

С.В. Алексеев, Д.Н. Игнатъев, М.Л. Таубин, Д.В. Шестых, А.А. Ясколко

НОВЫЕ АСПЕКТЫ В РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Аннотация

В работе приведен анализ научно-технической, патентной литературы и результаты исследования авторов статьи. Показано, что заметного прогресса в разработке высокоэффективных источников рентгеновского излучения можно достичь только применением монокристаллических и, в большей степени, наноструктурированных материалов. Причем для источников рентгеновского излучения различных медицинских применений (с различным радиационным выходом) можно рассматривать использование как автоэмиссионных катодов из углеродных нанотрубок, так и термоэмиссионных катодов из наноструктурированного вольфрама или нанокompозита вольфрама. Для повышения эксплуатационных характеристик источников рентгеновского излучения необходимы согласованные исследования по разработке и применению наноматериалов как в качестве материалов катодов, так и в качестве материалов анодов.

Интенсивное развитие технологии наноструктурированных материалов (поликристаллических материалов с величиной зерна в диапазоне от 10 до 100 нм), обладающих целым рядом уникальных свойств [1]-[5], не могло не затронуть и рентгеновскую технику.

В связи с этим нами предлагается концепция разработки рентгеновских трубок с повышенными эксплуатационными характеристиками (рис. 1-2) с использованием наноматериалов.



Рис. 1. Концептуальная схема разработки высокоэффективных рентгеновских трубок

Суть предложенной схемы состоит в том, что акцент делается на применение новых материалов для катодов и анодов. При этом конструктивные варианты не рассматриваются в данной статье, т. к. эти вопросы описаны в наших предыдущих работах [6]-[8].

По нашему мнению, прогресс в разработке рентгеновских трубок в основном определяется в настоящее время именно применением новых материалов с существенно более высокими эксплуатационными характеристиками (рис. 2).

В связи с изложенным в первую очередь следует рассмотреть применение углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве материалов катода. Этому вопросу посвящен ряд публикаций [9]-[15], в которых описываются результаты исследований характеристик углеродных нанотрубок и разработок рентгеновских трубок с использованием УНТ в качестве материалов катодов.

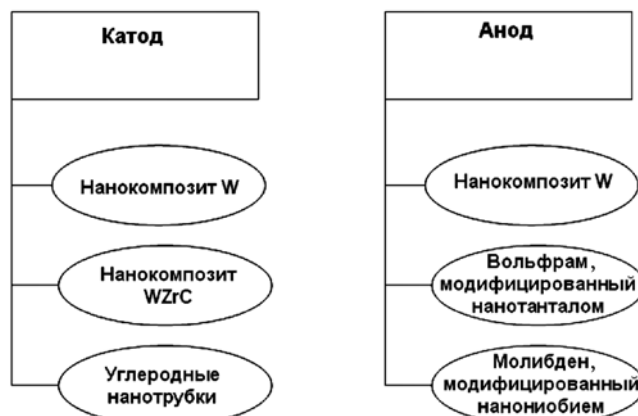


Рис. 2. Схема использования наноматериалов для разработки катодов и анодов

В одной из этих работ рекордные размеры фокусных пятен описаны сотрудниками Института развития науки и технологий (Корея) [12], получившими на созданном ими источнике рентгеновского излучения (рис. 3) разрешение меньше 5 мк.

В этой установке использована вольфрамовая мишень прострельного типа. Катод выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 250 мкм с радиусом кривизны конусного наконечника, равным ≈ 5 мкм, на поверхность которого нанесены углеродные нанотрубки. Испытания проводились при напряжении на катоде -40 кВ. Напряженность электрического поля составила $1,6$ В/мкм. При этом плотность тока эмиссии обеспечивалась равной 10 мА/см², а величина коэффициента усиления электрического поля составила 2700. Такая значитель-

ная величина усиления достигнута, по мнению авторов, тем, что углеродные нанотрубки наносились не на плоскую поверхность, а на конический наколечник. Проведенные авторами испытания позволяют оценивать разрешающую способность на уровне 5 мкм.

