**ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБ ***

*Н.И. Синицын, Ю.В. Гуляев, Г.В. Торгашов, Ю.А. Григорьев, А.И. Жбанов,
Л.А. Чернотанский, Ю.Ф. Захарченко, А.Л. Мусатов, О.Е. Глухова,
С.А. Князев, И.Г. Торгашов*

Обсуждаются результаты исследования полевой эмиссии электронов из нанотрубных углеродных структур, являющихся новым материалом эмиссионной электроники. Выполненные в виде тонких пленок, они характеризуются низкой работой выхода электронов и обеспечивают высокую и устойчивую полевую эмиссию электронов в условиях технического вакуума, а также значительную термоэлектронную эмиссию уже при низких температурах. Рассматриваются некоторые пути увеличения полевой эмиссии из углеродных нанотрубок.

Введение

Открытие углеродных нанотрубок, также часто называемых в литературе тубеленами, можно отнести к наиболее значительным достижениям науки наших дней. Занимая до некоторой степени промежуточное положение между графитом и фуллеренами, эта форма углерода по многим свойствам полностью отличается и от графита, и от фуллеренов, и может рассматриваться как новый материал, обладающий уникальными физико-химическими характеристиками [1,2]. Этот материал представляет большой интерес для самых разных направлений современной науки и техники, в том числе и для электроники. Что касается вакуумной микроэлектроники, то в ней интерес, проявляемый к углеродным нанотрубкам (тубеленам), связан прежде всего с возможностью получения с них значительной и стабильной полевой эмиссии электронов. Это связано с тем, что именно углеродные нанотрубки, сохраняя многие уникальные и важные для практики свойства углеродных структур, имеют чрезвычайно удачную геометрию для создания на их основе эффективных полевых эмиттеров электронов.

Возможность получения полевой эмиссии электронов из нанотрубных углеродных структур впервые была предсказана и экспериментально обнаружена нами в конце 1993 года. Результаты были доложены на VII Международной конференции по вакуумной микроэлектронике в Гренобле (Франция) в июле 1994 года [3]. Уже тогда стало ясно, что тубелены можно рассматривать как перспективный материал для создания полевых эмиттеров. Действительно, к настоящему времени в данном направлении получены интересные и перспективные результаты (см., например, [4–7]).

* Статья написана по материалам лекции, прочитанной на XI Международной школе по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов, 2–6 марта, 1999 г.

Мы остановимся на результатах исследования полевой эмиссии электронов из тонких углеродных пленок, содержащих нанотрубные структуры. Они характеризуются низкой работой выхода, обеспечивают достаточно высокую и устойчивую полевую эмиссию электронов в условиях технического вакуума и к тому же позволяют уже при низких температурах получить значительную термоэлектронную эмиссию. Исследования особенностей работы созданных структур позволят определить некоторые пути улучшения их характеристик.

1. Тонкие углеродные нанотрубные пленки

Углеродная нанотрубка, или тубелен, представляет полую вытянутую цилиндрическую гипермолекулу углерода. Некоторые тубелены можно описать формулой $C_{m+18(или\ 12)n}$, где $n=1,2,\dots$. Диаметр таких молекул составляет порядка 1 нм, они начинаются и заканчиваются половинками сфероидных молекул C_m , где $m \geq 36$ [8, 9]. Однако на практике, когда для получения полевой эмиссии с таких углеродных нанотрубок их необходимо располагать на несущей подложке, подобных идеальных молекул получить не удастся и картина выглядит обычно много сложнее. В большинстве случаев нанотрубки бывают двух типов. Одни состоят из полых одиночных нанотрубок, которые называются однослойными нанотрубками. Другие состоят из нескольких графитовых слоев, вложенных один в другой или навитых на общую ось. Такие нанотрубки получили название многослойных нанотрубок. Выращенные, например, на одной подложке однослойные и многослойные нанотрубки различной геометрии и в различных сочетаниях могут примыкать одна к другой. Поэтому и форма вершин однослойных и многослойных нанотрубных структур может быть достаточно разнообразной.

В выполненных нами экспериментальных исследованиях углеродные нанотрубные структуры создавались в виде тонких пленок на поверхности подложки, и вершины нанотрубных структур ориентировались нерегулярно к поверхности подложки. Исследования поверхности созданных тонких углеродных тубеленовых пленок показали, что тубелены могут собираться в волокна диаметром $3 \div 5$ нм, волокна, в свою очередь, могут образовывать кабели диаметром от $10 \div 30$ нм и более.

Нами, в основном, исследовались два типа тубеленов [3, 8–14]. Один из них, как было сказано выше, представляет собой однослойные трубки диаметром $0.6 \div 1.1$ нм, которые, в свою очередь, могут быть скручены в жгуты диаметром около 10 нм. Другой представляет собой многослойные трубки диаметром до 10 нм, закрытые сверху шапочкой, которые, в свою очередь, могут быть скручены в жгуты диаметром $30 \div 100$ нм. Условно назовем их тубеленами А и В-типа, соответственно. В пленках В-типа наблюдалось небольшое количество полиэдрических многослойных частиц «опионов», в пленках А-типа – небольшое количество нанокристаллов из C_{60} фуллеренов размерами до 100 нм [14]. Последние, по нашему предположению, образуются при начальной стадии роста пленок и могут служить основой для эпитаксиального роста пучка нанотрубок диаметром около 1 нм. Толщина пленок, несущих на своей поверхности нормально ориентированные к подложке углеродные нанотрубки, изменялась от 0.1 до 0.5 мкм.

