

### Аннотация

В выпускной научно-квалификационной работе представлены:

Сравнение разных суспензий, полученных из одинакового исходного материала, с аналогичными вспомогательными обработками, но в разных растворах, позволило выбрать наиболее эффективный подход для получения суспензий. Оказалось, что наибольшие проводимость и подвижность носителей заряда была обнаружена в пленках, полученных для суспензий на основе графена на водной основе. Более того, наименьший размер чешуек был получен электрохимическим расслоением в воде с последующей ультразвуковой обработкой. Показано что слои толщиной 15-20 нм напечатанные на подложке SiO<sub>2</sub>/Si и отожжённые при температуре 350 °С имели слоиое сопротивление 5-10 кОм/кв и подвижность носителей заряда 30-40 см<sup>2</sup>/Вс

Обнаружено, что одним из важнейших параметров, определяющих подвижность носителей в пленках, полученных из суспензий, является толщина чешуек суспензий. Подвижность носителей меняется в диапазоне ~100 – 0.05 см<sup>2</sup>/Вс при изменении толщины чешуек от 0.4 нм (монослой) до нескольких нанометров (4-5 нм), что связано, скорее всего, с качеством соединения чешуек между собой. Только монослойные или двухслойные чешуйки способны образовывать хорошее соединения в пленке за счет сил Ванн-дер-Вальса.

Свойства графена сильно зависят от смежного слоя. В качестве альтернативного варианта диэлектрических слоев предлагается использовать диэлектрические производные графена - фторографен и оксид графена. Оксид графена, имеет два недостатка, это большие токи утечки (~ 20 мА/см<sup>2</sup>) и нестабильность. У фторографена низкая диэлектрическая константа (~1.2). Поэтому поиск подходящего диэлектрика к графену является не решенной проблемой.

Показано, что проводимость суспензии, полученной с использованием обработки в NMP, уменьшается на 6-7 порядков в случае дополнительного отжига в интервале температур 60 – 200 °С. С уменьшением размера частиц суспензии от нескольких микрон до сотен нанометров требуемая температура отжига уменьшается. Так, для размера частиц < 400 нм температура перехода составляет 60 °С. Более крупные частицы (0.4 – 4 мкм) требуют для перехода к высокоомному состоянию термообработку при 120 - 160 °С. Такие высокоомные пленки демонстрируют низкие токи утечки (10<sup>-7</sup> - 10<sup>-8</sup> А/см<sup>2</sup>) и ультра низкий заряд в пленке G-NMP (-(1-4)·10<sup>10</sup> см<sup>2</sup>), относительную диэлектрическую константу 8 – 9.0 и напряженность электрического поля пробоя - (2-3)·10<sup>5</sup> В/см.

Продемонстрирован способ создания структур графен на диэлектрике, с помощью восстановления верхнего слоя. Сочетание описанных выше свойств пленок G-NMP с возможностью получать прозрачные в видимом диапазоне пленки, с возможностью формирования гетероструктур простой химической очисткой поверхности и ожидаемой гибкостью делает эти пленки перспективными для широкого спектра приложений. Среди них - диэлектрические пленки для Ван-дер-Ваальсовских гетероструктур, и структур гибкой и печатной электроники.

**Исполнитель (Ф.И.О.):** Якимчук Евгений Андреевич

**Наименование выпускной научно-квалификационной работы:** Гетероструктуры на основе графена, созданные с использованием печатных технологий

**Объект исследования:** проводящие и диэлектрические тонкие пленки, полученные из суспензий на основе графена и гетероструктуры, созданные из разработанных материалов с помощью 2D печатных технологий

**Цель:** Разработка методов получения проводящих и диэлектрических нанослоев на основе графена и создание Ван-дер-Ваальсовских гетероструктур с помощью 2D печатных технологий

**Методы исследования:** исследование вольт-амперных, транзисторных переходных, вольт-фарадных характеристик; атомно-силовая, сканирующая электронная, оптическая микроскопии; спектроскопии комбинационного рассеяния света, рентгеновская фотоэлектронная, зарядовая глубоких уровней.

**Теоретическая/практическая значимость исследования:**

1. Определены параметры для плёнок из суспензий с частицами мультиграфена обеспечивающие высокую (до  $100 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ) подвижность носителей заряда.
2. Реализован экологически безопасный метод получения графеновых чернил для печатной электроники, который позволяет получать проводящие пленки с лучшими электрическими свойствами, по сравнению с другими методами.
3. Найден способ создания суспензий с новым высококонстантным диэлектриком на основе графена (G-NMP). Определены основные характеристики плёнок, относительная диэлектрическая константа, токи утечки, напряженность пробоя, которые демонстрируют высокую перспективность использования данных плёнок в качестве диэлектрического слоя в структурах.
4. Показана возможность формирования структур графен на диэлектрике посредством восстановления верхнего слоя плёнок G-NMP.

**Новизна результатов заключается в том, что впервые теоретически/практически:**

1. Показана зависимость полевой подвижности носителей заряда в слоях из частиц мультиграфена от количества слоёв в мультиграфене, при уменьшении средней толщины частиц с монослоя до 4 нм, подвижность падает на 4 порядка.
2. Получен метод формирования графеновых суспензий с помощью электрохимического расслоения графита, не приводящего к окислению итоговых частиц и позволяющий получать большое количество частиц с толщиной до монослоя.
3. Показано химическое взаимодействие N-метилпирролидона с частицами графена, приводящее к формированию нового диэлектрического материала, исследована зависимость температуры химического взаимодействия от среднего размера частиц.
4. Показана возможность восстановления графена модифицированного N-метилпирролидоном для формирования гетероструктур графен/диэлектрик без непосредственного переноса графенового слоя.

**Степень и эффективность внедрения:** нет

**Область применения:** печатные технологии, гибкая электроника

**СПИСОК КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (8-15 шт):** графеновые суспензии, печатные технологии, химическая модификация графена, Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры, наноматериалы.