

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.13>

УДК: 537.533

## **АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ФОЛЬГ**

**Тхет Хму Маунг, Чит Фон Паинг, Шешин Е.П**

**Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет),  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.**

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2026 г.

**Аннотация.** В работе рассматриваются автоэмиссионные свойства наноструктурированных катодов на основе углеродных фольг, включая терморасширенный графит, пиролитический графит и графен. Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам – высокой электропроводности, механической прочности, термостойкости и низкой работе выхода – углеродные наноструктуры обладают значительным потенциалом в качестве холодных источников электронов для современных вакуумно-электронных приборов. В работе обсуждаются особенности структуры различных углеродных материалов, а также влияние наноморфологии, шероховатости поверхности и наличия острых выступов или слоистых микроструктур на характеристики полевой автоэмиссии. Особое внимание уделено технологиям получения, включая фольги, изготовленные методом CVD, лазерную модификацию поверхности, а также методы формирования графеновых и пиролитических графитовых пленок. Экспериментальные данные показывают, что наноструктурированные углеродные фольги обеспечивают стабильную автоэмиссию при относительно низких напряженностях электрического поля, а создание микро и нановыступов позволяет существенно повысить

эффективность эмиссии. Моделирование траекторий электронов подтверждает пригодность катодов на углеродных фольгах для планарных и латеральных конструкций, используемых в пикселях дисплеев и других компактных источниках электронов. В заключение выделены ключевые проблемы, связанные со стабильностью, воспроизводимостью и деградацией эмиссионных характеристик, а также обозначены направления дальнейших исследований, направленные на повышение долговечности и масштабируемости углеродных автоэмиссионных катодов.

**Ключевые слова:** углеродные фольги, автоэмиссия, автоэмиссионные катоды, терморасширенный графит, пиролитический графит, графен, наноструктурированные углеродные материалы, холодные катоды, электронная эмиссия, углеродные наноструктуры.

**Автор для переписки:** Чит Фон Паинг, [chitphonepaing6@gmail.com](mailto:chitphonepaing6@gmail.com)

## Введение

Развитие современных вакуумных электронных приборов требует создания эффективных источников электронов с высокими характеристиками, надежностью и долговечностью. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является применение автоэмиссионных катодов, в частности – наноструктурированных катодов на основе углеродных материалов. Углеродные наноструктуры, такие как нанотрубки, графен и их производные, обладают уникальными физико-химическими свойствами: высокой электропроводностью, механической прочностью, термостойкостью, а также низким значением работы выхода электронов.

Особый интерес представляют катоды, изготовленные на основе углеродных фольг, структурированных на наноуровне. Такие материалы сочетают в себе технологичность массового производства с высокими эмиссионными свойствами. Благодаря большой удельной площади поверхности и возможности формирования острых наноструктур, углеродные фольги

становятся эффективной платформой для реализации автоэмиссионных процессов при низких электрических полях.

Настоящая работа направлена на исследование автоэмиссионных свойств наноструктурированных катодов на основе углеродных фольг, а также анализ факторов, влияющих на их эмиссионную эффективность. Особое внимание уделяется морфологии поверхности, параметрам наноструктурирования и стабильности эмиссионных характеристик в процессе эксплуатации.

## 1. Углеродные материалы и особенности их структуры

Углеродные материалы отличаются, что многообразием (углеродных структур, обусловлено способностью атома углерода находиться в различных валентных состояниях и образовывать связи разных типов. В стабильном состоянии углерод имеет электронную конфигурацию  $1s^2 2s^2 p^2$ . В этом случае атом углерода двухвалентен. В большинстве химических соединений углерод выступает как четырехвалентный элемент. Четырехвалентное, возбужденное состояние атома углерода получается при переходе электрона из состояния  $2s$  в состояние  $2p$ . Ему соответствует конфигурация  $1s^2 2s^2 p_x^2 p_y^2 p_z$ . Энергия, затраченная на возбуждение, компенсируется энергией, выделяемой при образовании связей [1].

Известны два типа связей между электронами. Простая ковалентная называется  $\sigma$ -связью, а электроны, ее образующие, называются  $\sigma$ -электронами. Связи, образуемые электронными облаками, располагающимися перпендикулярно плоскости молекулы, называются  $\pi$ -связями, а образующие эти связи электроны –  $\pi$ -электронами.

Три различных сочетания  $\sigma$ - и  $\pi$ -связей образуют три состояния атомов углерода:  $sp^3$ -гибридизация, с тетраэдрическим расположением четырех  $\sigma$ -связей, полученных при взаимодействии одного  $s$ -электрона и трех  $p$ -электронов, – соответствует идеальной структуре алмаза;  $sp^2$ -гибридизация – характеризуется тремя  $\sigma$ -связями, а одна  $\pi$ -связь локализована в плоскости, перпендикулярной  $\sigma$ -связям (такому состоянию соответствует структура

графита); sp-гибридизация – образуется из двух  $\sigma$ -связей и двух  $\pi$ -связей и соответствует так называемому карбину, имеющему линейную полимерную цепочку –  $C \equiv C - C \equiv C -$  или  $= C = C = C =$  типа [2].

Исследования и количественная оценка распределения этих связей могут оказаться весьма плодотворными при изучении механизма формирования свойств углеродных материалов.

Атомы углерода в состоянии sp<sup>2</sup>-гибридизации образуют слоистые структуры. Также, как графен и пирографит. Слой (базисная плоскость) состоит из непрерывного ряда правильных шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода. Ближайшее расстояние между атомами в плоскости, равное стороне шестиугольника, составляет 1,417Å. Графит состоит из непрерывного ряда слоев, параллельных базисной плоскости. Атомы углерода в слое связаны тремя равноценными  $\sigma$ -связями [3]. Дополнительные связи образуются  $\pi$ -электронами, орбитали которых несколько перекрываются. Коллективизация  $\pi$ -электронов в графитовом слое придает его электрическим и оптическим свойствам металлический характер. Величина энергии связи между атомами углерода в плоскости составляет по различным данным от 340 до 420 кДж г/атом, а величина энергии связи между слоями не превышает 42-84 кДж-г/атом.

От последовательности чередования зависит тип идеальной кристаллической решетки графита: гексагональная или ромбоэдрическая (рис. 1). При чередовании слоев ab, ab, ab атомы углерода в каждом слое располагаются только над центрами правильных шестиугольников в соседнем слое. Это – гексагональная структура с четырьмя атомами углерода в элементарной ячейке [4]. Межслоевое расстояние в идеальном графите равно 3,354 Å. Элементарной ячейкой гексагональной структуры графита является прямая призма, в основании которой лежит правильный ромб.

