



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники»

Институт перспективных материалов и технологий

Королев Павел Андреевич

Бакалаврская работа

по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

**«Исследование особенностей процесса формирования термитного материала  
 $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$  методом электрофоретического осаждения»**

Научный руководитель: ассистент института ПМТ,  
к.т.н. Лебедев Е.А.

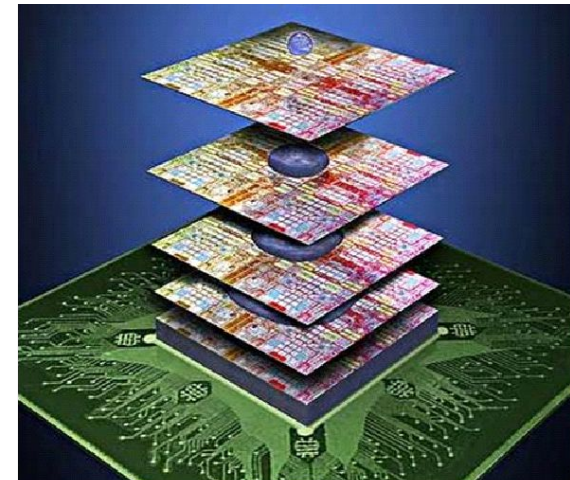


# Актуальность

- Более 100 лет назад термитные материалы использовались в качестве сварки для рельсов.
- Сейчас термитные материалы активно исследуются в микроэлектронике.



Использование термитных материалов  
в качестве сварки для рельсов

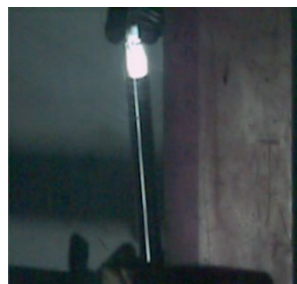


Использование термитных материалов  
в микроэлектронике

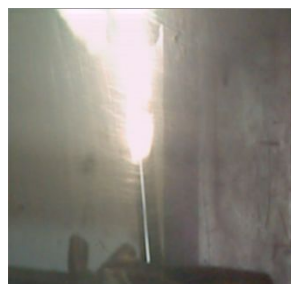


# Возможности порошковых термитных материалов

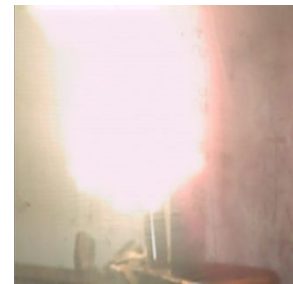
Al-CuO<sub>x</sub>  
Скорость  
распространения:  
150 м/с



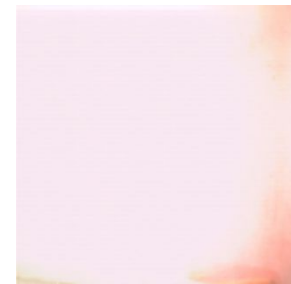
0 мс



0,08 мс



0,12 мс

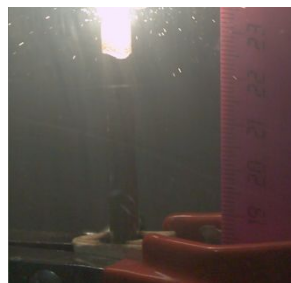


0,2 мс

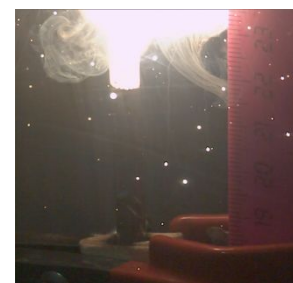
Al-FeO<sub>x</sub> Скорость  
распространения:  
0.3 м/с



