

а),б) – РЭМ снимки окисленного графена и синтезированного магнитного нанокompозита на его основе; в) – XRD рентгенограмма полученного суперпарамагнитного нанокompозита; г) – EDX диаграмма элементного состава данного нанокompозита

Из полученных методом сканирующей электронной микроскопии снимков видно, что наноматериал оксид графена имеет форму тонких пластин и слоистую структуру, с толщиной порядка несколько десятков нм, а нанокompозит магнетита на его основе представляет собой чешуйчатую структуру со сферическими наночастицами с размером  $(20 \pm 5)$  нм (рис.1а и б). Большинство пиков на рентгенограмме появляются от кристаллической фазы магнетита  $Fe_3O_4$ , в тоже время пики от оксида графена и графена можно также наблюдать в нанокompозите (рис.1в). Исходя из EDX-анализа можно сделать вывод о химическом составе синтезированного нанокompозита: O (~ 45%), C (~ 28%) и Fe (~ 27%) (рис.1г). Как видно, основными компонентами суперпарамагнитного нанокompозита являются кислород, углерод и железо с пренебрежимо малым количеством примесей, что свидетельствует о чистоте наноматериала и его потенциальной применимости в микро- и наноэлектронике и наномедицине.

**Список использованных источников:**

1. Sophie Laurent, Delphine Forge, Marc Port. Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis, Stabilization, Vectorization, Physicochemical Characterizations, and Biological Applications // Chem. Rev. 2008, 108, 2064-2110.
2. Sakir Aydogan, Kadem Meral. A new route for the synthesis of graphene oxide- $Fe_3O_4$  (GO- $Fe_3O_4$ ) nanocomposites and their schottky diode applications: Manuscript // Journal of ALLOWS AND COMPOUNDS 2013, 29513.
3. Graphene Oxide: Fundamentals and Applications: Book / John Wiley & Sons- Ayrat M. Dimiev Siegfried Eigler, 2017.

## СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

Гнисько А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Баглов А.В. – научн. сопр. НИЛ 4.11

Графитоподобный нитрид углерода был изготовлен методом пиролитического разложения тиомочевин. Этот материал в виде порошка имеет кораллоподобную структуру субмикронного масштаба с включенными пластинками толщиной 300 - 400 нм. Такая сложная структура может быть перспективной для фотокаталитических применений. пиковое значение люминесценции  $g-C_3N_4$  как правило находится в промежутке 450-500 нм. Температура получения значительно влияет на люминесцентные свойства полученного материала, увеличение температуры в пределах 400-500 °С улучшают люминесцентные свойства, а дальнейшее увеличение температуры ведёт к их ухудшению.

Развитие физико-химии графена, в частности подходов к приданию ему полупроводниковых свойств, стимулировало поиск новых слоистых соединений, которые имеют перспективы возможного практического использования. В связи с этим внимание исследователей привлёк давно известный, однако до сих пор мало изученный материал – графитоподобный нитрид углерода ( $g-C_3N_4$ ) [1]. Этот материал состоит только из C, N и небольшого количества H. В отличие от графена,  $g-C_3N_4$  является полупроводником со средней шириной запрещенной зоны и является эффективным фотокатализатором и химическим катализатором для широкого спектра реакций [2]. В данной работе приведены результаты исследования структурных и люминесцентных свойств графитоподобного нитрида углерода, полученного пиролизом тиомочевин.

Синтез  $g-C_3N_4$  был проведён по следующей методике. В чистый керамический тигель объемом 20 мл было помещено 2 г тиомочевин ( $CS(NH_2)_2$ ) чистотой не менее 98%. Тигель был герметизирован 8-слойным листком алюминиевой фольги, плотно прижатым к его открытой части, для уменьшения истечения газов из тигля в процессе пиролиза, а также для изоляции синтезированного материала от атмосферного кислорода в процессе остывания. Пиролиз проводился в муфельной печи при температурах 400, 500 и 600 °С в течение 30 мин для трёх различных образцов. Средняя скорость нагрева печи от комнатной температуры до температуры синтеза составляла 12 °С/мин. Структура полученного материала была исследована с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Так же было проведено исследование люминесцентных свойств образцов полученных при различной температуре.

Поверхность синтезированного материала шероховатая и состоит из блоков различного размера и формы (рисунок 1, а). При большем увеличении по всему объему можно обнаружить неравномерно распределенные пластинки материала толщиной 300 – 400 нм, уходящие вглубь материала, по косвенным признакам, не более чем на 20 – 25 мкм (рисунок 1, б). Остальная часть

материала представляет собой кораллоподобную структуру субмикронного масштаба. Внешний вид структуры, а также отсутствие пластинок на поверхности свидетельствует о том, что она формировалась в процессе плавления и последующего разложения тиомочевины, сопровождавшегося выделением газов, образовавших такую структуру. Формирование пластинок в объеме может быть связано с конденсацией материала на внутренней поверхности алюминиевой фольги в виде пленки толщиной 300 – 400 нм с последующим отделением и возвратом в объем тиомочевины. Проведенными дополнительно рентгеновскими и фотолюминесцентными исследованиями подтверждено формирование в приведенных условиях  $\gamma$ - $C_3N_4$ .