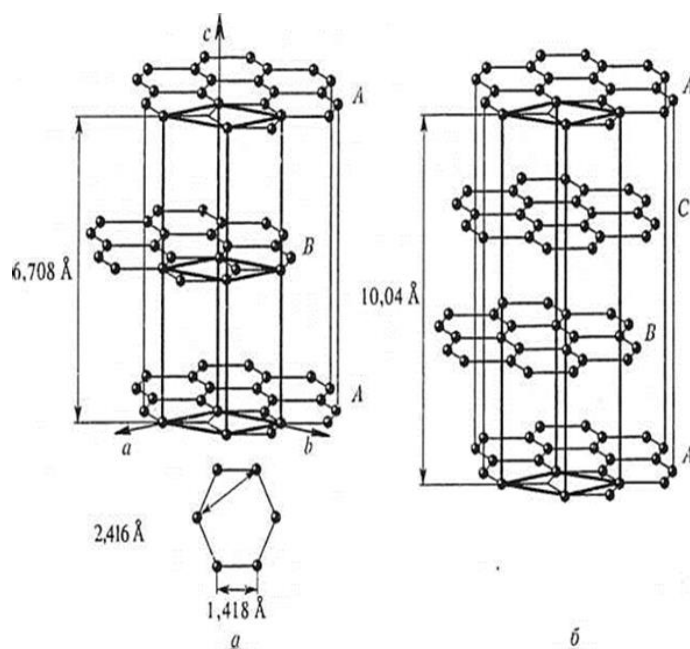


Рис. 1. Структура гексагонального (а) и ромбоэдрического (б) графита.

При чередовании слоев abc, abc реализуется ромбоэдрическая решетка графита. В отличие от гексагональной она является трехслойной. При температурах выше  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ромбоэдрическая упаковка переходит в гексагональную. Обе структуры идеального графита должны рассматриваться как бесконечные сетки, состоящие из гексагонов, расположенных в параллельных слоях. Однако практически в искусственных графитах эти сетки имеют конечные размеры.

Теоретическая плотность графита с учетом размеров кристаллической ячейки составляет  $2,265\text{ г/см}^3$ . Плотность искусственных графитов ниже из-за дефектов и пористости. Структурой графита обусловлена высокая анизотропия физико-механических свойств в базисной плоскости перпендикулярно к поверхности кристалла. Удельное электросопротивление монокристалла цейлонского графита в направлениях, перпендикулярном и параллельном оси c (см. рис. 1), составляет  $0,4$  и  $50\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  соответственно. Для других образцов природного графита соотношение этих величин составляет от  $100$  до  $100\ 000$  [5].

## 2. Эмиссионные свойства автокатодов на основе углеродных фольг

В данной статье рассмотрены фольги из углеродных материалов, которые имеют разные механические и автоэмиссионные свойства. При этом каждый материал может быть использован в качестве автокатодов в определенном классе электронных приборов.

### 2.1. Терморасширенный графит

Термически расширенным называется графит с увеличенным межслоевым расстоянием. Он характеризуется веерообразным расположением расщепленных графитовых пластинок. По строению является слоистым (на микроуровне) материалом из совокупности чешуек кристаллического графита толщиной 30–50 нм и размером в поперечнике 0,5–1,5 мм, что определяет большую дефектность его структуры.

В качестве сырья для получения термически расширенного графита применяется интеркалат графита, который также называют окисленным графитом. Процесс интеркалирования заключается во внедрении молекул и ионов серной или азотной кислоты в присутствии окислителя (перекиси водорода, бихромата или перманганата калия и др.) между слоями кристаллической решетки графита.

Для получения термически расширенного графита интеркалированный графит подвергается термолизу ударным нагревом до 900-1200 °С со скоростью 400-600 °С/с. В результате процесса интеркалированные графитовые порошки расширяются, расслаивающие агенты из них удаляются и образуется термически расширенный графит. Терморасширенный графит обладает очень низкой насыпной плотностью (1-3 г/л), развитой удельной поверхностью (15-80 м<sup>2</sup>/г), способностью к формованию без добавления связующего вещества [6].

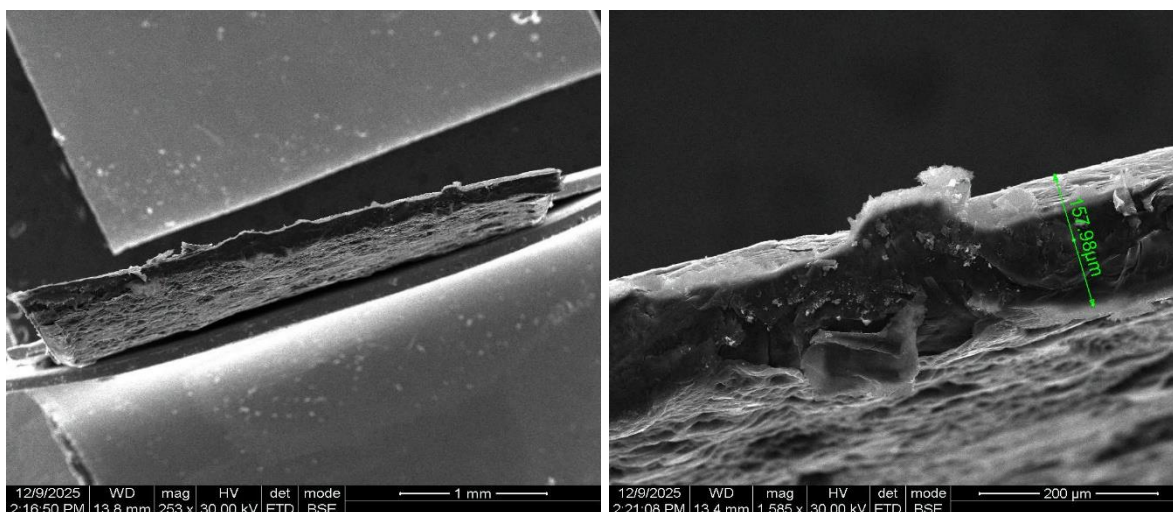


Рис. 2. Микрофотография фрагмента катода терморасширенного графита (ТРГ), получаемого по стандартной технологии.

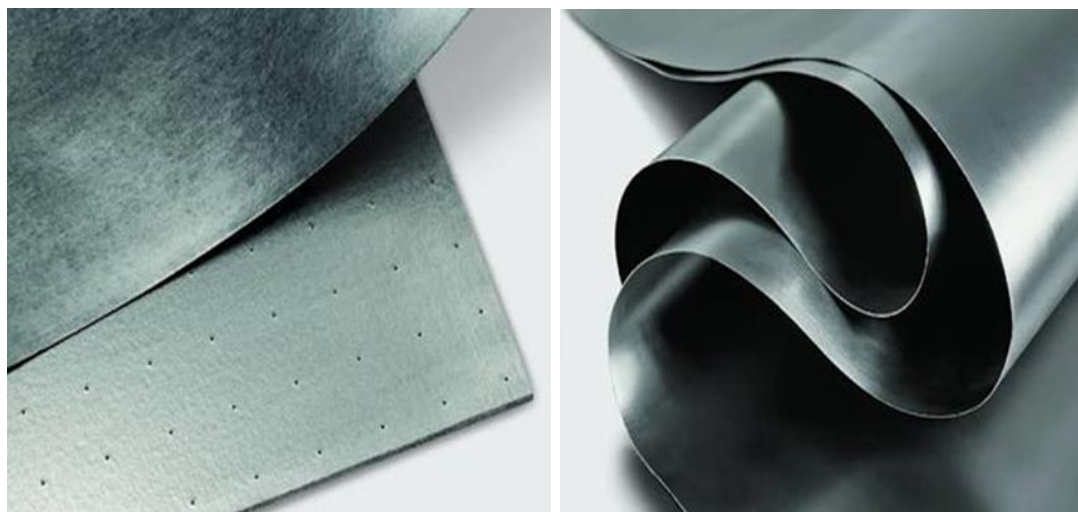


Рис. 3. Фольги из терморасширенного графита.