К настоящему времени известно достаточно много способов получения тубеленовых пленок. Однако в проведенных экспериментах исследовались и использовались в основном два разработанных нами и, на наш взгляд, наиболее удачных способа [12]. Первый состоял в испарении графита в вакууме электронным пучком и последующем осаждении атомов углерода на подложке. Второй включал формирование требуемых фаз углерода в зонах ионной рекомбинации низкотемпературной газоразрядной плазмы. Основное достоинство развитого метода состоит в том, что сформированные плазменные потоки инертных газов, распыляя мишень, участвуют и в образовании совершенно новых по свойствам структур и пленок, когда эффект ионной рекомбинации используется

как дополнительный активизирующий фактор. Оба использованных способа позволяли создавать углеродные нанотрубчатые пленки с нанотрубками, ориентированные перпендикулярно к подложке.

Исследования проводимости таких пленок, содержащих текстуру с преимущественным направлением нанотрубок по нормали к подложке, показали ее прыжковый механизм. По-видимому, он связан с туннельным перескоком электронов с одной проводящей трубы на другую. Эти свойства позволили осуществить эксперименты как на проводящих, так и на диэлектрических подложках [14]. Проводимость вдоль тубелена выше поперечной и составляет 100 сименс/см [15], микротвердость выращенной пленки приближается к алмазу, составляя 4000 кг/мм² [16]. В качестве подложек исследовались различные материалы, в том числе кварц, стекло, кремний, молибден, никель. Замечено, что тип тубелена в определенной степени определяется структурой подложки, на которой он растет. Так, к примеру, тубелены А-типа легче создаются на кварцевой подложке, а тубелены В-типа – на кремниевой.

На рис. 1 представлены рельефы поверхности пленок, обеспечивающих высокую полевую эмиссию с тубеленами А и В-типа, полученные с помощью

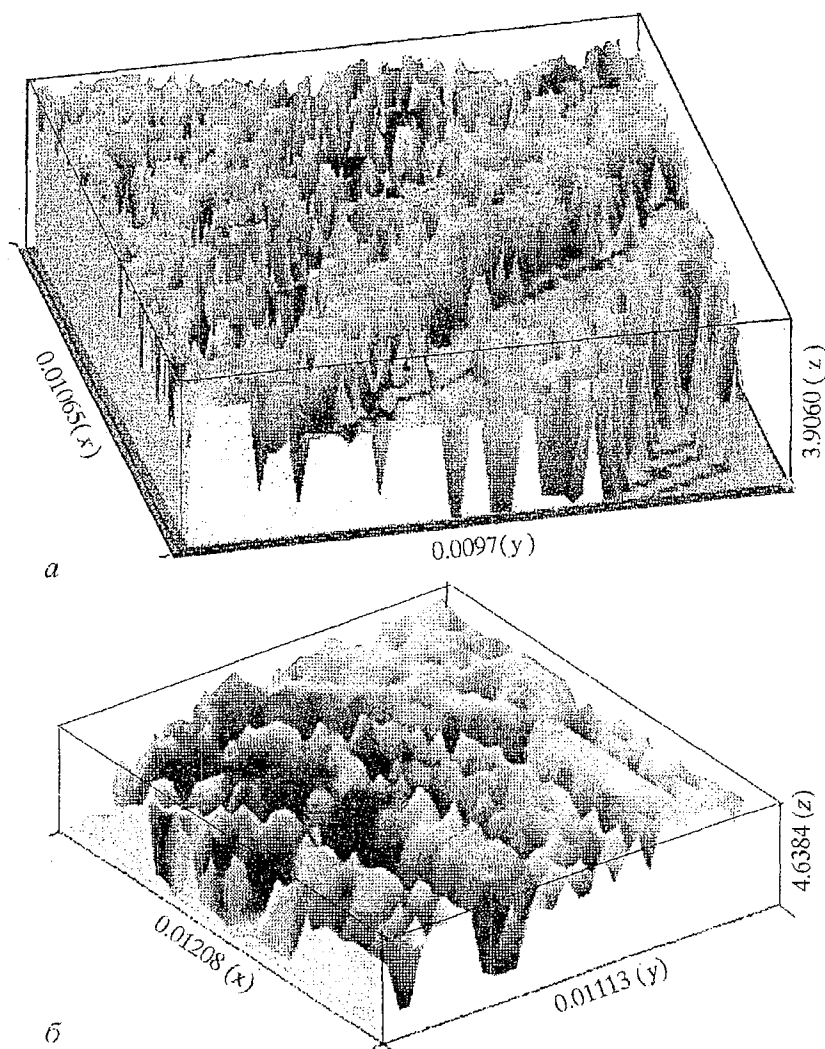


Рис. 1. Изображения поверхности тубеленовой пленки, полученные с помощью сканирующего туннельного микроскопа: *а* – поверхность пленки с тубеленами А-типа диаметром 0.6 ± 1.2 нм; *б* – поверхность пленки с тубеленами В-типа диаметром 3 ± 15 нм. Размеры по осям *x* и *y* даны в мкм, по оси *z* – в нм