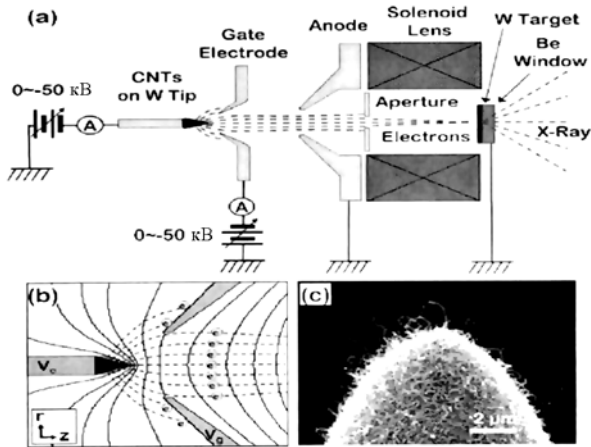


Рис. 3. Рентгеновская трубка с прострельным вольфрамовым анодом и катодом из УНТ [12]

В работе, посвященной аналогичному вопросу, сотрудники Технического института Нагои (Япония) [13] представили результаты сравнительных исследований термоэмиссионного вольфрамового катода и автоэмиссионного катода, состоящего из углеродных нанотрубок, осажженных на покрытую тонким слоем графита вольфрамовую проволоку с заостренным концом (рис. 4).

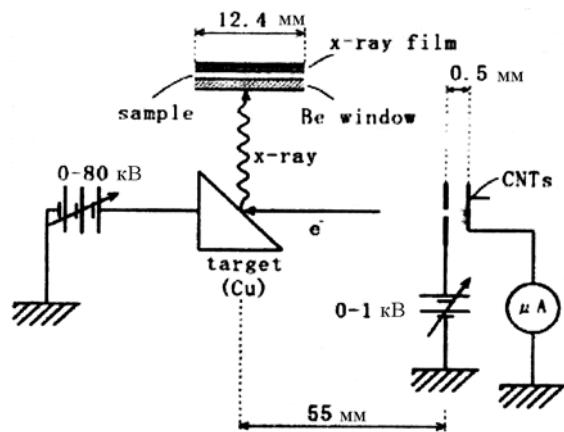


Рис. 4. Рентгеновская трубка с массивным медным анодом и катодом из УНТ [13]

Полученные с использованием таких катодов изображения интегральных микросхем показали лучшую разрешающую способность источника рентгеновского излучения с автоэмиссионным катодом из УНТ, что объясняется авторами большей энергетической однородностью спектра эмитированных электронов. Однако время жизни таких катодов пока составляет всего 1 ч при вакууме 10^{-7} Торр.

В другой работе японских исследователей [14] описана сверхминиатюрная рентгеновская трубка с прострельным анодом и с катодом из УНТ

(рис. 5а), которая, имея диаметр ≤ 5 мм, могла бы быть использована в качестве эндоскопа. В качестве анода использовали алюминиевую фольгу толщиной 0,1 мм, на поверхность которой лазером был нанесен слой меди толщиной 3 мкм. Потенциал катода поддерживался в интервале 10...15 кВ, при этом электронный ток составлял 50 мкА при максимальной мощности 0,75 Вт. При превышении этого уровня мощности мишень быстро повреждалась. Авторы этих исследований считают такой миниатюрный источник рентгеновского излучения с фокусным пятном менее 100 мкм перспективным для исследования биологических тканей без их разрушения. Фотография листа гинго, полученная с использованием такого источника рентгеновского излучения, приведена на рис. 5б.

