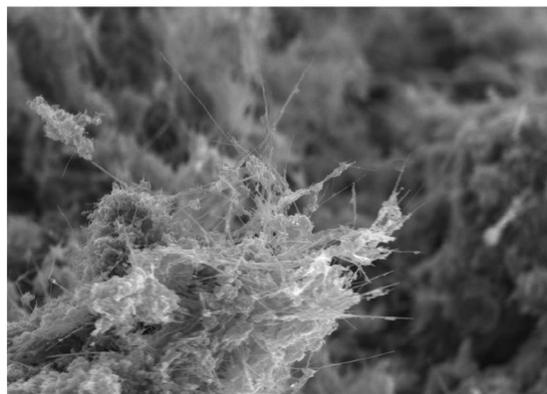
Исследования проводились на эмиттерах с МСНТ, выращенными в электрической дуге в гелии. В этом методе роста на отрицательном электроде образуется слой катодного депозита, состоящий из аморфного углерода с выросшими внутри него отдельными многостенными углеродными нанотрубками, выступающими на сломе депозита из его толщи.

Исследуемые образцы эмиттера представляли собой кусочки разломанного депозита размером в десятки микрометров, наклеенные проводящей серебряной пастой на никелевую пластинку размером $\sim 10 \times 9$ мм. На рис. 1 представлено микроизображение участка поверхности кусочка депозита на эмиттере, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Видны отдельные нанотрубки, торчащие из слоя аморфного углерода, выглядящего как темно-серые рыхлые образования. По оценкам длина нанотрубок равна $0.5\text{--}4\ \mu\text{m}$. Диаметр нанотрубок, найденный из рис. 2, где показаны нанотрубки при большем увеличении, лежит в диапазоне $10\text{--}20$ нм.

Эксперименты по измерению эмиссионных характеристик эмиттеров с нанесенным цезием и калием на эмиттеры после их предварительной очистки путем прогрева большим эмиссионным током проводились в камере универсальной сверхвысоковакуумной установки (УСУ-4) в вакууме $p \sim 5 \cdot 10^{-10}$ Торр. Во время отжига источников цезия и калия вакуум ухудшался до $p \sim 1 \cdot 10^{-8}$ Торр. Эмиттер вставлялся в держатель, закрепленный на универсальном манипуляторе, имеющем три поступательные и одну вращательную степени свободы. Манипулятор позволял отводить исследуемый эмиттер от анода, где он находился в режиме измерения автоэлектронной эмиссии, и подводить его к источнику цезия или калия на расстояние в несколько сантиметров. На фланце с токовыми вводами были смонтированы анод, представлявший собой стержень из нержавеющей стали, оканчивающийся полусферой диаметром 2 мм, а также источники цезия и калия.

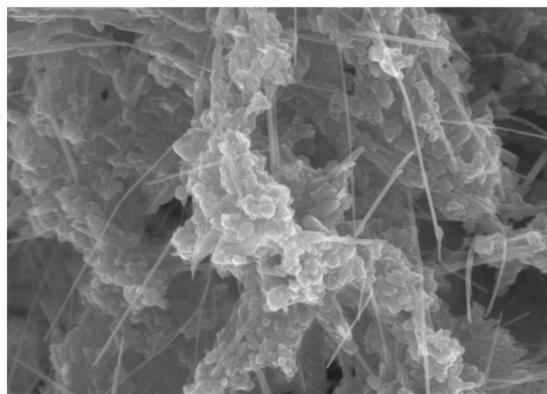
При нанесении цезия или калия соответствующий предварительно отожженный источник на основе хромата цезия или калия нагревался пропусканием через него электрического тока. При нагреве хромат щелочного металла разлагался с выделением свободных атомов цезия или калия. Последние попадали на образец, создавая на поверхности слой порядка суб- или моноатомного. Все нанесения слоев цезия и калия проводились в рабочем режиме источников при токах $I = 2.6$ А.

При выполнении эмиссионных измерений исследуемый образец эмиттера располагался напротив анода. Расстояние d между анодом и образцом составляло



— 1 μm

Рис. 1. Полученное в РЭМ микроизображение участков поверхности эмиттера с МСНТ, торчащими из толщи катодного депозита, выращенного в электрической дуге.