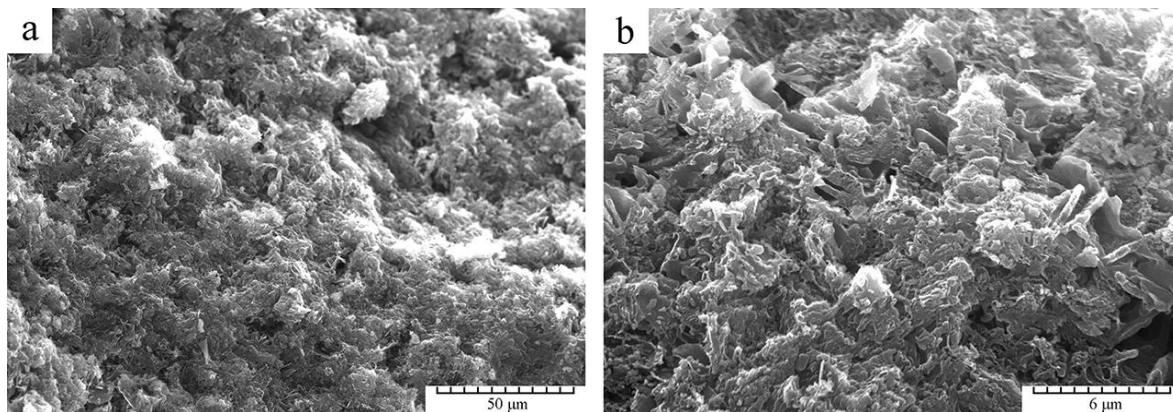


Рисунок 1 – Поверхность синтезированного при 500 °C  $\gamma$ - $C_3N_4$  при различном увеличении.

Люминесцентные свойства полученного материала были исследованы для трёх образцов, полученных при различных температурах. Спектры люминесценции представлены на рисунке 2, где образец №1 получен при 400°C, образец №2 – при 500 °C и образец №3 – при 600 °C.

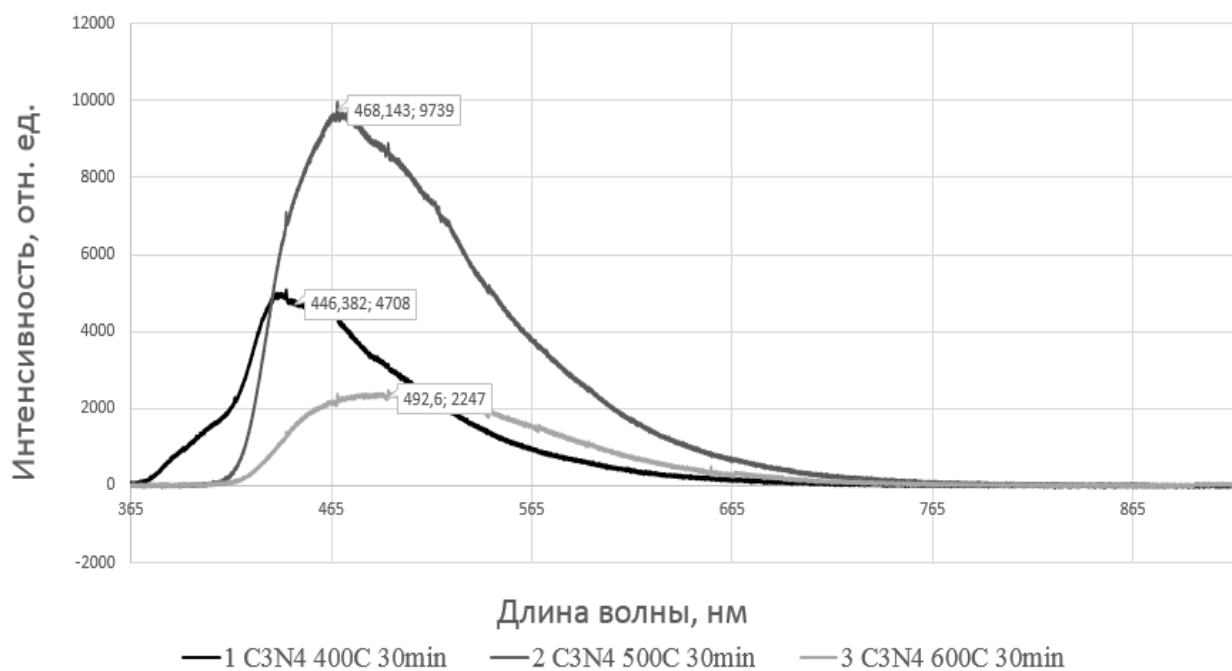


Рисунок 1 – Спектры люминесценции для трёх образцов  $\gamma$ - $C_3N_4$  полученных при различных температурах

Первый образец проявляет люминесценцию при длинах волн от 370 до 660 нм, с пиковой интенсивностью 4708 отн. ед при длине волны 446 нм. Второй образец проявляет люминесценцию при длинах волн от 400 до 700 нм, с пиковой интенсивностью 9739 отн. ед при длине волны 468 нм. Третий образец проявляет люминесценцию при длинах волн от 420 до 680 нм, с пиковой интенсивностью 2247 отн. ед при длине волны 492 нм.