сканирующего туннельного микроскопа. В пленке с тубеленами А-типа (рис. 1, а) диаметр тубеленов составлял 0.6 ± 1.2 нм, в пленке В-типа (рис. 1, б) диаметр тубеленов достигал 3 ± 15 нм. Развита нами технология позволяла предотвращать сворачивание нанотруб в жгуты. Как видно из рис. 1, диаметр многих нанотруб не превышал 10 \AA при их высоте $30 \pm 50 \text{ \AA}$, что соответствовало плотности упаковки более 10^{14} штук на квадратный сантиметр. В этом случае нагрузка на эмитирующие центры существенно снижается в сравнении с традиционными типами острых катодов [17].

2. Полевая эмиссия электронов из нанотрубных углеродных пленок

Заметная полевая эмиссия электронов с пленок А-типа начинается при напряженности поля $E=15 \text{ В/мкм}$ с плотностью тока 0.03 А/см^2 . Полевая эмиссия с пленок В-типа достигает тех же значений плотности тока при более высоких напряжениях, что связано в первую очередь с большим диаметром тубеленов В-типа.

Сравнительные характеристики Фаулера – Нордгейма для пленок А и В-типов, острых кремниевых катодов [17] и алмазоподобных пленок [18] приведены на рис. 2. Представленные характеристики показывают, что электронный ток J с тубеленовых пленок имеет автоэмиссионный характер. Причем по своим автоэмиссионным характеристикам пленки из углеродных нанотруб ближе к алмазоподобным, а эффективная работа выхода электронов с пленки А-типа, судя по наклону прямой Фаулера – Нордгейма, наиболее низкая. Плотность автоэмиссионного тока с созданных тубеленовых пленок достигала 10 А/см^2 , а с отдельных участков поверхности пленки с однослойными нанотрубными структурами она превышала эти значения.

Анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок из углеродных нанотруб в режиме автоэмиссии с использованием классической формулы Фаулера – Нордгейма без учета рельефа поверхности позволяет оценить эффективную работу выхода электронов. Полученная величина работы выхода находилась вблизи уровня в 1 эВ [12–16]. Столь низкая величина работы выхода является неожиданным результатом. В этой связи следует подчеркнуть, что вопрос определения работы выхода из нанотрубных углеродных структур продолжает в настоящее время оставаться сложным и представляет самостоятельную задачу [14].

В связи с изложенным чрезвычайно интересен вопрос, связанный с возможностью увеличения плотности автоэмиссионного тока с пленочных нанотрубных структур или на первом этапе исследований, по крайней мере, с оценкой такой возможности.

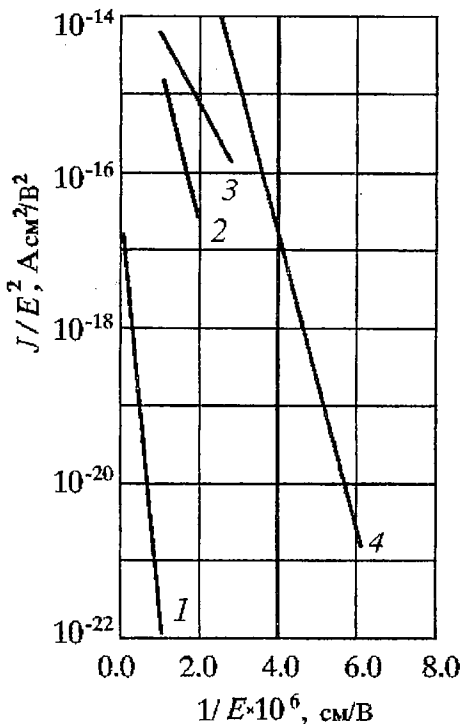


Рис. 2. Характеристики Фаулера – Нордгейма для: 1 – кремниевого острого катода, 2 – пленки с тубеленами В-типа, 3 – пленки с тубеленами А-типа, 4 – алмазоподобной пленки

3. Эмиссия стеклоуглеродной полевой матрицы

Малая работа выхода углеродных нанотрубок позволяет улучшить характеристики монокристаллических острийных углеродных матриц [19], понизить их рабочие характеристики. Такие матрицы, выполненные из стеклоуглерода и имеющие высоту конических острий 12 мкм, диаметр основания 12 мкм, радиус закругления острия порядка 0.5 мкм и шаг решетки 20 мкм, позволяют в условиях технического вакуума обеспечить среднюю плотность тока по матрице 10 А/см². Например, с подобной острийной стеклоуглеродной полевой матрицы площадью 1 мм² в диодном режиме получен ток более 100 мА.