— 100 нм

Рис. 2. Микроизображение нескольких МСНТ на эмиттере, полученное в РЭМ при большем, чем на рис. 1, увеличении.

около $400\ \mu\text{m}$. Оно измерялось по разности отсчетов лимба манипулятора в положении измерений эмиссии и в положении касания анодом образца (определялось по появлению электрического контакта между анодом и эмиттером).

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) автоэлектронной эмиссии проводились с помощью приборов фирмы Кейсли: программируемого источника высокого напряжения (Keithley 248), пикоамперметра (Keithley 6485) с персональным компьютером с адаптером интерфейса IEEE-488 системы GPIB с программным обеспечением. Для управления указанными приборами была модернизирована программа, созданная на базе программного пакета Test Point фирмы СЕС.

Все эксперименты начинались с очистки исследуемого образца прогревом эмиссионным током в десятки микроампер в течение нескольких минут. После очистки и остывания в сверхвысоком вакууме проводились измерения вольт-амперных эмиссионных характеристик. Сравнивая ВАХ, полученные на разных этапах эксперимента, можно было судить о качестве очистки.

Перед проведением эмиссионных экспериментов с нанесением цезия или калия одновременно с очисткой производилась тренировка эмиттера при токах эмиссии до $50 \mu\text{A}$ до получения стабильной и воспроизводимой ВАХ.

3. Результаты экспериментов

Суб- и моноатомные слои атомов цезия или калия наносились на очищенный образец. Нанесение производилось двумя путями: либо непрерывно в течение некоторого времени, либо несколько раз последовательно с перерывами для измерения эмиссионных характеристик эмиттера. Во втором случае очередной слой наносился на предыдущий. В ходе эксперимента производилось сравнение характеристик чистого образца и образца, покрытого одним или несколькими слоями цезия или калия.

Всего было выполнено две серии экспериментов с нанесением цезия и одна серия экспериментов с нанесением калия.

В первой серии экспериментов наносились слои цезия с различной поверхностной плотностью, определяемой временем нанесения (60, 120 и 180 s) на очищенный образец. После каждого нанесения атомов цезия и измерения соответствующих ВАХ образец очищался прогревом большим эмиссионным током. Во второй серии экспериментов нанесение цезия было выполнено путем трех последовательных нанесений одно на другое в течение 10 s каждое. Таким образом, суммарная плотность слоя цезия соответствовала времени нанесения, равному 30 s, а образец при этом очищался только один раз перед первым нанесением цезия.

Нанесение калия в соответствующей серии экспериментов велось последовательно, слой за слоем, с полным временем нанесения 10, 30, 120, 300 s. В целом в экспериментах с цезием поверхностная плотность нанесенных атомов, пропорциональная времени нанесения, варьировалась таким образом, что отношение максимальной плотности к минимальной составляло 18 раз. В серии экспериментов с калием плотность нанесенных слоев атомов калия варьировалась в пределах 30 раз.

Разница в проведении экспериментов с цезием и калием была обусловлена тем, что цезий является более активным металлом, чем калий, и его длительное нанесение с промежуточными измерениями существенно увеличило бы время эксперимента, что могло бы исказить его результаты из-за возможной миграции или десорбции части атомов цезия в процессе измерений.

Автоэлектронные эмиссионные характеристики одного из образцов эмиттера — как предварительно очищенного, так и с четырьмя нанесенными после очистки слоями цезия разной поверхностной плотности — представлены на рис. 3 в координатах $\lg I = f(E_{av})$ (a) и в координатах Фаулера–Нордгейма $\lg(I/E_{av}^2) = f(1/E_{av})$ (b). Здесь E_{av} — среднее электрическое поле в зазоре