Таблица 1. Технические характеристики графитовой фольги.

Наименование параметра	Величина параметра
Плотность	1.2.. 2.0 г/см <sup>3</sup>
Толщина	50..200 мкм
Жесткость	16..27 Мпа
Модуль универсальности	500..1000 Мпа
Открытая пористость	Отсутствует
Удельное электрическое сопротивление в плоскости	5..8·10 <sup>-6</sup> Ом·м
Коэффициент теплопроводности в вакууме 10 <sup>-6</sup> Торр в плоскости	100..400 Вт/(м·К)
Коэффициент температуропроводности	4..30*10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с
Газопроницаемость	10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с

## 2.2. Пирографит

Пиролитический углерод – поликристаллический однофазный материал в виде пленок углерода, образующихся на нагретых поверхностях в результате термодеструкции углеродсодержащих веществ. Пироуглерод обладает высокой температурной и химической стойкостью. Он практически непроницаем для газов и жидкостей, не окисляется на воздухе до температуры 400 °С. В инертной среде пироуглерод сохраняет работоспособность до 2000 °С в течение длительного времени.

Образование пироуглерода можно рассматривать как процесс кристаллизации из газовой фазы на твердой поверхности (подложке). Поскольку пироуглерод образуется на нагретой каталитически неактивной поверхности, его структура зависит от температуры, при которой происходит отложение. Структура пироуглерода сформирована из графитовых сеток, расположенных параллельно поверхности осаждения. Несколько таких параллельно расположенных сеток объединены в пакеты или кристаллиты, отсюда ярко выраженная текстура материала [7].

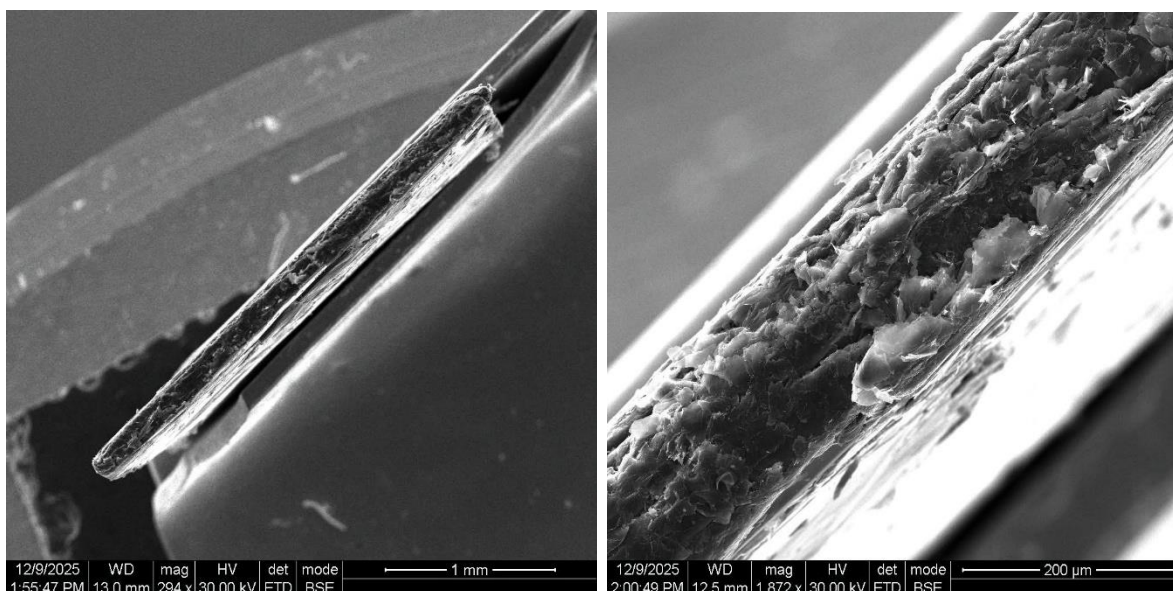


Рис. 4. Микрофотография фрагмента катода пирографита, получаемого по стандартной технологии.

Таблица 2. Свойства пирографита.

Характеристика	Направление	
	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	330
Термический коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6}$ 1/К	-0,6 0,2	19–22
Удельное электросопротивление, $\times 10^{-6}$ Ом·м	4,3	6000
Предел прочности при изгибе, МПа	–	3,3
Динамический модуль упругости, ГПа	30	–

### 2.3. Графен

Графен представляет собой двумерную структуру толщиной в один атом, состоящую из правильных шестиугольников со стороной 0,142 нм с атомами углерода в вершинах.

В зависимости от метода получения, температуры и других условий реальные листы графена содержат структурные дефекты, которые отражаются на его механических, электронных и транспортных характеристиках. Дефектами являются отсутствие атома углерода в гексагональной решетке, замена пары гексагонов парой пентагонгептагон, присоединение атома, радикала [8].

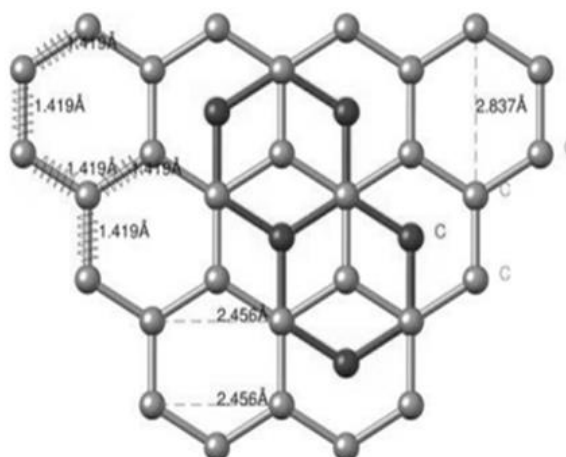


Рис. 5. Кристаллическая решетка графена.

Гипотетическая толщина безупречного графита составляет 2,265 г/см<sup>3</sup>. В отличие от совершенных графитов, в которых системы йот неограничены, в подлинных графитах системы имеют ограниченные размеры. Кроме того,

подлинны графиты отличаются от совершенных структур в пределах видимости несовершенств различных видов в них. В случае, если запрос поворота слоя поврежден, происходит скопление пакетов. Огромное количество таких недостатков приводит к окончательному загромождению слоев, сравнительных с цапфой. Несмотря на то, что параллелизм слоев защищен. Такая структура обозначена как «турбостратическая»; для этой ситуации межслойное расстояние составляет 3,44 Å. Недостатки другого рода дезертированы в обязательствах сетки, вызванных близостью внешних молекул или из-за изменений в валентности некоторых углеродных йот. Из-за несовершенства драгоценных камней и пористости толщина графита ниже.