На рис. 3 (кривая 1) представлена ВАХ такой решетки. После покрытия данной матрицы пленкой толщиной 0.2 мкм из углеродных нанотрубок ее ВАХ (кривая 2) смещается в сторону малых напряжений V . Это свидетельствует о том, что полевая эмиссия решетки становится более низковольтной. Таким образом, параметры решетки улучшаются. При этом решетка по-прежнему обеспечивает плотности тока до 10 А/см². Но, наряду с данным важным результатом, мы получаем возможность оценить нагрузку, приходящуюся на эмиссионные центры рассмотренной углеродной матрицы и эмиссионные центры пленки, покрывающей матрицу и состоящей из углеродных нанотрубок.

С помощью формулы Фаулера – Нордгейма по экспериментальной ВАХ структур были проведены численные оценки эффективной площади эмитирующих центров. Очевидно, что количество эмиссионных центров n_c для монокристаллической решетки катодов может быть представлено формулой

$$n_c = N_m S_m N_{cf} S_c,$$

где N_m – плотность упаковки монокристаллической катодной решетки; S_m – площадь монокристаллического катода; N_{cf} – плотность упаковки острий углеродных нанотрубок на вершинах микроострий монокристаллического катода и на углеродной трубчатой пленке; S_c – эффективная площадь эмиссии по формуле Фаулера – Нордгейма на одно микроострие. Аналогично количество эмиссионных центров n_f для трубчатой пленки можно определить по формуле

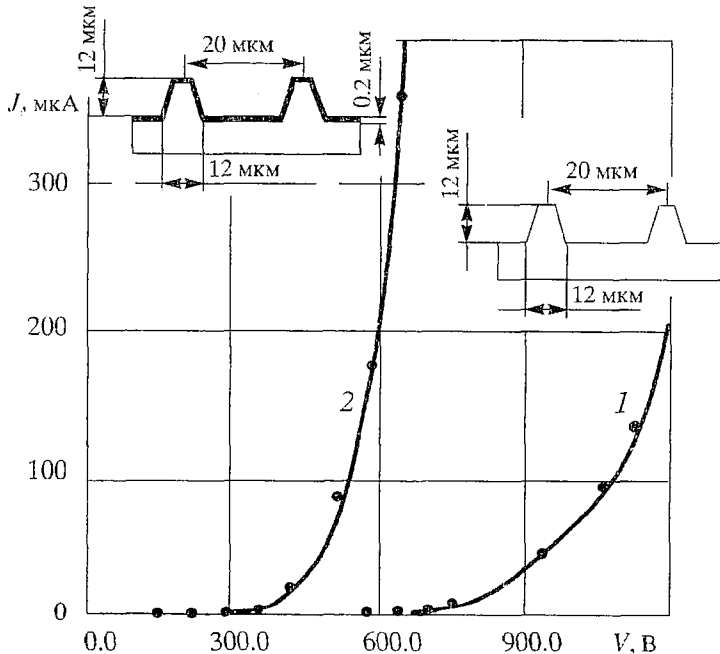


Рис. 3. Вольт–амперные характеристики для углеродного матричного автоэмиссионного катода: 1 – до и 2 – после нанесения углеродной нанотрубчатой пленки

$$n_f = N_{if} S_f,$$

где S_f – эффективная площадь по формуле Фаулера – Нордгейма всей эмитирующей поверхности пленки.

В проведенных экспериментах для круглого катода из тубеленовой пленки диаметром 0.8 мм, как следует из формулы Фаулера – Нордгейма, величина $S_f = 6 \cdot 10^{-10}$ см² при токе катода 7 мА, средняя упаковка $N_{if} = 10^{14}$ см⁻². Поэтому соответственно количество эмиссионных центров $n_f = 6 \cdot 10^4$ штук, а плотность тока в них достигала $1.1 \cdot 10^7$ А/см². Для монолитного острейного катода с вершинами острий, покрытых тубеленовыми пленками, при токе 60 мА и плотности упаковки $N_{in} = 2.5 \cdot 10^5$ см⁻², $N_{if} = 10^{14}$ см⁻², площади катода $S_m = 7 \cdot 10^{-2}$ см², как следует из формулы Фаулера – Нордгейма, $S_c = 2.3 \cdot 10^{-10}$ см², и поэтому количество эмиссионных центров составляет $1.75 \cdot 10^4$ штук. В результате плотность тока в эмиссионных центрах монолитной острейной матрицы составляет $1.5 \cdot 10^8$ А/см². Это значительно выше, чем для пленочного катода из углеродных нанотрубок. Таким образом, создание полевых эмиттеров из углеродных нанотрубных пленок оказывается предпочтительнее, чем применение монолитных матричных острийных углеродных катодов, поскольку на пути повышения плотности эмиссии из пленочных углеродных нанотрубных структур имеются большие возможности. И поэтому дальнейшее улучшение технологии их изготовления может позволить подойти к созданию нового класса полевых эмиттерных решеток с плотностью тока $10 \div 10^2$ А/см².