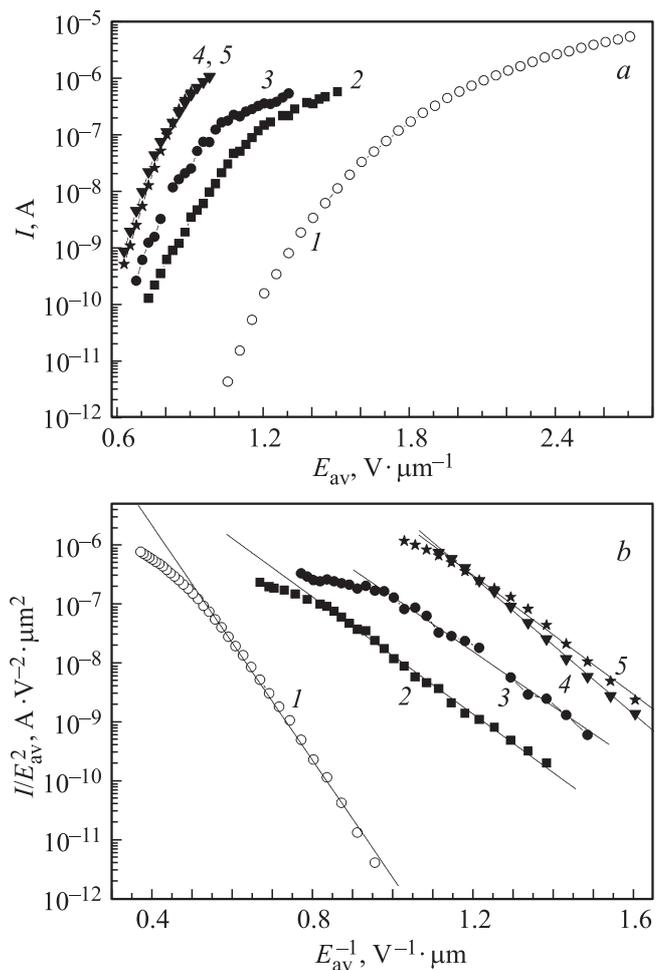


Рис. 3. ВАХ автоэлектронной эмиссии из образца эмиттера с МСНТ после первой очистки образца эмиссионным током (1), после двух серий последовательных нанесений атомов цезия в течение 10 (2) и 30 s (3) и после двух отдельных нанесений атомов цезия на очищенный образец с МСНТ в течение 60 (4) и 180 s (5). a — характеристики в координатах $\lg I = f(E_{av})$. b — те же характеристики, перестроенные в координатах Фаулера–Нордгейма $\lg(I/E_{av}^2) = f(1/E_{av})$.

анод–эмиттер, равное $E_{av} = V/d$, где V — приложенное напряжение, d — расстояние анод–эмиттер. Как видно из рис. 3, b, характеристики в координатах Фаулера–Нордгейма являются прямолинейными как для чистого образца, так и для образцов после нанесения любого из слоев атомов цезия, т.е. соответствуют теории Фаулера–Нордгейма [8] для автоэлектронной эмиссии из проводников. Этой особенностью характеристики изучаемых в данной работе образцов отличаются от характеристик многостенных нанотрубок, исследованных в работе [1], которые имели скачки тока и отклонения от линейности в координатах Фаулера–Нордгейма.

Характеристики, измеренные после процедур чисток, свидетельствуют о том, что эмиттер хорошо очищается прогревом после многократного напыления цезия: кривые близки друг к другу и схожи с характеристикой