Изображенная слоистая структура графита вызывает высокую анизотропию его физико-механических свойств. Например, свойства электрического удельного сопротивления способами, противоположными и соответствующими ступице из драгоценного камня, могут изменяться от 100 до 100 000 раз, в зависимости от рода характерного графита [9].

Графен – двумерный материал, состоящий из одного слоя атомов углерода, упакованных в гексагональную решетку, – представляет собой перспективную платформу для создания автоэмиссионных катодов. Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, таким как высокая подвижность носителей заряда, термическая и химическая устойчивость, а также малая работа выхода (~4.5–5.0 эВ), графен способен эффективно испускать электроны под действием внешнего электрического поля. Эти качества делают его особенно привлекательным материалом для использования в электронных пушках нового поколения.

В отличие от углеродных нанотрубок, графен обладает плоской структурой, однако эмиссионные характеристики материала могут быть существенно усилены за счет морфологических особенностей, таких как неровности поверхности, наличие выступающих краев, складок и дефектов. Особенно высокой автоэмиссионной способностью обладают ребра и острые кромки графеновых листов, где происходит усиление локального

электрического поля. Исследования показывают, что плотность эмиссионного тока с таких участков может достигать значений, сравнимых с нанотрубками, при сохранении высокой стабильности эмиссии [9].

Синтез графена для эмиссионных применений обычно осуществляется методами химического осаждения из газовой фазы на металлических подложках, таких как медь или никель. Существенную роль играет и постобработка – например, травление, формирование nanoострых краев или модификация структуры с помощью плазмы, – позволяющая повысить эмиссионную активность материала. Также активно исследуются гетероструктуры на основе графена и других двумерных материалов, которые способны комбинировать эмиссионные и защитные свойства.

Основными преимуществами графеновых катодов являются низкий порог эмиссии, высокая стабильность тока, стойкость к воздействию ионов и термическая устойчивость. Вместе с тем, открыты остаются вопросы масштабируемости, воспроизводимости эмиссионных характеристик, а также влияния загрязнений и окружающей среды на эффективность эмиссии. Решение этих задач требует дальнейшего развития технологий получения и интеграции графеновых структур в эмиссионные системы. графен является перспективным материалом для создания автоэмиссионных катодов, обладающих высокой эффективностью, стабильностью и потенциалом для применения в компактных и высокоэффективных электронных пушках и вакуумной электронике [10].

ВАХ строились в координатах  $(E, J)$  и  $(U, I)$ , где  $E$  – напряженность электрического поля в зазоре между анодом и катодом ( $E = U/\Delta$ ),  $U$  – разность потенциалов между электродами,  $\Delta$  – зазор между автокатодом и анодом,  $J$  – плотность тока ( $J = I/S$ , где  $I$  – ток катода,  $S$  – площадь катода). Исходное сопротивление между контактными площадками было 4,6 кОм. Диапазон измерений пришлось ограничить токами до 30 мкА, поскольку при больших токах начинались микропробои.

Таблица 3. Свойства высокопрочных графитов.

Характеристика	МПГ-6 ⊥	МПГ-6	МПГ-8 ⊥	МПГ-8
Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/м·К	95	–	87	122
Термический коэффициент линейного расширения, $\alpha \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	6.6	6.0	6.9	5.9
Удельное электросопротивление, $\rho \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	14.2	20.8	13.7	8.8
Предел прочности при растяжении, МПа	27	23	28	27.5
Динамический модуль упругости, ГПа	10	–	10	11.5

### 3. Автоэмиссионные катоды из углеродных фольг

Автоэмиссионные катоды из углеродных фольг представляют собой одно из наиболее перспективных решений для современных электронных устройств, где требуется высокая стабильность, эффективность и долговечность эмиссии электронов. Углеродные фольги, изготовленные методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), обладают уникальными свойствами, такими как низкая работа выхода электронов (2.5–4.5 эВ), высокая термическая стабильность (до 3000 °С в инертной среде) и исключительная механическая прочность. Эти характеристики делают их идеальными для использования в качестве автоэмиссионных катодов, особенно в условиях высоких электрических полей и экстремальных температур [10].

Основным преимуществом углеродных фольг является их способность обеспечивать стабильную эмиссию электронов при низких напряжениях (порядка нескольких вольт), что значительно повышает энергоэффективность устройств. Благодаря высокой чистоте и однородности материала, углеродные фольги минимизируют десорбцию газов, что предотвращает пробой и увеличивает срок службы катодов [11]. Кроме того, их термическая стабильность позволяет использовать их в высокотемпературных приложениях, таких как

вакуумная электроника, мощные электронные устройства и рентгеновские трубки.

Технология производства автоэмиссионных катодов из углеродных фольг включает несколько ключевых этапов. На первом этапе углеродная фольга формируется методом CVD, что обеспечивает высокую степень чистоты и однородности материала. Затем фольга подвергается механической и термической обработке для создания оптимальной поверхности, способствующей равномерной эмиссии электронов. На заключительном этапе катоды интегрируются в электронные устройства, где их низкая работа выхода и высокая стабильность обеспечивают длительную и надежную работу [12].

Применение углеродных фольг в автоэмиссионных катодах открывает новые возможности для разработки компактных и высокопроизводительных электронных устройств. Например, в дисплеях с автоэмиссионной подсветкой такие катоды позволяют достичь высокой яркости при низком энергопотреблении. В рентгеновских трубках они обеспечивают стабильную эмиссию электронов, что повышает качество изображений. В ускорителях частиц углеродные фольги используются для создания интенсивных электронных пучков, необходимых для исследований в области физики высоких энергий [13].

Преимущества углеродных фольг перед традиционными материалами, такими как вольфрам или молибден, включают их более низкую работу выхода электронов, что позволяет снизить энергопотребление, а также их устойчивость к агрессивным средам и высоким температурам. Эти свойства делают углеродные фольги ключевым материалом для разработки современных технологий, включая автоэмиссионные катоды, терморегулирующие элементы и компоненты для высокотемпературных применений [14].



Рис. 6. Классификация углеродных фольг, представляющих интерес для производства автокатодов.

Катоды из углеродной фольги становятся одной из самых универсальных технологий холодного катода для вакуумной электроники и устройств с полевой эмиссией. В отличие от традиционных термоионных катодов, для которых электронная эмиссия осуществляется при высоких температурах, катоды из углеродной фольги используют принцип полевой эмиссии, при котором электроны туннелируют с поверхности катода под действием приложенного электрического поля. Их конструкция использует преимущества углерода – легкость, химическую инертность, высокую проводимость и механическую гибкость, – а также геометрию тонкой фольги для обеспечения больших площадей эмиссии и гибкой интеграции в устройства [15].

