

Нитевидные углеродные материалы для автоэмиссионных катодов

Сан Тхвин Наинг Зо, Чит Фон Паинг, Е.П. Шешин

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация: Проведено сравнительное исследование автоэмиссионных свойств катодов на основе полиакрилонитрильных (ПАН) волокон и нитей из углеродных нанотрубок (УНТ). Эксперименты показали, что пороговое напряжение для УНТ-катода (~900 В) примерно в три раза ниже, чем для ПАН-катода (~2700 В). Установлено, что УНТ-нить обеспечивает более стабильный эмиссионный ток при длительной высоковольтной нагрузке, тогда как ПАН-волокна демонстрируют деградацию эмиссии. Микроструктурные исследования выявили различия в морфологии поверхности, влияющие на однородность эмиссии. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования УНТ-нитей для создания эффективных и стабильных низковольтных автоэмиссионных катодов.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, углеродные нанотрубки, ПАН-волокна, холодные катоды, вольт-амперные характеристики, эмиссионная стабильность

1. Введение

Автоэлектронная эмиссия из углеродных материалов привлекает значительное внимание в связи с перспективами создания эффективных холодных катодов для вакуумной микро- и оптоэлектроники [1,2]. Среди различных углеродных структур волокна на основе полиакрилонитрила (ПАН) и нити, состоящие из углеродных нанотрубок (УНТ), представляют особый интерес благодаря сочетанию хорошей электропроводности, механической прочности и высокого отношения длины к диаметру, определяющего величину коэффициента усиления электрического поля [3]. ПАН-волокна, получаемые карбонизацией полимерных прекурсоров, имеют развитую поверхность с множеством микровыступов, которые могут служить эмиссионными центрами [4]. Их преимуществом считается возможность получения стабильного эмиссионного тока за счет большого числа независимых эмиттеров. В свою очередь, УНТ-нити, формируемые из пучков нанотрубок, обладают уникальными характеристиками, связанными с нанометровыми размерами индивидуальных трубок и их высокой электропроводностью [5]. Теоретически это может обеспечивать более низкие пороговые поля и высокую плотность эмиссионного тока.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Исследовались два типа катодов: на основе УНТ-нити диаметром ~30-40 мкм (предоставлена ФГБНУ «ТИСНУМ», г. Троицк) и на основе пучка (~250 шт.) отдельных ПАН-волокон диаметром 5-7 мкм (предоставлены НИЦ «Углекимволокно»). Волокна закреплялись в обжатых никелевых трубках для обеспечения электрического контакта. Микроструктура исходных образцов представлена на Рис. 1 и 2.

Измерения проводились в цельнометаллической вакуумной камере с безмасляной откачкой, обеспечивающей рабочее давление ~ 10^{-6} мм рт. ст. В качестве анода использовалось стекло с проводящим ИТО-слоем, покрытое зеленым катодолюминофором (длина волны излучения 520 нм). Высокое напряжение (до 3 кВ)

подавалось от стабилизированного источника. Эмиссионный ток регистрировался путем измерения падения напряжения на калиброванном резисторе с помощью осциллографа. Через смотровое окно камеры фиксировалось изображение свечения люминофора для анализа площади и однородности эмиссии. Микроструктура образцов до и после испытаний изучалась с использованием растрового электронного микроскопа.