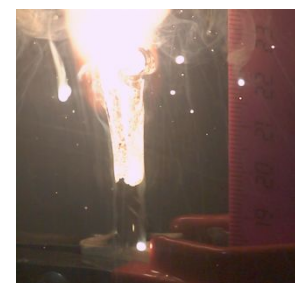
0 мс



3 мс

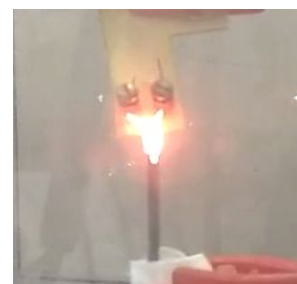


30 мс



100 мс

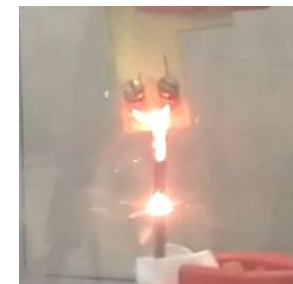
Al-Ni  
Скорость  
распространения:  
0.015 м/с



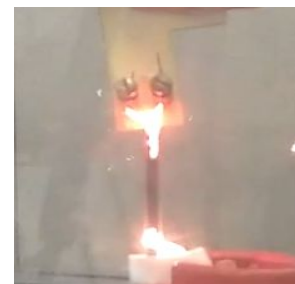
0 мс



1000 мс



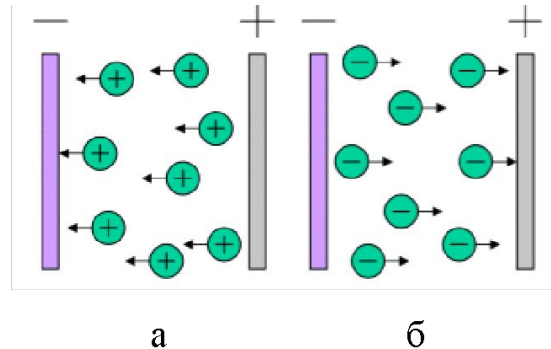
2000 мс



3000 мс



# Преимущества электрофореза



Схематическая иллюстрация процесса электрофоретического осаждения:

а) катодный процесс; б) анодный процесс

- Осаждение можно производить на любые проводящие подложки;
- возможность осаждения многокомпонентных композитных материалов;
- не требует дорогостоящего оборудования.



# Цели и задачи

## Цель:

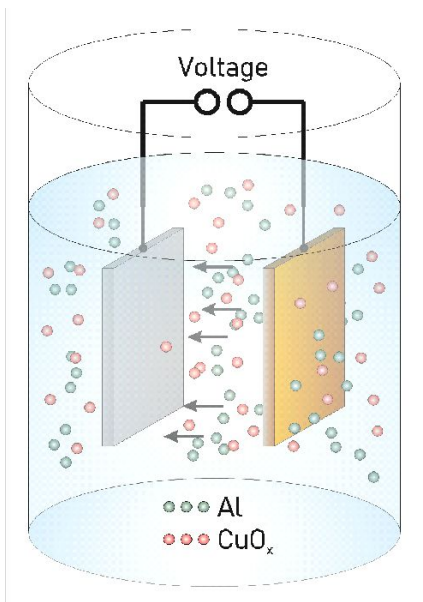
- разработка и исследование особенностей процесса формирования термитного материала  $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$  методом электрофоретического осаждения для использования в качестве инициатора вторичных реакций.

## Задачи:

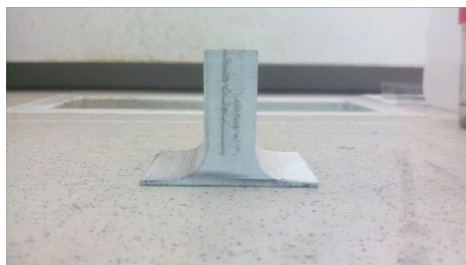
- выбор материала для подложки и подготовка суспензии для электрофоретического осаждения;
- исследование влияния напряжения, времени, количества циклов осаждения на проведение процесса;
- анализ морфологии состава при помощи РЭМ-исследований;
- исследование влияния добавления углеродных нанотрубок в состав формируемого материала на скорость распространения реакции горения материала.



# Технологическая часть



Электрофоретическая ячейка



а



б

Фото электрофоретической ячейки, распечатанной на 3D-принтере: а) вид сбоку; б) вид сверху и держатели для электродов

- Этапы подготовки перед процессом электрофоретического осаждения:
- взвешивание компонентов суспензии;
  - добавление растворителя в суспензию и перемешивание ее компонентов в ультразвуке;
  - сборка ячейки и проведение процесса электрофоретического осаждения.