Выбор материала сильно влияет на эффективность и стабильность катодов из углеродной фольги. Простые аморфные углеродные фольги обеспечивают однородную поверхность с умеренными эмиссионными свойствами, но часто не обладают достаточной прочностью при высоких токах. Фольги из терморасширенного графита (ТРГ) создают слоистую структуру с анизотропной проводимостью, которая улучшает перенос электронов [16]. Алмазоподобные углеродные покрытия (DLC) на фольгах широко используются для повышения твердости и стабильности при сохранении низкого сродства к электрону. Более современные конструкции включают армирование графеновыми слоями или углеродными нанотрубками (УНТ), которые образуют острые наноразмерные

острия для локализованного усиления поля, значительно снижая поле включения. В совокупности эти материалы обеспечивают широкий диапазон характеристик в зависимости от требований применения.

Конструктивно катоды из углеродной фольги можно разделить на несколько категорий. Плоские фольги представляют собой простейшую конструкцию, обеспечивая плоскую поверхность для равномерной эмиссии. Несмотря на простоту изготовления, они, как правило, страдают от более высоких пороговых полей из-за отсутствия резких особенностей эмиссии. Пористые фольги, полученные методом химического травления или термического расширения, обеспечивают значительно большую эффективную площадь поверхности, увеличивая количество активных центров эмиссии [17]. Структурированные фольги, часто изготавливаемые с помощью литографии или лазерного структурирования, содержат выступы, конусы или микропоры, которые служат контролируемыми точками эмиссии. Многослойные фольги, состоящие из нескольких тонких углеродных листов, уложенных друг на друга, обеспечивают повышенную стабильность и лучшее рассеивание тепла при длительной работе.

Одна из наиболее перспективных стратегий предполагает использование фольг, армированных УНТ. В таких конструкциях УНТ либо выращиваются непосредственно на поверхности фольги, либо внедряются в матрицу фольги. Высокое соотношение сторон УНТ обеспечивает значительное локальное усиление поля, обеспечивая высокие плотности тока при относительно низких приложенных напряжениях [18]. Кроме того, гибкость УНТ помогает снизить повреждения при высоких токах. Аналогичным образом, фольги, армированные графеном, используют исключительную электропроводность и механическую прочность графеновых листов, что делает их идеальными для устройств, требующих стабильной и длительной работы.

Эксплуатационные характеристики катодов из углеродной фольги зависят как от свойств самого материала, так и от конструкции. Ключевым фактором является эффективная работа выхода, которую можно снизить путем

легирования азотом или металлами для облегчения эмиссии электронов. Другим критическим параметром является равномерность эмиссии: хотя наноразмерные наконечники улучшают эмиссию, они также могут создавать горячие точки, приводящие к ранней деградации [19]. Термическая стабильность не менее важна, поскольку катоды должны выдерживать локальный нагрев без потери структурной целостности. Механическая гибкость также позволяет формировать углеродную фольгу в различные конфигурации устройств, что дает ей практическое преимущество по сравнению с жесткими излучателями.

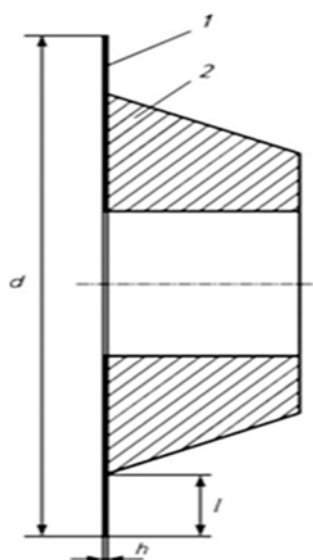


Рис. 7. Конструкция дискообразного тонкопленочного автоэмиссионного катода:  
1 – пленка хрома; 2 – медное основание;  $h$  – толщина пленки,  $d$  – диаметр,  
 $l$  – высота выступающей над подложкой части фольги.

Применение углеродных фольговых катодов разнообразно. В автоэмиссионных дисплеях (FED) они служат компактными и быстродействующими источниками электронов для экранов высокого разрешения. В миниатюрных рентгеновских трубках фольга с холодным катодом обеспечивает низкое энергопотребление, что делает возможным создание портативных устройств визуализации. Вакуумная микроэлектроника, включая СВЧ-лампы и усилители бегущей волны, выигрывает от быстрого запуска и эффективности углеродных фольговых эмиттеров. В электронной микроскопии низкий уровень шума углеродных фольг обеспечивает высокое качество изображения. Кроме того, в аэрокосмической технике углеродные фольговые

катоды рассматриваются как долговечные электронные эмиттеры для ионных двигателей, где длительный срок службы и устойчивость к космическим условиям имеют решающее значение [17].

Несмотря на свои преимущества, катоды из углеродной фольги также сталкиваются с трудностями. Достижение стабильной и долговременной эмиссии без деградации остается ключевой проблемой, особенно при высоких плотностях тока. Дефекты и примеси в фольге могут приводить к неравномерной эмиссии и искрению. Фольги на основе УНТ и графена, несмотря на свою высокую эффективность, требуют сложных и дорогостоящих методов изготовления. Загрязнение поверхности в вакуумных средах также представляет угрозу стабильности эмиссии, требуя нанесения защитных покрытий или методов очистки на месте. Поэтому текущие исследования направлены на достижение баланса между производительностью, масштабируемостью и экономической эффективностью.

### **3.1. Терморасширенный графит**

Терморасширенный графит (ТРГ) – это конструкционный материал, получаемый из обеззоленного графита путем его термической обработки. Он химически инертен и термостоек. Также ТРГ хорошо поддается механической обработке и способен обеспечивать стабильную эмиссию при относительно низком вакууме и на протяжении длительного времени. Благодаря развитой поверхности ТРГ является хорошим автоэлектронным эмиттером [9].

После успешного применения катодов из углеродной фольги в классической конструкции электронно-оптической системы [10] было предложено использовать фольгу в качестве латерального катода для создания планарного источника электронов. Преимуществами использования фольги в такой конструкции являются возможность создания массива эмиссионных центров из единой пластины фольги, уменьшение размеров конечного прибора, уменьшение и высокая точность установки межэлектродных расстояний, существенное увеличение площади эмитирующей поверхности автокатада и,

как следствие, увеличение предельных рабочих токов конечного прибора. Для точечного эмиттера  $S_T \sim r^2$ , для латерального  $S_L \sim D_K \cdot h$ , где  $r$  – радиус закругления острия,  $D_K$  и  $h$  – диаметр и толщина латерального катода. Поскольку  $D_K \gg r$ , а  $h \sim r$ , то получаем  $S_L \gg S_T$ .