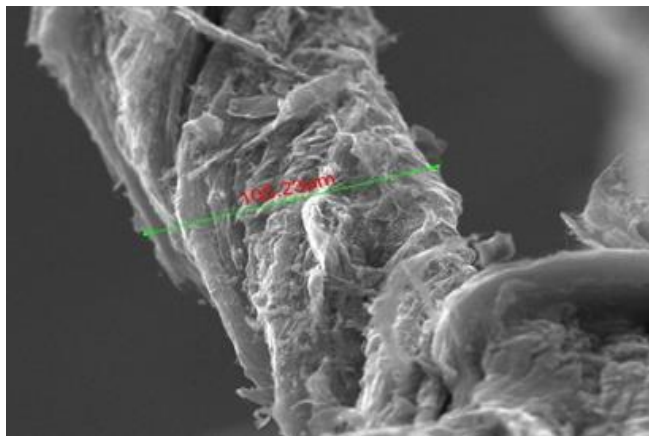


Рисунок 1. Микроструктура пучка ПАН-волокон

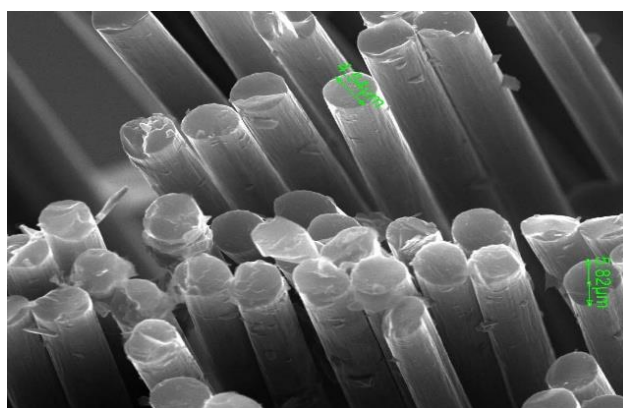


Рисунок 2. Микроструктура УНТ-нити

Сравнение вольт-амперных характеристик (рис. 3) выявило существенное различие в пороговых параметрах эмиссии. Напряжение, соответствующее началу автоэлектронной эмиссии (току ~ 1 мкА), для катода из УНТ-нити составило около 900 В, в то время как для катода из ПАН-волокон аналогичный ток наблюдался при напряжении около 2700 В. Таким образом, пороговое напряжение для УНТ-катода примерно в три раза ниже.

Кроме того, диапазон ускоряющих напряжений, необходимых для увеличения эмиссионного тока на порядок величины, для УНТ-нити оказался значительно уже, чем для ПАН-волокон. Это указывает на более однородное распределение коэффициентов усиления поля и работ выхода для эмиссионных центров на поверхности УНТ-материала.

Исследование зависимости эмиссионного тока от времени при фиксированных напряжениях показало принципиально разное поведение материалов. При высоких постоянных напряжениях (~ 1380 В для УНТ, ~ 2345 В для ПАН) ток УНТ-катода возрастал и затем стабилизировался, в то время как ток ПАН-катода достигал максимума с последующей деградацией. Это принципиальное различие связано с радикально различной структурной эволюцией материалов в процессе работы.

Зависимость эмиссионного тока от времени при фиксированных напряжениях показана на Рис. 4 и 5.

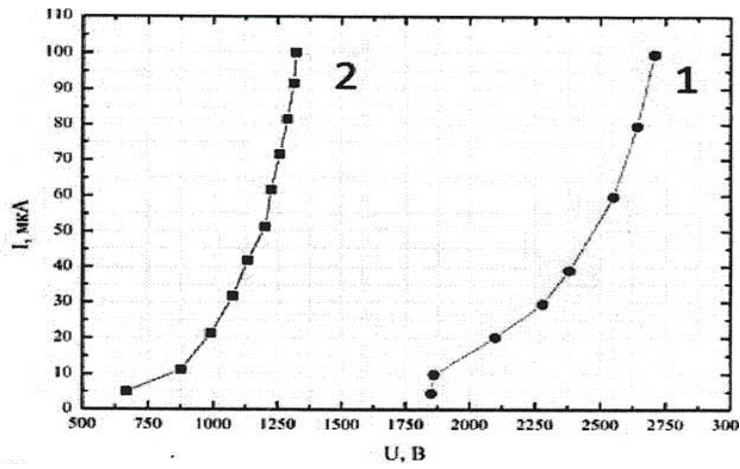


Рисунок 3. Вольтамперные характеристики для катодов: полиакрилонитрильное волокно (ПАН-волокно) - кривая 1 и волокно из углеродных нанотрубок (УНТ-нить) - кривая 2.

