

влажность добавками / С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Агропанорама. – 2020. – № 1 (137). – С. 20–23.

7. Барайшук, С. М. Снижение сезонных колебаний сопротивления растеканию тока заземляющих устройств применением смесей для стабилизации влажности грунта / С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. И. Кахоцкий // Эпоха науки. – 2020. – № 24 (2020). – С. 87–93.

8. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажность добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 28–33.

УДК 538.911

## **РАЗРАБОТКА ГИБКИХ БИОСЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**В. К. Долгий**, канд. физ.-мат. наук, доцент  
**С. М. Барайшук**, канд. физ.-мат. наук, доцент  
**А. А. Шевченко**, канд. физ.-мат. наук, доцент  
УО «Белорусский государственный аграрный  
технический университет»,  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В нашей работе мы разрабатываем структуры на основе тонких пленок различных соединений, осажденных на гибкие подложки, для дальнейшего применения в качестве чувствительных слоев сенсорных элементов с возможностью их интеграции в упаковку продуктов питания.

В настоящее время в передовых странах мира высокими темпами развивается индустрия сенсорной техники. Активность работ в данной наукоемкой области прогрессивных технологий во многом обеспечивается за счет синтеза новых материалов с высокими физико-механическими, электро- и теплофизическими свойствами. Более того, проводится разработка материалов, позволяющих выполнять интеграцию сенсорных структур с микроэлектронными и микромеханическими системами на физическом и технологическом уровне. Со временем разработка и исследование таких сенсорных структур может стать одним из ведущих направлений в создании новейших технологий мониторинга и диагностики объемных и глобальных систем [1–2]. При этом в качестве объектов, подвергаемых контролю с помощью многофункциональных и многопараметровых сенсорных структур, выступают подсистемы природной, биологической, технологической среды.

Пленки фторзамещенного фталоцианина меди толщиной 40 нм были получены термическим распылением в вакууме порошкообразного

исходного продукта с последующим осаждением из газовой фазы подложки, находящейся при комнатной температуре. Толщина пленок контролировалась в процессе напыления кварцевым резонатором. Для измерения электрофизических свойств использовались поликоробовые подложки, снабженные системой встречно-штыревых электродов; для оптических измерений – стеклянные подложки.

Фторзамещенный фталоцианин меди (CuPcF) является представителем довольно редкого класса органических полупроводников n-типа. Молекула CuPcF (рис. 1) представляет собой молекулу фталоцианина меди, в которой все 16 периферийных атомов водорода замещены атомами фтора.

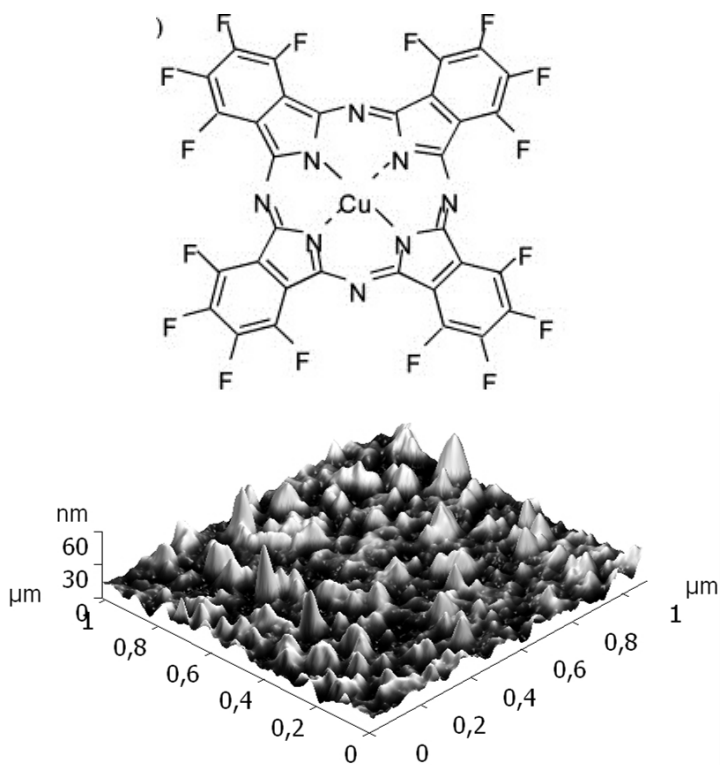


Рис. 1. Молекула фторзамещенного фталоцианина меди и атомно-силовое изображение поверхности соответствующей пленки

Атомно-силовое изображение поверхности пленки фторзамещенного фталоцианина меди, измеренное в режиме прерывистого контакта, показывает, что полученные пленки являются поликристаллическими с характерным размером зерна около 30 нм, т. е. относятся к классу наноструктурных материалов, что само по себе может вызывать пространственную автолокализацию электронов и, следовательно, приводить к реализации в этих пленках прыжкового механизма проводимости, обусловленного переносом электронов по локализованным состояниям [3].

