

УДК 53.043

Исследование электрических свойств гибридных наноструктур на основе ВОГ и люминесцирующих квантовых нанокристаллов

Домарев С.Н. (ИТМО), Минькин С.Д. (ИТМО), Болтенко А.В. (ИТМО),

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Орлова А.О. (ИТМО)

Введение. Отклики гибридных наноструктур на основе восстановленного оксида графена (ВОГ) с люминесцирующими квантовыми нанокристаллами (НК) могут эффективно использоваться в сенсорных системах для детектирования аналитов в предельно малых концентрациях, вплоть до нескольких долей на миллиард (ppb) [1]. Благодаря столь низкому порогу детектирования аналита, такие сенсорные системы обладают значительным потенциалом для применения в роли платформ экспрессного анализа летучих органических соединений (ЛОС) в медицине [2].

Создание гибридной структуры обуславливается необходимостью получения от системы трех откликов на ввод аналита – люминесценции (НК), темновой проводимости и фотопроводимости (ВОГ). Наличие одновременно трех откликов позволяет повысить селективность, так как каждый ЛОС изменяет их в разных соотношениях.

Сенсоры данного типа являются компонентом электрической цепи (источник измеритель-подложка с гибридной наноструктурой), подключение которого возможно по разным схемам. Наиболее популярной схемой является измерение сопротивления гибридной структуры при подаче через сенсорный элемент постоянного тока [1,2], альтернативный вариант которого является подача через сенсорный элемент переменного тока заданной частоты [3]. Оба метода не лишены ряда недостатков. Так, при использовании в измерениях постоянного тока наблюдается зависимость проводимости образца от времени, т.н. дрейф базовой линии, искажающий форму пиков отклика и снижающий их потенциальную чувствительность. Дрейф базовой линии электрического отклика как проводящих слоев на основе ВОГ, так и гибридных структур на его основе определяется сразу целым рядом факторов, в числе которых изменение концентрации электронов и дырок во времени, сорбция и десорбция молекул воды на поверхности и т.д. [5,6].

Схема с использованием переменного тока является более сложной ввиду существования реактивной составляющей сопротивления у гибридных наноструктур [4], которая зависит от частоты используемого тока, температуры и влажности, что часто приводит к плохой воспроизводимости отклика. Наличие реактивной составляющей, изменяющейся при разных условиях анализа, значительно осложняет применение переменного тока при проведении измерений. Несмотря на отсутствие дрейфа у таких систем, выбор, как правило, делается в пользу применения постоянного тока. В связи с этим представляется актуальным решение задачи минимизации вклада временной зависимости проводимости образцов. Одним из возможных подходов к решению данной задачи является разработка математических моделей для описания временных зависимостей проводимости образцов и учет вклада данных зависимостей в результирующий отклик от гибридной структуры в присутствии аналита.

Основная часть. В работе сформированы гибридные многослойные структуры на основе наночешуек ВОГ и десяти типов люминесцирующих квантовых нанокристаллов, отличающихся по химическому составу, форме и размеру на основе полупроводниковых материалов CdSe и AIS. Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства образцов. Обнаружено, что временные зависимости темновой и фотопроводимости слоев из наночешуек ВОГ, которые являются основой для формирования многослойных структур ВОГ/НК, с хорошей точностью ($R^2 \geq 0.99$) описываются мультиэкспоненциальными зависимостями с тремя характерными временами. Это свидетельствует о протекании в образцах как минимум трех процессов, влияющих на форму базовой линии и определяющих возможности

детектирования аналитов с заданной точностью и чувствительностью. Характерные времена протекания первых двух процессов составляют порядка 5 и 50 секунд, соответственно они оказывают наибольшее влияние в этих временных промежутках. Третий процесс характеризуется характерным временем протекания порядка 350 секунд. Все три процесса наиболее вероятно связаны с рекомбинацией свободных носителей зарядов и дырок и с заполнением различных ловушечных состояний в наночешуйках ВОГ.

Показано, что после двух короткоживущих процессов темновая и фотопроводимость проводящих слоев на основе наночешуек ВОГ выходит на квазилинейный участок (>1000 с). Данный участок является наиболее предпочтительным для детектирования аналитов, так как на нём влияние дрейфа базовой линии возможно описывать более простой линейной зависимостью.

Обнаружено, что временные зависимости темновой и фотопроводимости гибридных структур ВОГ/НК имеют значительно более сложные зависимости. При этом для большинства вариантов НК, использованных в работе, удастся разделить вклад, вносимый ВОГ, от вклада, вносимого слоем НК.

Выводы. Сформированы образцы проводящих многослойных гибридных структур на основе ВОГ и десяти различных люминесцирующих НК. Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства образцов. Выявлено наличие трех процессов с характерными временами порядка 5, 50 и 350 секунд, приводящими к появлению временных зависимостей темновой и фотопроводимости слоев ВОГ – дрейфу базовой линии сенсорного элемента на основе структур ВОГ/НК. Выявлен квазилинейный участок на временной зависимости темновой и фотопроводимости гибридной структуры, который является наиболее удобным для детектирования сверхмалых концентраций ЛОС.

Проведен анализ временных зависимостей темновой и фотопроводимости гибридных структур ВОГ/НК. Показано, что в большинстве случаев вклад процессов, протекающих в слоях ВОГ под действием постоянного напряжения, может быть выделен из временных зависимостей темновой и фотопроводимости гибридных структур. Это позволяет провести анализ влияния НК на электрические свойства ВОГ в составе структур и оптимизировать условия регистрации электрического отклика от аналита в случае гибридных структур.

Список использованных источников:

1. Some S. et al. Highly Sensitive and Selective Gas Sensor Using Hydrophilic and Hydrophobic Graphenes // *Sci Rep.* – 2013. – № 1(3). – p. 1868.
2. Nadekar B. et al. Biphenyl-rGO composite room temperature gas sensor for enhanced amine sensing // *Chemosphere.* – 2024. – №351. – p. 141244.
3. Liu Y. et al. An AC sensing scheme for minimal baseline drift and fast recovery on graphene FET gas sensor // 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). Kaohsiung: IEEE. – 2017. – p. 230–233.
4. Zou W., Wu C., Zhao W. Humidity-Sensing Performance of TiO₂/RGO and α -Fe₂O₃/RGO Composites // *Sensors.* – 2025. – № 3(25). – p. 691.
5. Di S., Falasconi M. Drift Correction Methods for Gas Chemical Sensors in Artificial Olfaction Systems: Techniques and Challenges // *Advances in Chemical Sensors* / ред. Wang W. – InTech, – 2012.
6. Schober S.A. et al. Towards Drift Modeling of Graphene-Based Gas Sensors Using Stochastic Simulation Techniques // 2020 IEEE SENSORS. Rotterdam, Netherlands: IEEE. – 2020. – p. 1–4.