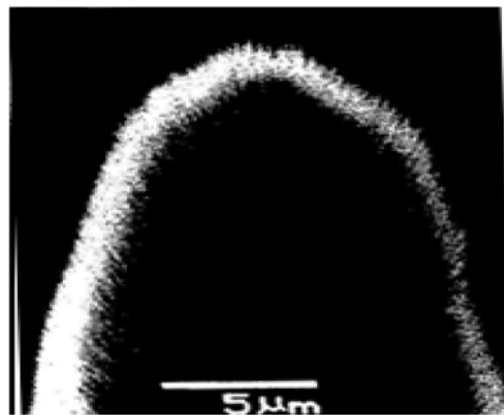


Рис. 5а. Фотография катода из УНТ

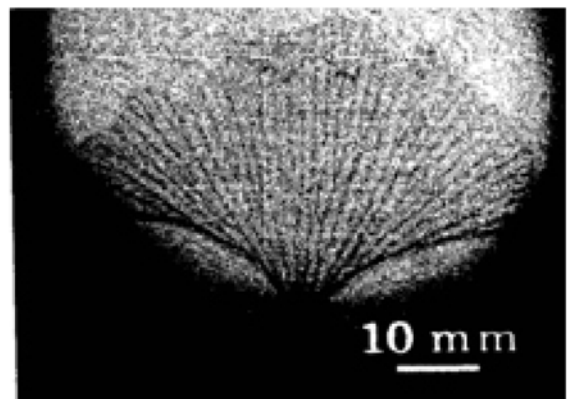


Рис. 5б. Контактное рентгеновское изображение свежесорванного листа гинго

В связи с приведенным анализом применения УНТ для изготовления катодов следует также привести результаты работ сотрудников Американского института физики, в которых представлены материалы по разработке сканирующего источника рентгеновского излучения [15]. Этот источник состоит из пяти катодов, выполненных с использованием УНТ, и молибденового анода. Анодный ток при испытаниях составлял 40 кВ, катодный ток – 100 мкА. Полученные размеры пяти фокусных пятен находились в диапазоне 200...300 мкм. Описанный источник рентгеновского излучения рассматривается авторами как прототип системы сканиро-

вания для рентгеновского компьютерного томографа.

Представленные выше работы связаны с применением катодов, использующих автоэлектронную эмиссию, так называемых холодных катодов, или, по зарубежной терминологии, полевых катодов [16].

Основное преимущество таких катодов – компактность источников рентгеновского излучения, не требующих систем охлаждения, и возможность получения малых – до 5 мкм – фокусных пятен. Основные недостатки на данной стадии развития этого направления, несмотря на высокие плотности потоков электронов (до 10 А/см²), состоят в том, что эти источники обеспечивают лишь малые значения токов эмиссии (от единиц до десятков миллиампер) по сравнению с термоэмиссионными катодами. Это обусловлено существенно малой площадью эмитирующей поверхности (для получения токов автоэлектронной эмиссии необходима высокая напряженность поля между катодом и анодом (≈ 1 В/мкм), для чего эмитирующую поверхность выполняют в виде одного микроострия в острых катодах или микроостристых структур в пленочных катодах [17]).

Несмотря на отмеченные недостатки, понимая перспективность этого направления и повышенный интерес к нему различных групп исследователей, мы провели эксперименты по синтезу углеродных нанотрубок на подложки из углеродных тканей, пропитанных различными катализаторами, и впервые, насколько нам известно, непосредственно на фольгу из вольфрама, используя технологии CVD (рис. 6).

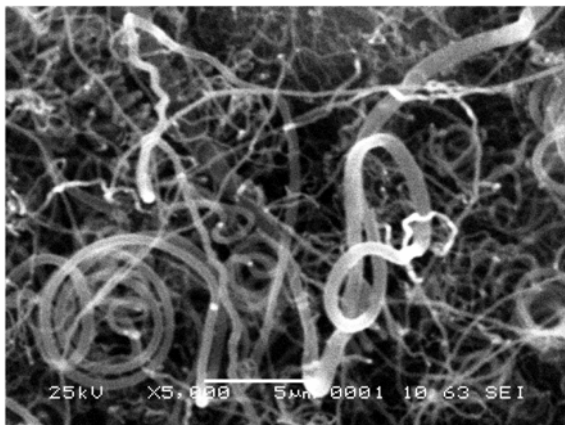


Рис. 6. Углеродные нанотрубки на подложке из вольфрама

Обращает на себя внимание, что углеродные нанотрубки в этом случае имеют фрагменты спиральной формы, что неспецифично для традиционных углеродных нанотрубок.