В связи со сказанным отметим следующий момент. В данной работе, в основном, обсуждаются возможности получения больших плотностей токов, достигающих $10 \div 10^2$ А/см² и выше. Условия работы катодов в таких режимах являются экстремальными. В то же время, использование электронных пучков с плотностями тока $1 \div 10$ мА/см² (например, для создания полноцветных плоских панельных дисплеев), позволяет надеяться, что срок жизни таких эмиттеров может оказаться достаточно большим и превышать десять тысяч часов. К тому же, развитая технология принципиально позволяет создавать однородные эмиттерные решетки на больших рабочих площадях.

4. Квантово–механические модели углеродных нанокластеров

В настоящее время не представляется возможным дать однозначное объяснение наблюдаемой в эксперименте низкой работы выхода электронов из тубеленовой пленки. Одной из причин могут быть дефекты в нанокластерных углеродных структурах, связанные с: потерей атомов углерода, в каркасе структуры, приобретением структурой атомов других элементов, взаимным влиянием элементов наноструктуры и особенностями геометрии образованных нанокластеров. Для подтверждения трех первых предположений были исследованы квантово–механические модели отдельных и связанных между собой фуллеренов и тубеленов с помощью полуэмпирической модели сильной связи Харрисона в модификации Гудвина [20]. Оценка работы выхода $\phi = (I+M)/2$ проводилась по потенциалу ионизации I . При этом предполагалось, что для углеродных кластеров сродство к электрону $M = I/2$. Рассмотрение таких упрощенных структур, как фуллерены и тубелены, которые значительно отличаются от экспериментально выращенных тубеленовых пленок, показало, что они обладают более низкой работой выхода, чем графит, однако не настолько, чтобы наблюдалось соответствие между найденной для них работой выхода и экспериментом. Так, на рис. 4 в качестве примера приведены рассчитанные потенциалы ионизации I для тубеленов C_{72} , структуры которых с внесенными в них дефектами изображены в верхней правой части диаграмм. На рис. 4, а удаленные атомы углерода отмечены кружочками с нумерацией последовательного отрыва атомов. На рис. 4, б атомы

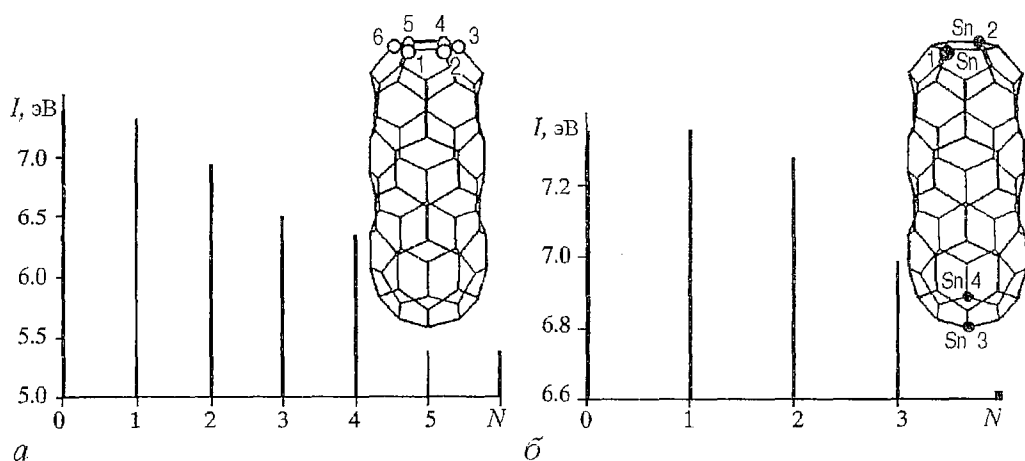


Рис. 4. Потенциалы ионизации тубуленов C_{72-n} , $C_{72-n}Sn_n$, как функция от числа и места: *a* – удаленных атомов, *б* – замещенных атомов

углерода, замещенные атомами олова, показаны темными кружочками. Цифры на осях абсцисс соответствуют числу удаленных (рис. 4, *a*) и замещенных (рис. 4, *б*) атомов.

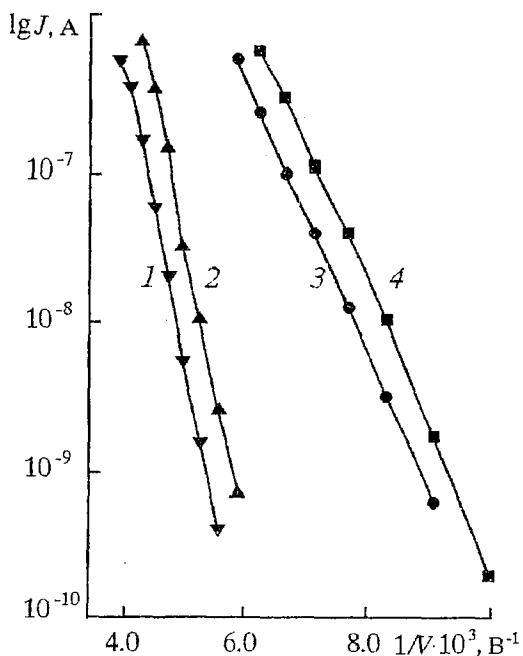
5. Допирование пленок

Выполненные нами предварительные теоретические и экспериментальные исследования показали, что на количество и подвижность носителей оказывает влияние внедрение в структуру нанотруб атомов других элементов или допирование ими поверхности пленки. Наилучшие результаты при введении в структуру нанотруб атомов других элементов получены для элементов четвертой группы (Si, Ge, Sn), а при допировании межмолекулярного пространства пленки – для элементов первой группы (Li, Na, K, Cs). Кратко остановимся на следующих результатах предварительных экспериментов.