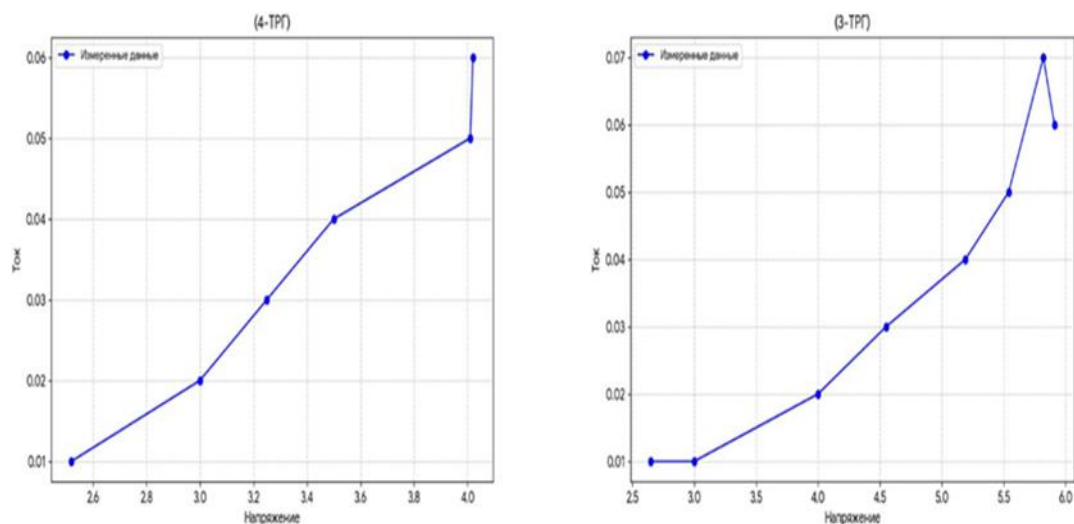


Рис. 8. Зависимость тока (А) автоэмиссии от времени (мин.) для катодов из: а) и в) ТРГ при напряженности поля 10,43 кВ/см.

Для более детального понимания работы предлагаемого прибора проведено моделирование электронно-оптической системы. Исследовалось плоское автоэлектронное устройство вертикальной конструкции и подкатодным модулятором. Исследование подобной конструкции с катодами из углеродных нанотрубок представлено в работе [11]. Конструкция устройства изображена на рис. 8.

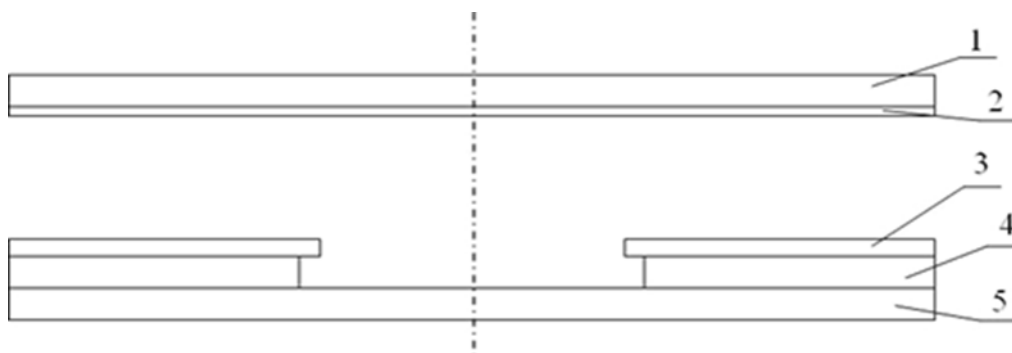


Рис. 9. Конструкция устройства. 1 – анод (стекло с ITO-слоем), 2 – слой люминофора, 3 – катод (ТРГ), 4 – изолятор, 5 – модулятор.

Для использования такой конструкции в качестве пикселя автоэмиссионного дисплея необходимо, чтобы изображение, формируемое электронами на аноде, было не больше определенного диаметра.

В данной конструкции электроны, эмитированные с торца катода, будут двигаться преимущественно к центру конструкции за счет модулятора. На рис. 9 показан результат численного решения уравнения Лапласа и уравнений движения электронов вблизи эмитирующей части катода. Видно, что траектории электронов, начинающиеся на эмиттере, направлены к центру конструкции.

Использование углеродной фольги в качестве материала латерального автоэмиссионного катода позволило увеличить площадь рабочей поверхности катода, снизить токовую нагрузку на отдельные эмиссионные центры, уменьшить габариты прибора и размер автоэмиссионного изображения отдельного катода [11]. Предложенная конструкция может быть использована для создания плоского дисплея, источника света большой площади, а также других электровакуумных приборов с мощным безынерционным источником свободных электронов.

### **3.2. Пирографит**

Центры эмиссии автоэмиссионных катодов из пиролитического графита представляют собой тонкие прочные микропластины, образующие структуру пиролитического графита. Таким образом, автоэмиссионные свойства фольги из пиролитического графита близки к свойствам полиакрилонитрильных углеродных волокон [14]. Дальнейшие исследования направлены на определение оптимальной температуры обработки и толщины пирографитовой пластины. С этой целью в исследовании исследованы эмиссионные характеристики автоэмиссионных катодов из пирографитовых пластин толщиной 30 мкм, обработанных при 1400, 2000, 2500 °С, а также пластин толщиной 5 и 150 мкм, обработанных при 2000 и 1700 °С соответственно.

Измерениям предшествует стандартная процедура формовки в линейном режиме до максимально возможного тока 6–8 мА при длине рабочей кромки

2 мм, хотя автоэмиссионные катоды из таких материалов демонстрируют элементы процесса самоформовки. Вольтамперные характеристики этих автоэмиссионных катодов, снятые каждые 10 мин в процессе формовки, определяют зависимость тока, при котором начинается реструктуризация эффективной площади катода, от температуры термообработки пиролитического графита толщиной до 30 мкм и толщины пластин образца при  $T_{trm} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

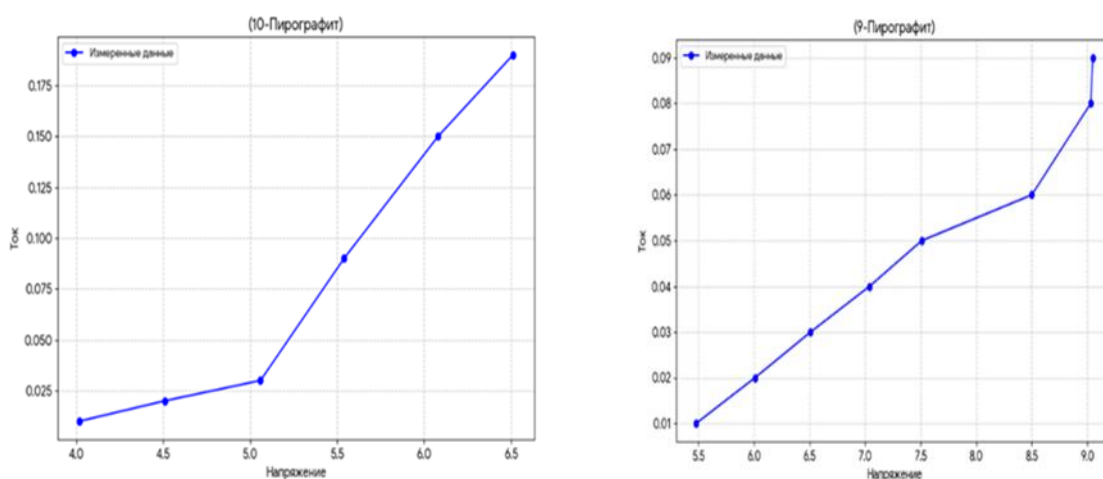


Рис. 10. Зависимость тока (А) автоэмиссии от времени (мин.) для катодов из пирографита при напряженности поля 10,43 кВ/см.