Этот результат положен в основу наших разработок острижных катодов с углеродными нанотрубками, сформированными на конической поверхности вольфрама.

Другое направление наших исследований связано с использованием в качестве термоэмиссионно-

го катода вольфрама с нанокристаллической структурой и нанокompозита вольфрама.

В связи с этим необходимо сослаться на работу Р.Р. Мулюкова и Ю.М. Юмагузина [18], в которой обнаружен эффект существенного увеличения эмиссионных характеристик наноструктурированного вольфрама, обусловленного образованием трубок тока в области границ зерен шириной приблизительно 10 нм. Особенностью этих экспериментов является то, что при температурах выше 1500 °С описанный эффект пропал. То есть область применения таких катодов, как показали наши расчеты, ограничена плотностями тока, соответствующими температурам не выше 1500 °С (рис. 7-8).

Таким образом, анализ работ по использованию наноматериалов для источников рентгеновского излучения позволяет сделать некоторые прогнозные оценки для практического применения полученных результатов.

Представляет интерес прежде всего оценка возможности использования описанных катодов в маммографии, поскольку из всех медицинских диагностических рентгеновских аппаратов именно в маммографии остро ощущается проблема получения фокусных пятен на уровне менее сотен микрон, а уровень электрических напряжений (40...60 кВ), использованный в цитируемых работах, соответствует уровню напряжений в маммографах (≤ 40 кВ).

В этом случае следует рассматривать два варианта. Первый – использование в качестве материала катода УНТ. При анодном напряжении в 50 кВ для достижения мощности дозы рентгеновской трубки порядка 1 кВт на фокусном пятне, равном 50 мкм, потребуется ток эмиссии, равный 20 мА, что на данной стадии развития технологии УНТ проблематично, но с развитием нанотехнологий перспективно.

Второй вариант – использование в качестве материала катода наноструктурированного вольфрама. Оценки, сделанные на основании работы [18], показывают, что при температуре, при которой эффект существенного повышения эмиссионных характеристик для этого материала еще присутствует ($T \leq 1500$ °С), можно рассчитывать на получение величины плотности эмиссионного тока около 10 мА/см². То есть для фокусного пятна, равного 50 мкм, при напряжении трубки 50 кВ и площади катода 1 см² мощность трубки будет составлять 500 Вт, что близко к характеристикам некоторых медицинских рентгеновских трубок.

Оба описанных варианта, по-видимому, перспективны при разработке микрофокусных ($f \approx 50$ мкм) рентгеновских трубок, для которых мощность дозы на уровне 1 кВт является более чем приемлемой. Актуальность этого направления работ обусловлена возможностью микрофокусных источников рентгеновского излучения обеспечить эффективное использование технологии рентгеновской съемки с увеличением. Положительные результаты описаны в работах А.Ю. Васильева, Н.Н. Потрахова, Н.Н. Блинова с сотрудниками (см., например, [19]-[20]).

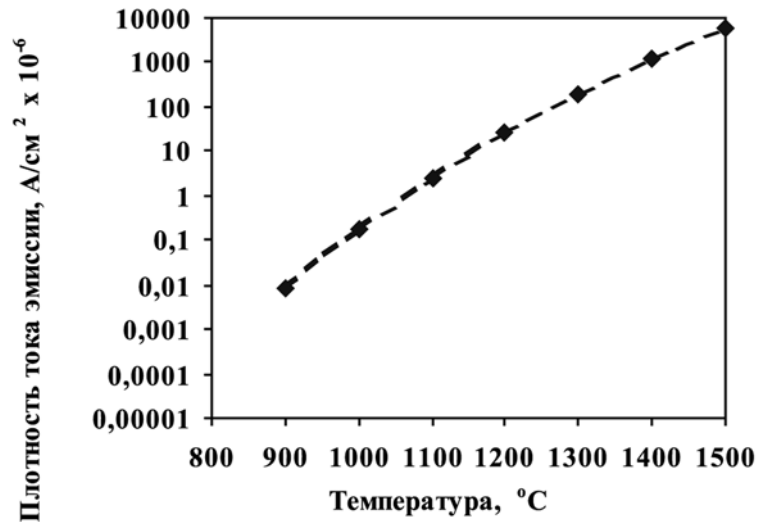


Рис. 7. Зависимость плотности тока эмиссии от температуры наноструктурированного вольфрама