Известно, что тонкие слои щелочных металлов, абсорбированные на твердой поверхности подложки, заметно снижают работу выхода ϕ . Так, покрытые цезием образцы меди уменьшают ϕ с 4.4 до 1.64 эВ [21]. Для уменьшения работы выхода пленок из углеродных нанотруб нами в первых экспериментах использовалось осаждение цезия на вершинах нанотруб при выращивании слоев нанотруб на никелевой подложке полиэтилен–пиролизом [22]. Как уже отмечалось выше, эта технология не совсем удачна, хотя и отличается простотой. Исследования, проведенные с использованием сканирующего электронного микроскопа, показали, что в этом случае поверхность углеродного слоя включала переплетенные нанотрубные образования диаметром $20 \div 60$ нм, частично направленные перпендикулярно поверхности подложки (приблизительно 10^6 острий на $см^2$). Слой цезия толщиной порядка 10 \AA осаждался на нанотрубном образце, предварительно отоженном в вакууме при температуре порядка 400° C . Измерения ВАХ проводились в вакууме при 10^{-9} Торр с использованием шарика из золота диаметром 1 мм в качестве анода. Он располагался на расстоянии $30 \div 40$ мкм от плоской структуры. На рис. 5 показаны ВАХ образцов в координатах Фаулера – Нордгейма: $\lg I, 1/V$. Из рисунка видно, что присутствие цезия на нанотрубном материале снижает рабочие напряжения. Так, для плотности тока эмиссии 4 mA/cm^2 напряжение снижается с 250 В (для чистых образцов) до 160 В (для тех же самых образцов, покрытых цезием) [23].

Интересны проведенные нами предварительные эксперименты по допированию пленок из углеродных нанотруб атомами олова. Выполненные нами теоретические расчеты показывают, что при допировании нанотрубки атомами

Рис. 5. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии с тубеленовой пленки в координатах Фаулера - Нордгейма для двух типов образцов при различном расстоянии анода от поверхности плоской структуры: 1 - чистый образец, 35 мкм; 2 - чистый образец, 40 мкм; 3 - образец с осажденным цезием, 35 мкм; 4 - образец с осажденным цезием, 40 мкм



олова может происходить значительная деформация ее структуры. В результате потенциал ионизации нанотрубки понижается на 2 эВ. Действительно, представленная на рис. 6 ВАХ пленки из углеродных нанотрубок, допированной оловом в процессе распыления углерода в низкотемпературной плазме инертного газа, смещается в область низких напряжений [23]. Это свидетельствует о снижении работы выхода из такой пленки. Плотность тока полевой эмиссии с подобных пленок достигает нескольких ампер с квадратного сантиметра и характеризуется высокой стабильностью.

В настоящее время проводятся исследования возможности допирования нанотрубных углеродных пленок атомами других химических элементов (бария, свинца, цинка и пр.), которые уже дали ряд интересных результатов. Так, из рис. 6 видно, что допирование пленок свинцом еще более снижает работу выхода электронов из них [24]. При этом в режиме получения значительных плотностей тока эмиссии стабильность таких пленок несколько снижается.

Следует особо отметить еще одно важное и положительное свойство тубеленовых пленок - их автоэмиссионная способность сохраняется в условиях технического вакуума. Измерения проводились при изменении давления в широких пределах - от 10^{-7} до 10^{-2} Торр. Деградации автоэмиссионного тока не наблюдалось при улучшении вакуума до $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Плотность тока полевой эмиссии восстанавливалась с уменьшением давления до начальной величины. Эмиссионные характеристики сильно зависят от чистоты эмитирующей поверхности.

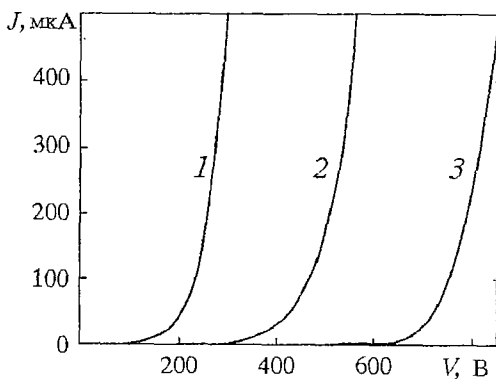


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии с пленок из углеродных нанотрубок, допированных атомами химических элементов: 1 - Pb, 2 - Sn, 3 - чистая углеродная пленка