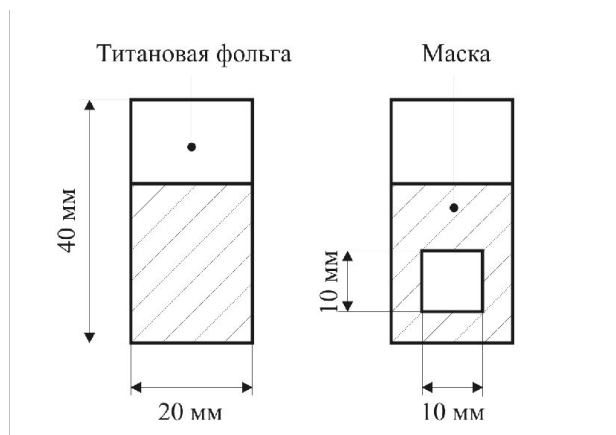


Фото разбиения частиц компонентов суспензии при помощи ультразвука



# Режимы электрофоретического осаждения

- Напряжение: 10 – 150 В;
- Продолжительность цикла осаждения: 4 - 50 мин.;
- Количество циклов: 1 – 5;
- Расстояние между электродами – 10 мм;
- Состав суспензии: 50 мл изопропилового спирта + 30 – 75 мг активного вещества.
- Материал подложки – титановая фольга.



Схематическое изображение маскирования экспериментального образца с обратной и лицевой стороны



# Экспериментальное исследование процесса осаждения с составом $\text{Al-CuO}_x$

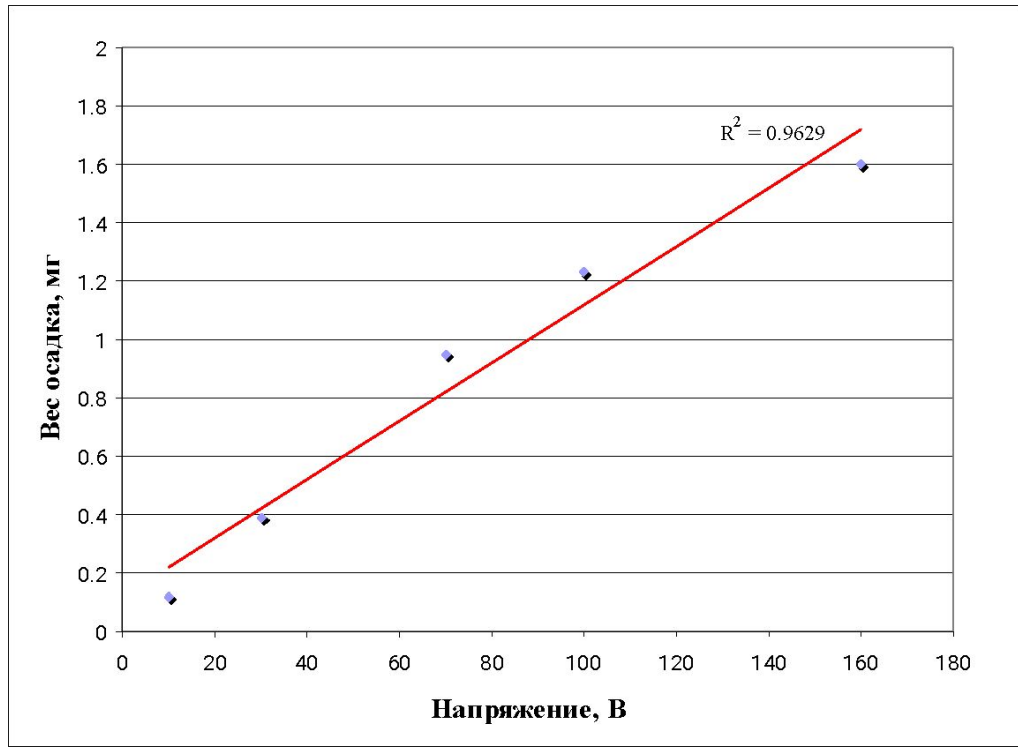
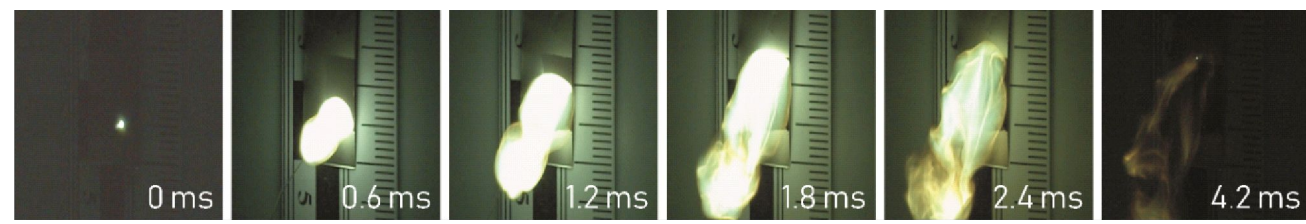