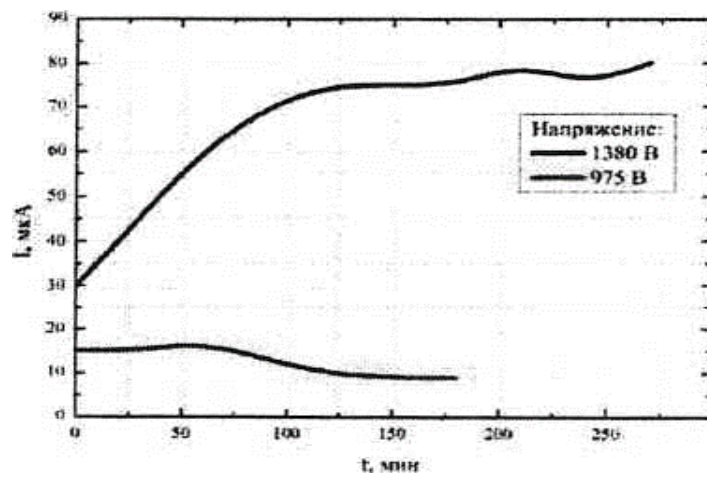


Рисунок 4. Зависимость тока от времени для катода из УНТ-нити при разных анодных напряжениях.

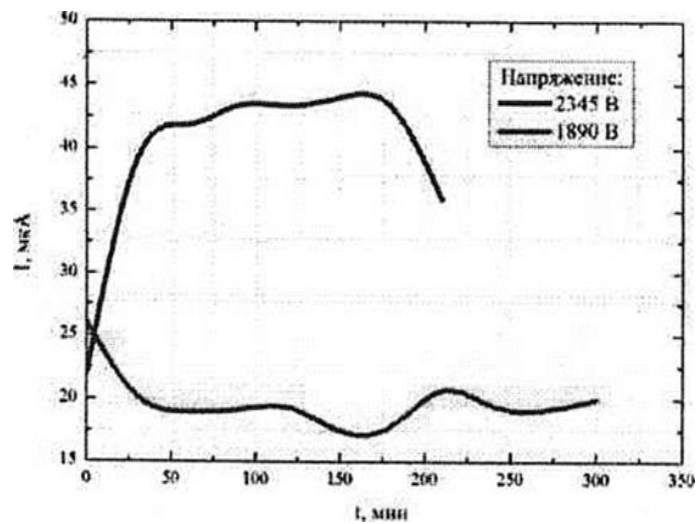


Рисунок 5. Зависимость тока от времени для катода из ПАН-волокон при разных анодных напряжениях.

3. Заключение

Проведенное сравнительное исследование демонстрирует, что углеродные волокна на основе нанотрубок обладают превосходящими автоэмиссионными свойствами по сравнению с традиционными ПАН-волокнами для применения в катодах. УНТ-катод работает при существенно более низком пороговом напряжении (~в 3 раза), обеспечивает более высокий и стабильный эмиссионный ток в условиях высоковольтной нагрузки и возбуждает большую и более яркую площадь люминофора. Таким образом, нити на основе углеродных нанотрубок идентифицированы как наиболее перспективный материал для разработки эффективных, стабильных и низковольтных автоэмиссионных катодов для устройств вакуумной электроники следующего поколения, включая источники света и электронные пушки.

Список литературы

1. Egorov NV, Sheshin EP. Carbon-based field emitters: properties and applications .In: Gaertner G, Knapp W, Forbes RG. (eds.) Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 449-528.
2. Dwivedi N, Dhand Ch, Anderson EC, et al . The rise of carbon materials for field emission .J. Mater. Chem. C. Royal Society of Chemistry. 2021; 9(8):2620-2659.
3. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 4. С. 436-438.
4. Qin X, Lu Y, Xiao H, Wen Y, Yu T. A comparison of the effect of graphitization on microstructures and properties of polyacrylonitrile and mesophase pitch-based carbon fibers .Carbon N. Y. Elsevier Ltd. 2012; 50(12) 4459-4469.
5. Saito Y, Uemura S, Hamaguchi K. Cathode ray tube lighting elements with carbon nanotube field emitters . Jpn. J. Appl. Phys. 1998; 37: 346-348.