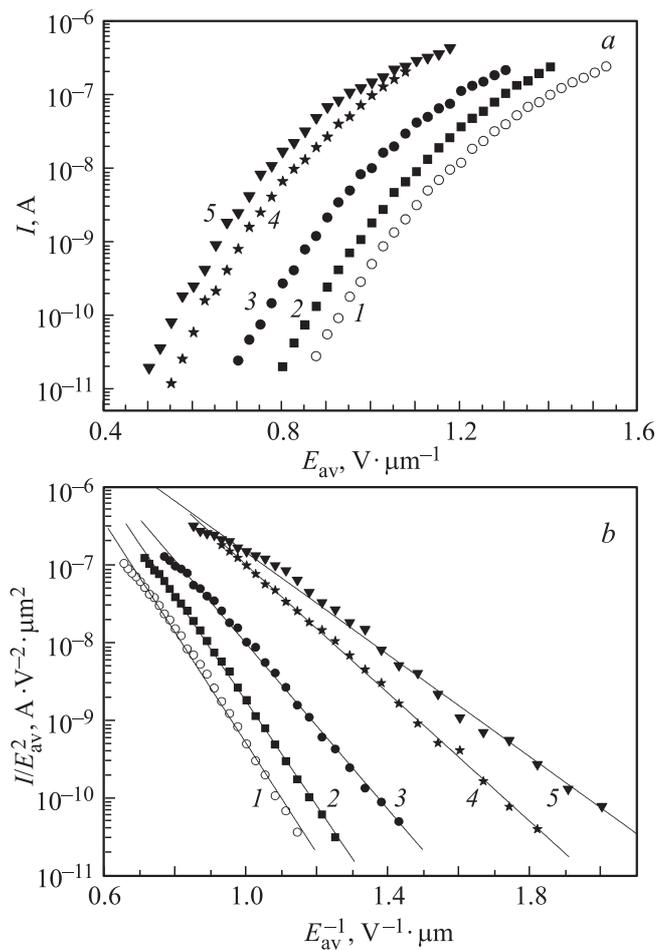


Рис. 4. ВАХ автоэлектронной эмиссии из образца с МСНТ после очистки его эмиссионным током (I), а также после четырех последовательных нанесений атомов калия в течение 10 (2), 30 (3), 120 (4) и 300 с (5). a — характеристики в координатах $\lg I = f(E_{av})$. b — те же характеристики, перестроенные в координатах Фаулера–Нордгейма $\lg(I/E_{av}^2) = f(1/E_{av})$.

после первой чистки, сопровождаемой долгой выдержкой эмиттера в сверхвысоком вакууме. В координатах Фаулера–Нордгейма все эмиссионные характеристики близки к прямолинейным. Анализ результатов, изложенный в следующем разделе, для разных эмиссионных характеристик очищенных образцов в экспериментах с нанесением цезия дал незначительные отличия в наклонах спрямленных характеристик, связанных с важным параметром — коэффициентом усиления электрического поля. Этот параметр менялся в диапазоне значений 3000–3500.

Результаты измерений автоэлектронных характеристик одного из эмиттеров с МСНТ при его легировании тонкими слоями калия показаны на рис. 4, a, b . Представлены характеристики автоэлектронной эмиссии для одного из образцов: после предварительной очистки и после нанесения калия в течение 10, 30, 120, 300 с.

Из рис. 3, a и 4, a следует, что нанесение цезия или калия на эмиттер с МСНТ ведет к значительному умень-

шению порогового электрического поля E_{av} — поля, при котором эмиссионный ток I равен при покрытии цезием $\sim 10^{-9}$ А, а при покрытии калием $I \sim 10^{-10}$ А. При нанесении цезия пороговое поле E_{av} уменьшается от $E_{av} = 1.25$ до $0.63 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. При нанесении калия соответствующее пороговое поле уменьшается от $E_{av} = 0.95$ до $0.55 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

4. Анализ экспериментальных данных

Процедура обработки и анализа полученных результатов была одинаковой для всех экспериментов. Вольт-амперные характеристики анализировались на базе теории Фаулера–Нордгейма [8] подобно тому, как это делалось в [1]. Согласно этой теории, плотность тока автоэлектронной эмиссии j связана с локальным электрическим полем E вблизи поверхности эмиттера выражением

$$j = \frac{1.5 \cdot 10^{-6} E^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{6.8 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E}\right). \quad (1)$$

Здесь j выражена в $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, E — в $\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, а работа выхода φ — в eV. Если перейти от плотности тока к току I в соответствии с выражением $I = jS$, где S — эмиссионная площадь, и от локального поля E у поверхности эмиттера к среднему электрическому полю E_{av} в соответствии с формулой $E = \beta E_{av}$, где β — коэффициент усиления электрического поля, получим для эмиссионного тока

$$I = \frac{1.5 \cdot 10^{-6} S \beta^2 E_{av}^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{6.8 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{\beta E_{av}}\right). \quad (2)$$

Здесь эмиссионная площадь эмиттера S представляет собой сумму эмиссионных площадей S_i отдельных эмитирующих нанотрубок. Анализируя формулу (2), можно получить выражения для основных параметров эмиттеров: β и S . Если электрическое поле выражено в $\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, а по оси ординат отложены десятичные логарифмы тока, как на рис. 3, a и 4, a , то можно получить следующие выражения:

$$\beta = \frac{2.83 \cdot 10^3 \varphi^{3/2}}{B}, \quad (3)$$

$$S = \frac{\varphi}{1.5 \cdot 10^{-6} \beta^2} \cdot 10^{A-8}. \quad (4)$$

Здесь B — наклон ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма, A — пересечение продолжения ВАХ с осью ординат в этих координатах. Величины A и B определялись путем линейной аппроксимации вольт-амперных характеристик в координатах Фаулера–Нордгейма.