График зависимости веса осаждаемого материала  $\text{Al-CuO}_x$  от напряжения



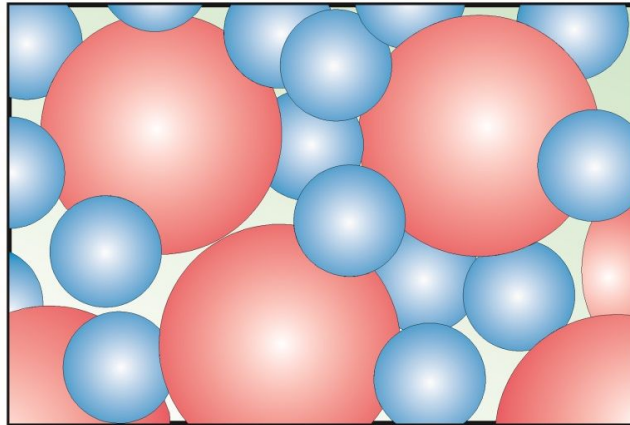
Раскадровка видеосъемки горения термитного материала  $\text{Al-CuO}_x$





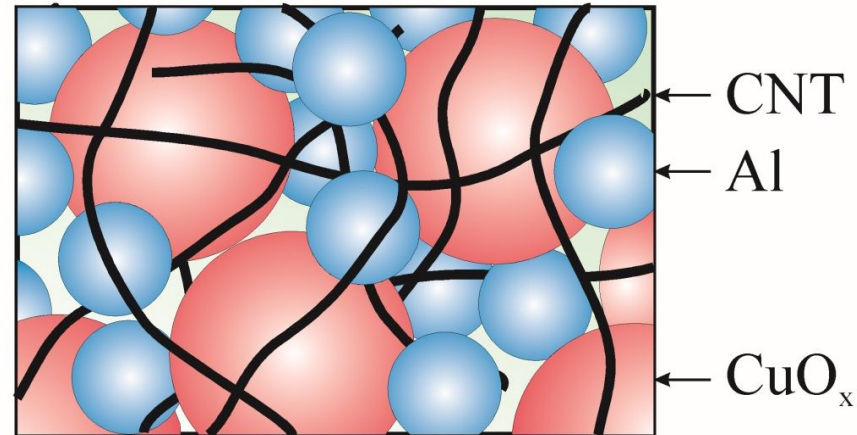
# Выбор материала $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$

$\text{Al-CuO}_x$



- Высокая скорость распространения фронта реакции;
- низкая энергия инициации.

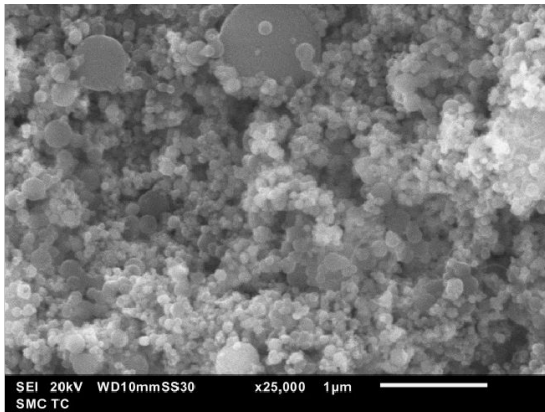
$\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$



