

УДК 535.37, 535.34

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК НА
ОСНОВЕ О-ФЕНИЛЕНДИАМИНА, ОБЛАДАЮЩИХ МНОГОФОТОННО-
ВОЗБУЖДАЕМОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ**

Арефина И.А. (Университет ИТМО), **Ведерникова А. А.** (Университет ИТМО),
Исмагилов А.О. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., Ушакова Е.В.
(Университет ИТМО)

В работе были синтезированы и исследованы оптические характеристики углеродных точек на основе о-фенилендиамин, обладающие многофотонно возбуждаемой фотолюминесценцией. Детально были исследованы спектры поглощения и люминесценции для углеродных точек с различными дополнительными прекурсорами.

Введение. Биовизуализация является одним из самых информативных методов диагностики. Многофотонно возбуждаемая флуоресцентная визуализация привлекает все больше внимания в последние годы, поскольку в отличие от однофотонно возбуждаемой обладает большей глубиной проникновения и меньшим фотоповреждением биологических тканей. Углеродные точки (С-точки) являются прекрасными нанообъектами в качестве флуоресцентных зондов для биовизуализации, так как хорошо растворяются в воде за счет наличия -ОН и -СООН групп на их поверхности, устойчивы к фотообесцвечиванию, имеют стабильный оптический сигнал, обладают низкой цитотоксичностью и практически не подвергаются атаке со стороны иммунной системы. Более того, С-точки обладают настраиваемой полосой фотолюминесценции, которую можно изменять, используя в синтезе различные прекурсоры и растворители, варьируя температуру, время реакции и рН среды. На данный момент существует мало статей, которые описывают механизмы нелинейных процессов поглощения С-точек. Поэтому актуальной является работа, нацеленная на установление и развитие методов управления оптическими свойствами С-точек, обладающих нелинейными процессами при возбуждении фотолюминесценции.

Основная часть. В этой работе были исследованы оптические характеристики С-точек на основе о-фенилендиамин (о-фд), обладающих многофотонным возбуждением фотолюминесценции (ФЛ). Углеродные наночастицы были синтезированы сольвотермальным методом в автоклаве с тефлоновым покрытием в течение 6 часов при температуре 160°C. Коллоидный раствор С-точек очищали от крупных частиц и агрегатов с помощью фильтра с мембраной 0,22 мкм. В результате было получено 5 образцов С-точек, в том числе с различными дополнительными прекурсорами и растворителями: о-фд в воде (CD-1), о-фд с бензойной кислотой в этаноле (CD-2), о-фд с мочевиной в воде (CD-3), о-фд с тиомочевиной в воде (CD-4) и о-фд с тиомочевиной в этаноле (CD-5).

Исследование оптических характеристик полученных образцов проводилось с помощью спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu) и спектрофлуориметров FP-8200 (Jasco) и Cary Eclipse (Varian). В качестве источника многофотонного возбуждения была использована фемтосекундная лазерная система на основе регенеративного усилителя Regalus 35f1k с длиной волны возбуждения 800 нм, минимальной длительностью импульса 30 фс, максимальной энергией импульса 2,4 мДж и частотой повторения импульсов 1 кГц. Детектирование спектров люминесценции при многофотонном возбуждении производилось на спектрометре Avesta ASP-100M в диапазоне 190 – 1100 нм.

В спектрах поглощения всех образцов С-точек наблюдается широкая полоса с пиком в диапазоне 420 – 450 нм, которые обычно ассоциируются с поверхностными группами, а также полосы в области 230 – 250 нм и 270 – 290 нм, которые относятся к $\pi \rightarrow \pi^*$ и $n \rightarrow \pi^*$ оптическим переходам. Образец CD-2 обладает дополнительными пиками на длинах волн 570 и 640 нм, а CD-5 – на длине волны 360 нм. Из карт зависимости интенсивности ФЛ от длины волны

возбуждения видно, что при возбуждении на 400 нм у всех образцов наблюдается полоса ФЛ с центром на 540 нм. При возбуждении ФЛ с помощью фемтосекундного лазера с длиной волны 800 нм для всех образцов наблюдалась полоса ФЛ, соответствующая однофотонному возбуждению. Зависимость интенсивности ФЛ от мощности накачки в log-log шкале оказалось линейной с коэффициентами наклона равном или более 2, что подтверждает нелинейное поглощение в образцах.

Выводы. В работе были синтезированы и исследованы оптические характеристики углеродных точек на основе о-фенилендиамина, обладающие многофотонно возбуждаемой фотолюминесценцией. Детально были исследованы спектры поглощения и фотолюминесценции для углеродных точек с различными дополнительными прекурсорами. Исследовано влияние допирования углеродных точек гетероатомами на их излучательные параметры при многофотонном возбуждении. Полученные результаты имеют несомненный фундаментальный и прикладной интерес в области нанотехнологий и биомедицины.