Диаграммы показывают, что предельный ток этих автоэмиссионных катодов увеличивается с ростом температуры термообработки материала. Наиболее вероятной причиной этого является повышение прочности материала с ростом температуры обработки. Аналогичная зависимость имеет место и для автоэмиссионных катодов на основе углерода [14]. Рост толщины образца-пластины увеличивает общее количество эмитирующих микровыступов на поверхности катода, тем самым увеличивая значение тока, при котором происходит реструктуризация эффективной площади.

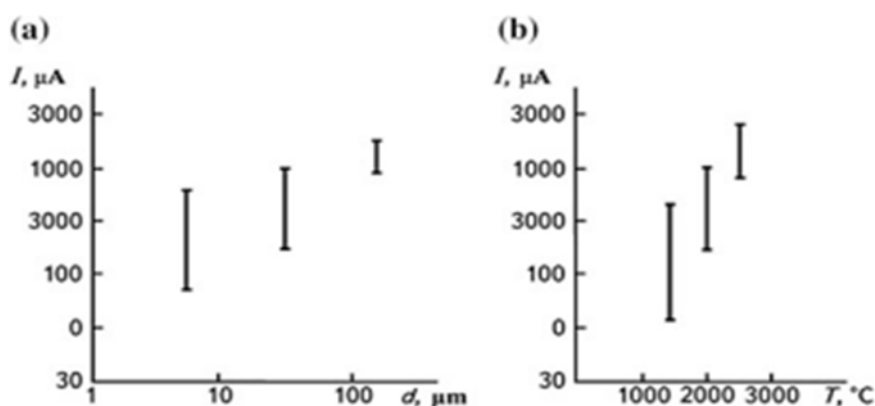


Рис. 11. Зависимость тока начала реорганизации поверхности пирографитового автоэмиссионного катода от толщины пластины при  $T = 2000^\circ\text{C}$ .

Уровень нестабильности тока автоэмиссии постоянен для всех образцов при малых токах, до  $1^{-10}$  мкА, и уменьшается с ростом тока при его более высоких значениях, свыше 1 мА. При токах менее 1 мкА наименьшее значение нестабильности показали пирографитовые автоэмиссионные катоды толщиной 30 мкм при  $T_{trtm} = 2000^\circ\text{C}$  ( $r = 9\%$ ), а наибольшее – при  $T_{trtm} = 2500^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 27\%$ ). При токах  $3^{-6}$  мкА нестабильность всех образцов составляет около 1–2 %.

Анализ флуктуаций тока автоэмиссии показывает, что наибольшее количество эмиссионных центров при прочих равных условиях имеет пирографитовый автоэмиссионный катод толщиной 30 мкм и температурой обработки  $2000^\circ\text{C}$ . Поскольку максимальный ток, длительный срок службы и равномерность автоэмиссии по поверхности катода напрямую зависят от количества эмитирующих центров, пирографит с такими параметрами наиболее предпочтителен для электронных устройств.

Основным недостатком пиролитических углеродных автоэмиссионных катодов является сложность их фиксации и изготовления катодных узлов или катодно-модуляционных узлов с воспроизводимыми характеристиками автоэмиссии. Причиной этого является невозможность получения автоэмиссии с плоской поверхности фольги [15].

### 3.3. Графен

В последнее время исследуется автоэмиссионная катодная структура из углеродных материалов: фуллеренов, наноалмазов, нанотрубок, стеклоуглерода, графеноподобных материалов и графеновых пленок. Это связано с возможностью создания ряда автоэмиссионных дисплеев, микро и наносенсоров, и компьютеров нового поколения на основе углеродных автоэмиссионных катодов. Среди всех перечисленных материалов углеродные нанотрубки и графеновые пленки рассматриваются как наиболее перспективные для создания автоэмиссионных структур микро и наноэлектроники [16].

Автоэмиссионные свойства графена схожи со свойствами углеродных наноматериалов. В частности, присутствует эффект низкопороговой автоэмиссии. Низкий порог полевой эмиссии наблюдается практически для всех «наноуглеродных» эмиттеров и соответствует электрическим полям, на два-три порядка более низким, чем для металлов и полупроводников. Это делает графен весьма перспективным материалом для создания высокоэффективных автоэмиссионных микро- и наноэлектронных приборов [9]. Существует несколько методов получения графена, эти методы можно разделить на следующие группы: механические методы (отшелушивание), химические методы, методы эпитаксии, методы термического разложения (термодеструкция) [17].

Поскольку, одним из основных требований к автоэмиссионным структурам является высокая стабильность эмиссии при высоких температурах и плотностях тока, то в качестве основы эмиттера рассмотрен карбид кремния как перспективный материал высокотемпературной электроники [10].

Катод состоит из подложки карбида кремния, на одной стороне которой сформировано наноразмерное острие. На другой стороне подложки омический контакт Ti-Au.



Рис. 12. Конструкция автоэмиссионного катода: 1 – графен, 2 – SiC, 3 – Ti-Au.

Расчет плотности тока выполнялся согласно уравнению Фаулера-Нордгейма:

$$J = A \frac{E^2}{\phi} \exp \left[ -\frac{B\phi^{1/2}}{E} \right],$$

где  $u = 1 - CE/\phi^2$ ,  $E$  – напряженность электрического поля;  $\phi$  – работа выхода электронов,  $J$  – плотность тока автоэлектронной эмиссии [9].

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  являются приближенными и представляют собой комбинации атомных постоянных. Данные коэффициенты соответственно равны:  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{эВ} \cdot \text{В}^{-2}$ ,  $7 \cdot 10^9 \text{ эВ}^{-3/2} \cdot \text{В} \cdot \text{М}^{-1}$ ,  $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{В}^{-1}$ .

Связь между приложенной разностью потенциалов и электрическим полем вблизи вершины острия определяется известным выражением:

$$E = \beta U$$

где  $U$  – разность потенциалов,  $\beta$  – коэффициент усиления поля или, как его часто называют, форм-фактор, величина которого зависит от формы вершины острия и геометрических параметров автоэмиссионной структуры.

Знание точной формы эмитирующей части острия является необходимым для правильного определения величины поля у поверхности эмиттера и величины эмитирующей площади, без чего невозможно сравнение эксперимента с теорией.

Определение поля в реальных условиях, является нелегкой задачей. Обычно пользуются аппроксимациями, заменяющими истинную форму острия какой-либо правильной формой, позволяющей найти распределение поля из теории потенциала [10].

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие виды аппроксимаций.

1) Гиперболическая аппроксимация, где острие представляется в виде гиперболоида вращения, а анод – в виде плоского диска.