Для определения величины β по формуле (3) необходимо знать работу выхода φ . Мы предполагали, что для очищенных МСНТ работа выхода $\varphi = 4.7$ eV, такая же как для графита, и определили из формулы (3) величину β . Мы получили $\beta = 3000$ – 3200 для первой серии

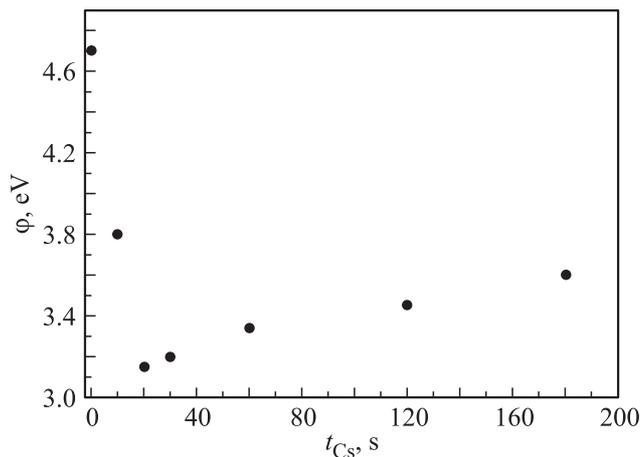


Рис. 5. Зависимость работы выхода МСНТ φ от полного времени нанесения слоя (слоев) цезия t_{Cs} в диапазоне 10–180 с на предварительно очищенный эмиссионным током эмиттер с МСНТ.

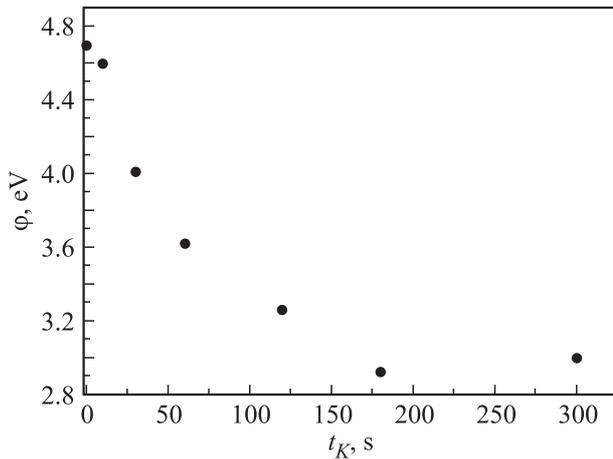


Рис. 6. Зависимость работы выхода МСНТ φ от полного времени нанесения слоев калия t_K в диапазоне 10–300 с на очищенный эмиссионным током эмиттер с МСНТ.

экспериментов с нанесением цезия и $\beta = 3200\text{--}3500$ для второй серии экспериментов. При анализе характеристик других образцов, на которые наносился калий, были получены величины $\beta \sim 4000$.

Далее, представляя формулу (3) в виде

$$\varphi = \left(\frac{\beta V}{2.83 \cdot 10^3} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

определяли работу выхода МСНТ с нанесенными атомами цезия или калия. При этом имелось в виду, что нанесение цезия или калия на МСНТ не могло изменить величину β , поскольку не меняло структуру нанотрубного слоя, а лишь увеличивало эмиссионный ток, сдвигало вольт-амперную характеристику в сторону меньших средних электрических полей и уменьшало работу выхода φ . Полученные значения приведены на

рис. 5 и 6 в зависимости от времени нанесения щелочных металлов.

Анализ данных, полученных на основе эмиссионных ВАХ, позволил найти эмиссионные площади с помощью формул (3), (5), (4). Эмиссионные площади для случаев нанесения цезия и калия приведены в табл. 1 и 2. Результаты для цезия и калия сильно различаются. При нанесении цезия эмиссионные площади S слегка уменьшаются от $S \sim 5 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2$ для чистых образцов до $S \sim (1.5\text{--}2) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2$ при малых временах нанесения (до 30 с), а затем резко возрастают вплоть до $S \sim 10^{-8} \text{ cm}^2$ при времени нанесения цезия, равном 180 с. При нанесении калия эмиссионные площади непрерывно уменьшаются от значения для чистых образцов $S \sim 4 \cdot 10^{-11}$ до $\sim 10^{-12} \text{ cm}^2$ для времени нанесения 300 с. Можно предположить, что изменение эмиссионных площадей отражает меняющееся число участвующих в автоэлектронной эмиссии МСНТ, и в этом смысле цезий как наиболее активный металл способствует созданию новых эмиссионных центров среди множества УНТ.