Из полученных данных видно, что пиковое значение люминесценции  $\gamma$ - $C_3N_4$  как правило находится в промежутке 450-500 нм. Температура получения значительно влияет на люминесцентные свойства полученного материала, увеличение температуры в пределах 400-500

°С улучшают люминесцентные свойства, а дальнейшее увеличение температуры ведёт к их ухудшению.

Таким образом, установлено формирование материала, обладающего сложным строением – субмикронной кораллоподобной структурой с инкорпорированными пластинками. Такая структура, особенно в иммобилизованном виде, может быть перспективна для применения в фотокатализе. Люминесцентные свойства лучше всего наблюдаются для образца, полученного при 500 °С. Дальнейшее уточнение оптимальной для люминесцентных свойств температуры получения требует дополнительных исследований.

**Список использованных источников:**

1. Строюк, А.Л. Спектрально-люминесцентные свойства продуктов эксфолиации графитоподобного нитрида углерода, полученного при различных температурах / А.Л. Строюк, Я.В. Панасюк, А.Е. Раевская, С.Я. Кучмий // Теоретическая и экспериментальная химия. – 2015. – Т.51, № 4. – С. 236–243.

2. Wang, W. Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: from photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry/ Y. Wang, X. Wang, M. Antonetti // Angewandte Chemie International Edition. – 2012. – Т.51, № 1. – С. 68–89.

## **ФОРМИРОВАНИЕ МЕДНОЙ ПЛЁНКИ НА СТЕКЛЯННОЙ ПОДЛОЖКЕ С АДГЕЗИЕЙ КЛАССА 5В МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

*Рабатуев Г.Г.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Лазарук С.К. – д-р физ.-мат. наук, профессор*

Проведён поиск методов улучшения адгезии медной плёнки толщиной порядка 3 мкм к стеклу при его осаждении методом магнетронного распыления. Установлено, что адгезия класса 5В может быть достигнута при подборе материала буферного слоя. Не обнаружено влияния на адгезию подаваемой на магнетрон мощности, температуры подложки и степени очистки ионной бомбардировкой.

Плёнки легированных оксидов металлов и полупроводников, в частности легированный оловом оксид индия (indium-tin oxide, ИТО), являются наиболее распространёнными материалами для применения в качестве прозрачных электродов. Высокая стоимость и хрупкость таких покрытий, дефицит индия и требование высокой температуры подложки для осаждения качественной плёнки делают замену этих покрытий на покрытия из легкодоступных металлов актуальной задачей [1-3], и уже в лабораторных условиях получены [2] прозрачные электроды на основе наноструктурированной металлической сетки, которые превосходят по своим характеристикам (коэффициент пропускания 90,6 %, поверхностное сопротивление 6,2 Ом/кв) оксид индия-олова (10 Ом/□ при оптической прозрачности на уровне 85–87% [4]). При этом они обладают такими преимуществами, как пластичность и низкая температура формирования. Это является весьма актуальным преимуществом прозрачных металлических сеток для использования их при создании оптоэлектронных устройств нового поколения, таких как гибкие дисплеи. Медь (Cu) является самым оптимальным материалом для формирования прозрачных электродов со структурой наносетки, но она легко отслаивается от стекла и, особенно, от гибких ПЭТ-подложек. Это до сих пор не позволяет использовать сетчатые электроды из меди в массовом производстве и на больших площадях [2].

Были экспериментально исследованы методы повышения адгезии меди к стеклу. Медная плёнка толщиной 3 мкм осаждалась методом магнетронного распыления на закалённое стекло типа *Soda-lime float glass* с размером 100x50x0,55 мм. В качестве буферного слоя использовались 3 нм слои из следующих материалов: олово (Sn), молибден (Mo), обеднённые кислородом оксид ниобия и ИТО. Также проведены эксперименты с переменными мощностью, давлением аргона в вакуумной камере для компенсации внутренних напряжений структуры медной плёнки, а также с нагревом подложки до 200 °С и с повышением временем очистки подложки ионно-компенсированным пучком.

Для тестирования образцов был использован метод, основанный на нанесении сквозных поперечных надрезов (рисунок 1, а) на покрытие с последующим наклеиванием и отклеиванием клейкой ленты с фиксированной силой адгезии (*cross-cut tape test*). Класс адгезии 5В соответствует полной сохранности покрытия после отклеивания клейкой ленты, и был достигнут только при использовании буферного слоя ИТО (рисунок 1, б) без нагрева и вне зависимости от времени вакуумной очистки. В то же время на остальных образцах медная плёнка легко отслаивалась при отрыве ленты (рисунок 1, в).