6. Термоэлектронная эмиссия из нанотрубных углеродных структур

При исследовании термоэлектронной эмиссии из нанотрубных углеродных структур получены чрезвычайно интересные и важные как в научном, так и в практическом плане результаты. Оказалось, что термоэлектронная эмиссия из таких структур может достигать значительных величин уже при низких температурах. Эмиссионные свойства нанотрубных углеродных пленочных структур с тубеленами А и В-типов проводились в температурном интервале от

20 °С до 472 °С при вакууме 10^{-8} Торр. Если при комнатной температуре наблюдался только автоэмиссионный ток, то уже с повышением температуры до 200 °С начиналась термоэлектронная эмиссия, которая при температуре 450 °С достигала значительных величин [12–14]. Максимальная температура ограничивалась 472 °С и выбиралась с учетом разности коэффициентов теплового расширения нанотрубной пленки и исследуемых подложек.

Заключение

Нанотрубные углеродные структуры представляют новый перспективный материал эмиссионной электроники. Они характеризуются низкой работой выхода, устойчивой автоэлектронной эмиссией в условиях технического вакуума и могут использоваться для создания низковольтных полевых эмиттеров низкотемпературных термокатодов.

Имеются значительные возможности повышения полевых эмиссионных характеристик углеродных нанотрубок, для чего необходимо дальнейшее изучение физико-химических свойств пленок и улучшение развиваемых технологий их изготовления.

Авторы хотят выразить свою признательность профессорам Я. Нанничи и Р.З. Бахтизину, доктору Г.Ф. Грею, профессорам П. Катлеру, Н. Мисковскому и доктору Р. Баптисту за их внимание к этим работам и поддержку.

Работа была частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 98-02-17970 и Российской программой «Фуллерены и атомные кластеры» по гранту № 96143.

Библиографический список

1. Dresselhaus M.S. Science of fullerene and carbon nanotubes // London: Academic Press, 1996. 965 p.
2. Ebessen T.W. Carbon nanotubes // Physics Today. 1996. (June). P. 26.
3. Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V. and Zakharchenko Yu.F. Field emitter arrays on nanofilament carbon structure films // Techn. Digest 7th IVMC, Mars-Avril, 1994, Grenoble, France. P. 322.
4. Hongjie Dai, Hafner J.H., Rinzler A.G., Colbert D.T., Smalley R.E. Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy // Nature. 1996. Vol. 384. P. 147.
5. De Heer W.A., Chatelain A., and Ugarte D. A carbon nanotube field emission electron source // Science. 1995. Vol. 270. (November). P. 1179.
6. Smalley R.E. Field emission from an atomic wire // Documentation IVESC Conf., July 1–4, 1996, Eindhoven, The Netherlands. P. C1.
7. De Heer W., Stockli T., Chatelain A., Ugarte V., Forro L. Transport and field emission properties of aligned carbon nanotube films // Documentation IVESC Conf., July 1–4, 1996, Eindhoven, The Netherlands. P. C2.
8. Chernozatonskii L.A., Fedorov E.A., Kosakovskaya Z.Ya., Panov V.I., Savinov S.V. STM evidence of smallest rod presence in nanofilament carbon structure // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57, вып. 1. С. 35.
9. Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Kiselev A.N., Kiselev N.A. // Chem. Phys. Lett. 1994. Vol. 228. P. 94.
10. Chernozatonskii L.A., Gulyaev Yu.V., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Yu.F., Fedorov E.A., Val'chuk V.P. Electron field emission from nanofilament carbon films // Chem. Phys. Lett. 1995. Vol. 233. P. 63.
11. Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Yu. F. Field emitter arrays on nanofilament carbon structure films // J. Vac. Sci. Technol. 1995. B 13(2).
12. Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Gulyaev Yu.V., Sinistyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Yu.F. The influence of external factors on electron emission

from thin film nanofilament carbon structures // Techn. Digest 8th IVMC, July 30 – August 3, 1995, Portland, USA. P. 363.

13. Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Gulyaev Yu.V., Sinitsyn N.I., Zakharchenko Yu.F., Torgashov G.V. The influence of external factors on electron field emission from nanofilament carbon structures // J. Vac. Sci. Technol. 1996. B 14(3). P. 20802.

14. Sinitsyn N.I., Gulyaev Yu.V., Torgashov G.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Zakharchenko Yu.F., Kiselev N.A., Musatov A.L., Zhanov A.I., Mevlyut Sh.T., Glukhova O.E. Thin films consisting of carbon nanotubes as a new material for emission electronics // J. Appl. Surf. Sci. 1997. Vol. 111. P. 145.

15. Omell'yanovskii O.E., Tserbo V.I., Lebedev O.I., Kiselev A.N., Bondarenko V.I., Kiselev N.A., Kosakovskaya Z.Ya., Chernozatonskii L.A. Temperature dependence of resistivity and structure of carbon nanotube films containing various kinds of tubules // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62, вып. 6. С. 483.

16. Косаковская З.Я., Чернозатонский Л.А., Федоров Е.А. Нановолоконная углеродная структура // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56, вып. 1. С. 26.

17. Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L. Physical properties of film field emission cathodes // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. P. 5248.