Изложенный подход к анализу автоэлектронных эмиссионных характеристик универсален и был нами применен, в частности, в работе [9] при анализе эмиссионных характеристик длинных нанонитей/нанотрубок.

Таким образом, нанесение атомов цезия на многостенные углеродные нанотрубки, полученные в электрической дуге, приводит к значительному увеличению эмиссионного тока и снижению работы выхода до $\varphi = 3.1 \text{ eV}$ ($\varphi = 4.7 \text{ eV}$ для очищенного эмиттера). Это значение отличается от максимального изменения работы выхода для МСНТ в работе [1], где было достигнуто снижение работы выхода до $\varphi \sim 2.1\text{--}2.3 \text{ eV}$ в тех случаях, когда соответствующие характеристики в координатах Фаулера–Нордгейма были прямолинейными. В нашем

Таблица 1. Эмиссионные площади S эмиттера с МСНТ при нанесении цезия

Время нанесения $t, \text{ s}$	Эмиссионные площади $S, \text{ cm}^2$
Очищенный эмиттер	$5 \cdot 10^{-11}$
10	$1.5 \cdot 10^{-11}$
30	$2 \cdot 10^{-11}$
60	$7 \cdot 10^{-9}$
180	$1 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2. Эмиссионные площади S эмиттера с МСНТ при нанесении калия

Время нанесения $t, \text{ s}$	Эмиссионные площади $S, \text{ cm}^2$
Очищенный эмиттер	$4 \cdot 10^{-11}$
10	$3.5 \cdot 10^{-11}$
30	$7.5 \cdot 10^{-12}$
120	$1.5 \cdot 10^{-12}$
300	$1 \cdot 10^{-12}$

случае достигнутое уменьшение работы выхода для МСНТ близко к значениям, полученным в работе [3] для покрытий цезием сравнимой толщины. В [3] работа выхода уменьшалась до 2.9–3.2 eV от исходного значения 5.0 eV при слое цезия, нанесенном за 240 с.

Минимальные значения работы выхода ϕ , как следует из рис. 5, были получены при нанесении цезия в течение 20–30 с ($\phi = 3.1–3.2$ eV). Таким образом, существенное изменение работы выхода при нанесении цезия формируется при слоях цезия, нанесенных за короткое время (порядка нескольких десятков секунд).

В случае нанесения калия минимальное значение работы выхода $\phi \sim 2.9$ eV (рис. 6) было получено при времени нанесения 180 с.

В координатах Фаулера–Нордгейма характеристики различно легированных цезием образцов эмиттеров, а также характеристики очищенных эмиссионным током образцов спрямлялись в диапазоне эмиссионных токов шире чем $I \sim 3 \cdot 10^{-10}–1 \cdot 10^{-7}$ А, калием — шире чем $I \sim 3 \cdot 10^{-11}–1 \cdot 10^{-7}$ А. Таким образом, автоэлектронная эмиссия из исследуемых структур, легированных цезием и калием, полностью подчиняется теории Фаулера–Нордгейма.

В результате проведенной работы были определены оптимальные условия нанесения цезия и калия для получения эмиттеров с высокими эмиссионными параметрами, при которых наблюдаются малые работы выхода. Они выражены через времена нанесения цезия и калия при токе протяженного источника цезия или калия 2.6 А с расстояния в несколько сантиметров в сверхвысоком рабочем вакууме $p \sim 5 \cdot 10^{-9}$ Торр.

5. Заключение

Проведенные исследования эмиттеров с МСНТ, полученными в электрической дуге, дали следующие результаты.

1. Все эмиссионные характеристики таких эмиттеров с МСНТ в координатах Фаулера–Нордгейма являются прямолинейными в широких интервалах токов (три–четыре порядка) как для очищенных образцов, так и для образцов, легированных цезием или калием. Эмиссионные характеристики исследованных в работе образцов, покрытых цезием, отличаются от характеристик ранее исследованных образцов с МСНТ, изготовленных методом ХОГФ (где после покрытия цезием измеренные последовательно характеристики демонстрировали отклонения от прямолинейности, скачки и нестабильность).