2) Параболическая аппроксимация, в этой аппроксимации острие и анод представлены в виде двух конфокальных параболоидов вращения.

3) Эквипотенциальная аппроксимация, где форма эмиттера близка к форме одной из эквипотенциальных поверхностей электрического поля, которое создано заряженным ортогональным конусом со сферой на вершине.

4) Цилиндрическая аппроксимация, где форма острия и анода представлена в виде системы коаксиальных цилиндров.

Также существуют различные аппроксимации для эмиттеров в виде лезвия или пленки, но в данной работе мы не будем их рассматривать [11].

Оптимальной по точности и трудоемкости является параболическая аппроксимация. Согласно параболической аппроксимации для электродов в виде конфокальных параболоидов вращения коэффициент усиления поля равен:

$$\beta = \frac{2}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

где  $r$  – радиус острейного эмиттера,  $R$  – расстояние от вершины острейного эмиттера до анода. Параметры  $r$  и  $R$  выбирались в соответствии с конструктивными размерами катода  $r$  (5-15 нм) и  $R$  (10-100 нм). Разность потенциалов изменялась в диапазоне от 1 до 30 В.

## **Заключение**

В представленном исследовании были изучены автоэмиссионные свойства наноструктурированных катодов, изготовленных из различных углеродных фольг, включая терморасширенный графит, пиролитический графит и графен. Исследование подтверждает, что эти материалы весьма перспективны для использования в качестве эффективных источников электронов в современных

вакуумных электронных устройствах. Их уникальные свойства, такие как высокая электропроводность, механическая прочность и низкая работа выхода, делают их идеальными кандидатами для этого применения.

В данной работе проанализировано современное состояние разработки автоэмиссионных катодов из наноструктурированной углеродной фольги. В исследовании рассмотрены их существенные преимущества по сравнению с традиционными фотокатодами, а также потенциал их применения в современных вакуумных электронных устройствах, в частности, в плоских дисплеях. Были исследованы различные подходы к созданию и оптимизации таких катодов, что выявило их практические преимущества.

Ключевым выводом данной работы является то, что углеродные фольги, структурированные в наномасштабе, представляют собой эффективную и масштабируемую платформу для стабильной автоэмиссии в слабых электрических полях. Это обусловлено их большой удельной площадью поверхности и естественным образованием острых наноструктур, эмитирующих электроны. В данном исследовании особое внимание уделено физическим процессам, лежащим в основе автоэмиссии, и факторам, влияющим на стабильность и эффективность катодов, таким как морфология поверхности и внутренние структурные особенности материала.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть сосредоточены на преодолении существующих технологических барьеров. Крайне важно разработать более надежные и воспроизводимые методы массового производства наноструктурированных углеродных фольг для обеспечения стабильных эмиссионных характеристик. Также важно продолжить изучение механизмов деградации катодов в процессе эксплуатации и искать новые подходы к повышению их долговечности. Сочетание достижений материаловедения и нанотехнологий с глубоким пониманием физики автоэмиссии позволит создать следующее поколение эффективных и долговечных источников электронов, отвечающих требованиям современных и будущих вакуумных электронных устройств.

## Литература

1. Лвин З.Я. и др. Углеродные материалы для автоэмиссионных приборов на их основе // Труды Московского физико-технического института. – 2018. – Т. 10. – №. 2 (38). – С. 30-46.
2. Лейченко А., Шешин Е., Щука А. Наноструктурные углеродные материалы в катодолюминесцентных источниках света // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2007. – №. 6. – С. 94-101.
3. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения / С.Н. Колокольцев. – Москва : Интеллект, 2012. – 296 с. – ISBN 978-5-91559-113-3. – EDN YSNMGB.
4. Патент № 2398738 С1 Российская Федерация, МПК С01В 31/04, С04В 35/536. Высокотемпературный углеграфитовый теплоизоляционный материал и способ его получения : № 2009106482/15 : заявл. 26.02.2009 : опубл. 10.09.2010 / Н. Е. Сорокина, А. А. Свиридов, А. Н. Селезнев [и др.]. – EDN DYXFAY.
5. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – №. 9. – С. 977-1009.
6. Кудашев С.Б., Игнатъев А.А., Сидорова Е.В., Углеродные наноматериалы и композиты. Санкт-Петербург, Лань, 2021, С.384.
7. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А., Малкин А.И., Химическое материаловедение: Наноструктуры и новые технологии. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019, С.432-433.
8. Иванов В.К., Попков В.И., Наноструктурные углеродные материалы: Графен и его производные. Москва, Техносфера, 2021, С.312-314.
9. Гальперин А.М., Карташова Н.И., Углеродные наноматериалы: получение, структура, применение. Москва, НИЯУ МИФИ, 2020, С.340.
10. Bobkov A.F., et al. Some aspects of the use of carbon materials in field emission cathodes // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, Volume 19, Issue 1, P.32-38.

11. Dong-gn Lee, Shang-hyeun Park, Youg-chul Kim, Chang-soo Lee, Do-yoon Kim. Field emission devices and methods of manufacturing gate electrodes thereof // Pat USA US20150060757A1.
12. Zhu J., Chen D., Wang Q. Field emission characteristics of carbon foil cathodes for display technologies // Vacuum, 2020, Vol. 175, P. 109-117.
13. Li X., Zhang Y., Wang L. Carbon-based field emission cathodes: Properties and applications // Applied Surface Science, 2019, Vol. 489, P. 213-224.
14. Шешин Е.П., Кузнецов С.И. Автоэмиссионные свойства углеродных материалов и перспективы их применения в катодах холодного типа // Известия РАН. Серия физическая, 2016, Т.80, №3, С.392-398.
15. Шешин Е.П., Кузнецов С.И. Автоэмиссионные свойства углеродных материалов и перспективы их применения в катодах холодного типа. // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т.80, №3. С.392-398.
16. Кузнецов С.И., Петров А.Л. Применение лазерного излучения для модификации поверхности и раскрытия углеродных композиционных материалов и углеродных тканей. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т.5, №1. С.46-54.
17. Герасимов В.И., Капица П.Л., Романов В.А. Исследование структуры и свойств терморасширенного графита и фольг на его основе. // Успехи физических наук. 2015. Т.185, №9. С.987-995.
18. Li X., Zhang Y., Wang L. Carbon-based field emission cathodes: Properties and applications. // Applied Surface Science. 2019. Vol. 489. P. 213-224.
19. Wai Zin Hlaing, Evgeny P. Sheshin, Htet Win Aung, Ye Min Htwe, Kyaw Moe Aung. Research of Field-Emission Properties of Flat Field Emission Cathodes Based on Graphite Foils // International conference on Electrical and Electronics Engineering (February 18- 19, 2020, Seoul, South Korea). – 2020. ISSN(p): 2394-2835 Volume-7, Issue-5, P. 11-15.

**Для цитирования:**

Тхет Хму Маунг, Чит Фон Паинг, Шешин Е.П. Автоэмиссионные свойства наноструктурированных катодов на основе углеродных фольг // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.13>