18. Xie C., Kimar N., Collins C.B., Lee T.J., Schmidt H., Wagal S. Electron field emission from amorphous diamond thin films // Techn. Digest 6th IVMC, July 12–15, 1993, Newport, USA. P. 162.

19. Gulyaev Yu.V., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Grigoriev Yu.A., Shestyorkin V.I., Veselov A.G., Shvetsov Yu.V., Semyonov V.C. Emission of low-voltage multi-tip carbon matrices coated by carbon clusters // Techn. Digest 9th IVMC, July 7–12, 1996, St. Petersburg, Russia. P. 519.

20. Gulyaev Yu.V., Sinitsyn N.I., Glukhova O.E., Mevlyut Sh.T., Torgashov G.V., Torgashov I.G., Zhanov A.I. The Influence of carbon nanocluster defects on film field emission // Techn. Digest 10th IVMC, August 17–21, 1997, Kyongju, Korea. P. 523.

21. Физические величины: Справочник / А.П. Бабищев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

22. Kikoveskii E.F., Chernozatonskii L.A., L'vov S.G., Mel'nik N.N. // Chem. Phys. Lett., 1997. Vol. 266.

23. Sinitsyn N.I., Gulyaev Yu.V., Torgashov G.V., Grigoriev Yu.A., Zhanov A.I., Chernozatonskii L.A., Zakharchenko Yu.F. Field emission from carbon nanotubes // Extended Abstract, IVESC, July 7–10, 1998, Tsukuba, Japan. P. 7.

24. Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Gulyaev Yu.V., Knyazev S.A., Buyanova Z.I., Zhanov A.I., Glukhova O.E., Torgashov I.G. Electron field emission from nanocluster carbon-metal films // Technical Digest, 12th IVMC'99, July 6–9, 1999, Darmstadt, Germany. P. 254.

Саратовское отделение
Института радиотехники
и электроники РАН,
Институт радиотехники и
электроники РАН, Москва
Саратовский государственный
университет
Институт физической
химии РАН, Москва

Поступила в редакцию 26.08.99
после доработки 15.01.2000

FIELD EMISSION FROM CARBON NANOTUBES

*N.I. Sinitsyn, Yu.V. Gulyaev, G.V. Torgashov, Yu.A. Grigoriev, A.I. Zhbanov,
L.A. Chernozatonskii, Yu.F. Zakharchenko, A.L. Musatov, O.E. Glukhova,
S.A. Knyazev, I.G. Torgashov*

Investigation results are discussed for the field emission of electron from nanotube carbon structures that are a new material for emission electronics. Made in the form of thin films, they are characterized by a low work function of electrons and ensure a high stable electron field emission under the conditions of normal operating vacuum, as well as a considerable thermal electron emission even at low temperatures. Some ways to enhance the field emission from carbon nanotubes are considered.



Синицын Николай Иванович – доктор физико–математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН, академик РАЕН. Область научных интересов: вакуумная микроэлектроника, акустоэлектроника СВЧ и твердотельная СВЧ–электроника, взаимодействие электромагнитных волн миллиметрового диапазона с биологическими и физическими объектами. E–mail: sinitsyn@ire.san.ru



Гуляев Юрий Васильевич – академик РАН, член Президиума РАН, доктор физико–математических наук, профессор, Президент ЦП РНТОРЭС им. А.С. Попова, директор Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: физические методы ранней медицинской диагностики, акустоэлектроника, акустооптика, спин–волновая электроника, магнитооптика, интегральная оптика, радиофизика.



Торгашов Геннадий Васильевич – кандидат физико–математических наук, старший научный сотрудник Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: электроника СВЧ, вакуумная микроэлектроника.



Жбанов Александр Игоревич – кандидат физико–математических наук, доцент кафедры прикладной физики Саратовского государственного университета. Область научных интересов: вычислительная физика, численно моделирование физических процессов.

Григорьев Юрий Алексеевич – доктор физико–математических наук, старший научный сотрудник Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: электроника СВЧ, вакуумная микроэлектроника.

Чернозатонский Леонид Александрович – доктор физико–математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института физической химии РАН (Москва). Область научных интересов: конструирование возможных форм нанокластеров, теоретическое исследование их электрофизических свойств, акустоэлектроника.

Захарченко Юрий Федорович – кандидат физико–математических наук, старший научный сотрудник Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: электроника СВЧ, вакуумная микроэлектроника.

Мусатов Алексей Леонидович – доктор физико–математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники РАН (Москва). Область научных интересов: фотоэлектронная эмиссия, авто– и термоэлектронная эмиссия с нанокластерных пленок.



Глухова Ольга Евгеньевна – кандидат физико–математических наук, ведущий инженер кафедры прикладной физики СГУ. Область научных интересов: спектроскопия, квантовая химия, вакуумная микроэлектроника, математическое моделирование физических процессов.



Князев Сергей Александрович – главный специалист по оборудованию Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: технология напыления тонких пленок.



Торгашов Илья Геннадьевич – аспирант кафедры вычислительной физики и автоматизации научных исследований СГУ. Область научных интересов: туннельная микроскопия, вычислительная физика.