2. Показано, что нанесение атомов цезия на исследованные эмиттеры с МСНТ приводит к значительному увеличению эмиссионного тока и снижению работы выхода до $\phi \sim 3.1$ eV по сравнению с $\phi \sim 4.7$ eV для очищенного эмиттера. Нанесение атомов калия на эти МСНТ приводит, так же как в случае с цезием, к значительному увеличению эмиссионного тока и снижению работы выхода до $\phi \sim 2.9$ eV по сравнению с 4.7 eV для очищенного эмиттера.

3. Показано, что при легировании цезием среднее пороговое электрическое поле E_{av} исследованных МСНТ при токе эмиссии $I \sim 10^{-9}$ А снижается с $E_{av} \sim 1.25$ V· μm^{-1} для очищенных образцов до $E_{av} \sim 0.63$ V· μm^{-1} для легированных образцов.

4. Эмиссионные площади при нанесении цезия и калия на исследованные МСНТ сильно различаются. При нанесении цезия эмиссионные площади уменьшаются от значения $S \sim 5 \cdot 10^{-11}$ cm² для чистых образцов до $\sim (1.5–2) \cdot 10^{-12}$ cm² для малого времени нанесения (до 30 с), а затем резко возрастают до $\sim 10^{-8}$ cm² для времени нанесения 180 с. При нанесении калия эмиссионные площади непрерывно уменьшаются от значения $S \sim 4 \cdot 10^{-11}$ cm² для чистых образцов до значения $S \sim 10^{-12}$ cm² для времени нанесения 300 с.

5. Найдены условия нанесения цезия и калия на эмиттеры на основе исследованных МСНТ, позволяющие получать эмиттеры с улучшенными характеристиками. Эти условия включают в себя предварительную очистку эмиттеров путем отжига в течение нескольких минут–десятиков минут большим эмиссионным током ($I \sim 50$ μA) и последующее нанесение на очищенный образец цезия или калия. Для цезия оптимальное время нанесения в сверхвысоком вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ Торр составляет $\sim 20–30$ с, для калия — около 180 с.

В целом, как показано в настоящей работе, легирование (покрытие) цезием и калием улучшает параметры эмиттеров с МСНТ, выращенными в электрической дуге. Ранее не так явно это было продемонстрировано в нашей работе [1] и в работе [3] для покрытия цезием МСНТ других типов, в частности изготовленных химическим осаждением из газовой фазы. Улучшение параметров связано прежде всего с уменьшением работы выхода и проявляется в росте эмиссионных токов и снижении пороговых полей эмиссии.

Авторы благодарят А.Л. Мусатова за ценные замечания и полезные советы при проведении экспериментов и обсуждении их результатов.

Список литературы

- [1] А.Л. Мусатов, К.Р. Израэльянц, Е.Г. Чиркова. ФТТ **56**, 806 (2014).
- [2] А.Л. Мусатов, К.Р. Израэльянц, Е.Г. Чиркова, А.В. Крестинин. ФТТ **53**, 1428 (2011).
- [3] D.H. Kim, H.R. Lee, M.W. Lee, J.H. Lee, Y.H. Song, J.G. Jee, S.Y. Lee. Chem. Phys. Lett. **355**, 53 (2002).
- [4] B. Ha, C.J. Lee. Appl. Phys. Lett. **90**, 023 108 (2007).
- [5] O. Zhou, R.M. Fleming, D.W. Murphy, C.H. Chen, R.C. Haddon, A.P. Ramirez, S.H. Glarum. Science **263**, 1744 (1994).
- [6] S. Suzuki, M. Tomita. J. Appl. Phys. **79**, 3739 (1996).
- [7] Л.А. Большов, А.П. Напартович, А.Г. Наумовец, А.Г. Федорус. УФН **122**, 125 (1977).
- [8] R.H. Fowler, L.W. Nordheim. Proc. Roy. Soc. London A **119**, 173 (1928).
- [9] А.Б. Ормонт, К.Р. Израэльянц, А.Л. Мусатов. ФТТ **58**, 191 (2016).