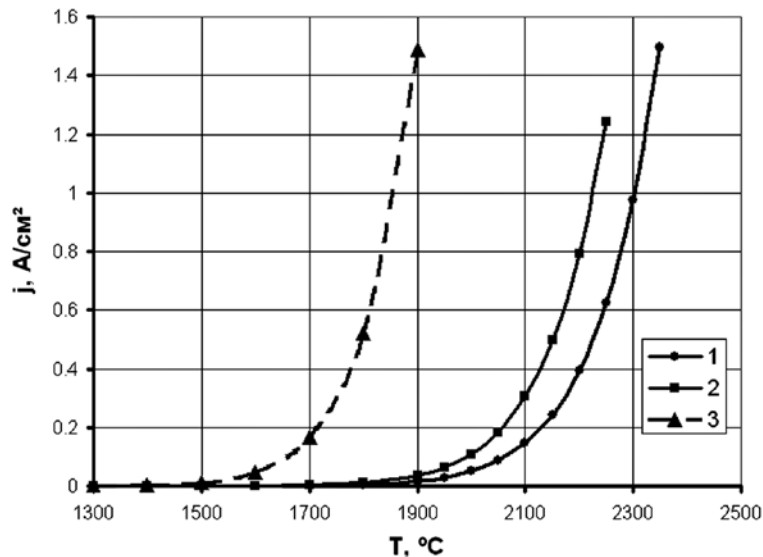


Рис. 8. Зависимость плотности тока эмиссии от температуры наноструктурированного вольфрама (3) в сравнении с эмиссионными характеристиками поликристаллического W (1) и монокристаллического W с гранью (111) (2)

Для более мощных источников рентгеновского излучения, особенно для рентгеновских трубок для компьютерных томографов, перспективным, на наш взгляд, является использование в качестве материала катода нанокompозитов вольфрама (вольфрам с традиционным размером зерна, равным $\approx 5 \dots 10$ мкм, модифицированный наноразмерными (100...200 нм) включениями, например пузырьков легкоплавкого металла калия).

Этому вопросу посвящен ряд наших работ [21]-[24], в которых показаны существенные преимущества нанокompозитов вольфрама по сравнению с поликристаллическим вольфрамом в качестве материала катода.

Завершая анализ перспективных направлений в разработке высокоэффективных катодов, в основном для микрофокусных источников, необходимо учитывать, что уменьшение фокусного пятна приводит к существенному увеличению удельной на-

грузки на анод. Так, уменьшение размера фокуса от 100x100 до 50x50 мкм приводит к увеличению удельной нагрузки на фокусное пятно анода в 4 раза.

В связи с этим важно отметить, что проблема использования наноматериалов для повышения эксплуатационных характеристик анодов в научно-технической литературе не представлена. Можно сослаться лишь на наши сравнительные исследования повреждаемости поликристаллического сплава WRe и монокристаллического вольфрама [22], [24].

Однако если результаты этих исследований рассмотреть совместно с данными работ [3]-[5], в которых показано существенное увеличение прочности и пластичности нанокompозитов, то резонно прогнозировать уменьшенную повреждаемость фокусной дорожки анода, выполненного из нанокompозита вольфрама, даже по сравнению с моно-

кристаллическим вольфрамом, что и соответствует увеличению нагрузочной способности анода.

Таким образом, анализ научно-технической, патентной литературы и результатов наших исследований показал, что заметного прогресса в разработке высокоэффективных источников рентгеновского излучения можно достичь только применением монокристаллических и, в большей степени, наноструктурированных материалов. Причем для источников рентгеновского излучения различных медицинских применений (с различным радиационным выходом) можно рассматривать использование как автоэмиссионных катодов из углеродных нанотрубок, так и термоэмиссионных катодов из наноструктурированного вольфрама или нанокompозита вольфрама. В целом же для повышения эксплуатационных характеристик источников рентгеновского излучения необходимы согласованные исследования по разработке и применению наноматериалов и в качестве материалов катодов, и в качестве материалов анодов.