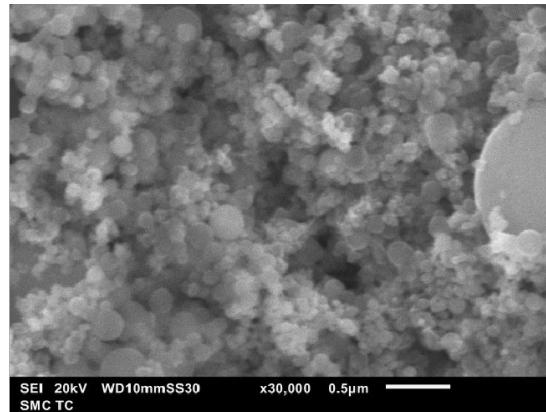
- Возможность управления условиями горения и энергии инициирования;
- обеспечивает механическую прочность осаждаемого слоя.



# Экспериментальные исследования процесса осаждения с составом $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$

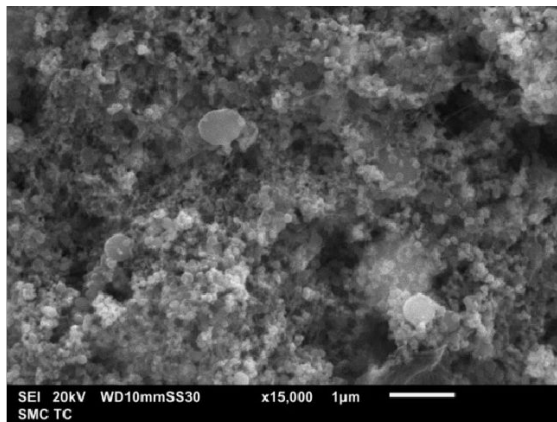


а

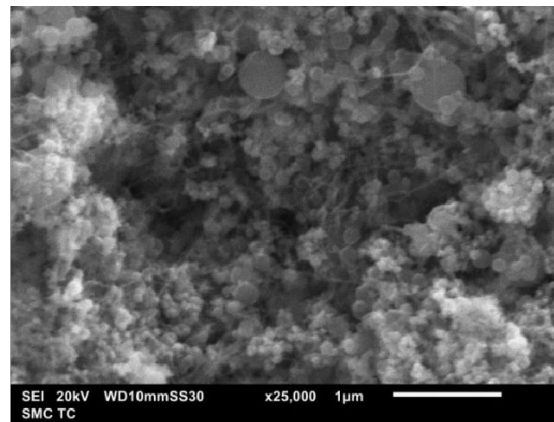


б

РЭМ-изображения образца под номером 69  $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$  в разных масштабах



а



б

РЭМ-изображения образца под номером 141  $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$  в разных масштабах



# Сравнительная таблица

## Сравнительная характеристика образцов

№ образца	Al, мг	CuO <sub>x</sub> , мг	CNT, мг	U, В	Время, с	Кол-во циклов
69	25	50	1	70	4	2
112	15	30	1	100	10	1
117	15	30	1	150	5	6
128	15	15	1	150	10	1
135	12,5	17,5	1	150	20	1
136	12,5	17,5	1	150	50	1
141	12,5	17,5	1	150	10	5



# Раскадровка горения термитного материала



0 мс



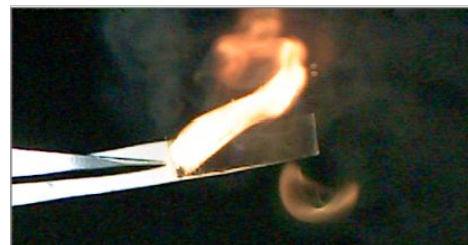
8 мс



16 мс



24 мс



32 мс

Раскадровка видеосъемки горения термитного материала  $\text{Al-CuO}_x\text{-CNT}$



# Выводы

- Разработана методика создания суспензии для электрофоретического осаждения термитных материалов;
- Исследована скорость осаждения и горения термитных материалов  $Al-CuO_x-CNT$ ;
- Спроектирована и изготовлена ячейка для электрофоретического осаждения;
- было показано, что при добавлении углеродных нанотрубок скорость распространения фронта реакции снижается (4,14 м/с без нанотрубок и 0,31 м/с при их добавлении), а энергия инициации повышается.
- Данные образцы были использованы в составе термоэлектрических устройств в качестве инициатора вторичных реакций.



Спасибо за внимание!