Список литературы:

1. Gleiter H. Nanostructure materials: Basic concepts and microstructure // Acta materialia. 2000. Vol. 48. PP. 1-29.
2. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Академия, 2005. 192 с.
3. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские технологии. 2006. Т. 1. № 1-2. С. 71-81.
4. Цветков Ю. Термическая плазма в нанотехнологиях / www.den-za-dnem.ru. 27.11.2007. Грант Президента РФ НШ-1895 2003.3.
5. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1-2.
6. Таубин М.Л., Платонов В.Ф., Ясколко А.А. Катоды медицинских рентгеновских трубок // Медицинская техника. 2009. № 1 (253).
7. Валуев Н.Н., Куликов Н.Н., Кочетков М.Д., Таубин М.Л. Металлокерамическая рентгеновская трубка для маммографии // Медицинская техника. 2005. № 5 (251).
8. Таубин М.Л., Платонов В.Ф., Ясколко А.А. Катод прямого накала и способ его изготовления / Патент РФ № 2 314 592С1 2006.
9. Carbon nanotube field emission array and method for fabricating the same. US Patent № 6,440,761, 2002.
10. Елецкий А.В. // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 9. С. 945-972.
11. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Замечательные свойства углеродных нанотрубок // Природа. 2004. № 5.
12. Neo S.H. et al. X-ray tubes with carbon nanotubes cathode // Appl. Phys. Lett. 2007. 90. 183109.
13. Sugie H., Tanemura M., Filip V. et al. Carbon nanotubes field-emission cathode // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. 2587.
14. Senda S., Sakai Y., Mizuta Y., Kita S. and Okuyama. Surer – miniature X-ray tube // Applied Physics Letters. 2004. Vol. 85. № 3.

15. Zhan J. et al. Stationary Scanning X-ray source based on carbon nanotube field emitters // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86. 184104.
16. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966.
17. Рахимов А.Т. Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) на нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленках (физика, технология, применение) // Успехи физических наук. 2000. Т. 70. № 9. С. 996-999.
18. Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М. Работа выхода электронов из нанокристаллического вольфрама // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 6. С. 760-761.
19. Васильев А.Ю., Потрахов Н.Н., Серова Н.С. и др. Микрофокусная рентгенография – от прошлого к будущему // Петербургский журнал электроники. 2008. № 2-3. С. 19-25.
20. Блинов Н.Н., Васильев А.Ю., Серова Н.С., Грязнов А.Ю., Потрахов Н.Н. Микрофокусный способ получения фазоконтрастных рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2009. № 4 (256).
21. Алексеев С.В., Таубин М.Л., Ясколко А.А. К вопросу о применении наноструктурных материалов в медицинской технике // Медицинская физика. 2008. № 2.
22. Алексеев С.В., Таубин М.Л., Ясколко А.А. Наноструктурные и монокристаллические материалы для медицинской техники / Материалы II Всероссийского национального конгресса по радиологии, 2008 г.
23. Alekseev S., Taubin M., Yaskolko A. Application of nanostructural materials in medical technic / 20th Workshop ISTC in Korea «Nanomaterials and nanotechnology», Seoul, 2009.
24. Alekseev S., Taubin M., Yaskolko A. Influence of nanoscale inclusions on high temperature creep resistance of deformed tungsten / 20th Workshop ISTC in Korea «Nanomaterials and nanotechnology», Seoul, 2009.

Сергей Владимирович Алексеев,
д-р техн. наук, профессор,
генеральный директор,
Дмитрий Николаевич Игнатъев,
канд. техн. наук,
начальник отдела,
Михаил Львович Таубин,
д-р техн. наук, профессор,
гл. научный сотрудник,
Дмитрий Владимирович Шестых,
начальник лаборатории,
Антон Андреевич Ясколко,
начальник лаборатории,
ФГУП «НИИ НПО «Луч»,
г. Подольск,
Московская обл.,
e-mail: npo@sialuch.ru