Измерение проводимости осуществлялось методом вольтметра-амперметра и производилось в вакууме. Для измерения температурных зависимостей проводимости использовался метод циклической термодесорбции. Анализ полученных методом циклической термодесорбции результатов проводился с учетом наличия примесной проводимости в исследуемых пленках, обусловленной состояниями адсорбированного из атмосферы кислорода.

По результатам фотоколориметрии стандартных растворов был построен график (рис. 2), по которому была получена зависимость оптической плотности от содержания аммиака.

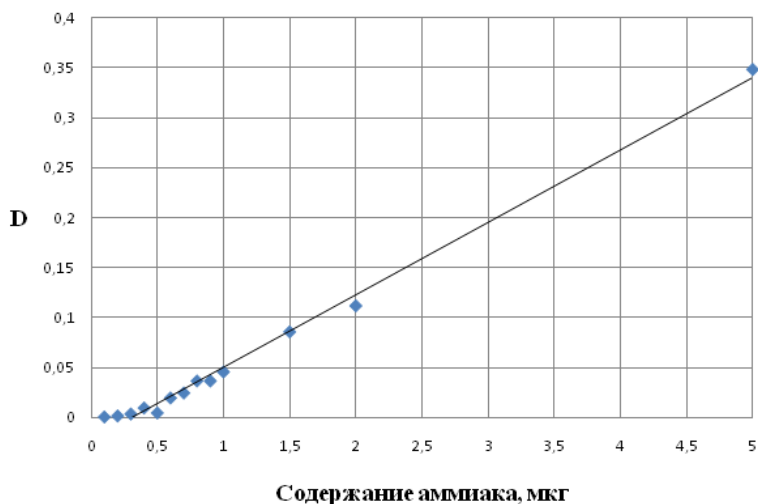


Рис. 2. Зависимость оптической плотности от содержания аммиака

Проводимость материалов зависит от температуры, также температура оказывает влияние на динамику процессов адсорбции (десорбции). Поэтому измерения были произведены при разных температурах, но с одинаковыми концентрациями аммиака для выявления температуры с наибольшей чувствительностью к сорбции аммиака (рис. 3) [4–5].

Из графиков видно, что наибольший отклик достигается при температуре 30 °С и с ростом температуры уменьшается. Измерения не производились при температуре выше 150 °С во избежание деградации пленок. Уменьшение отклика с ростом температуры является достоинством, так как другие газовые сенсоры для определения концентрации аммиака используются при рабочих температурах более 200 °С.

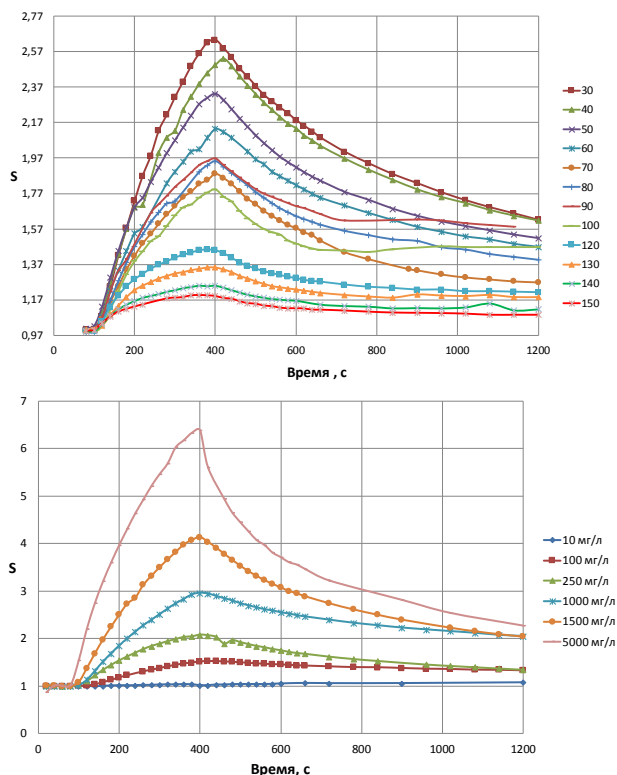


Рис. 3. Температурные и концентрационные зависимости отклика на аммиак

Под чувствительностью  $S$  здесь подразумевается отношение сопротивления пленки в присутствии аммиака к сопротивлению пленки в отсутствие аммиака. Далее производились исследования на выявление изменения отклика пленок в зависимости от концентрации аммиака. Измерения производились при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  для уменьшения влияния колебания температур окружающей среды. Графики на рис. 3 показывают, что с ростом концентрации аммиака возрастает отклик, поэтому, проведя большее количество измерений при разных концентрациях аммиака, можно получить зависимость максимального отклика пленки от концентрации аммиака (рис. 4).

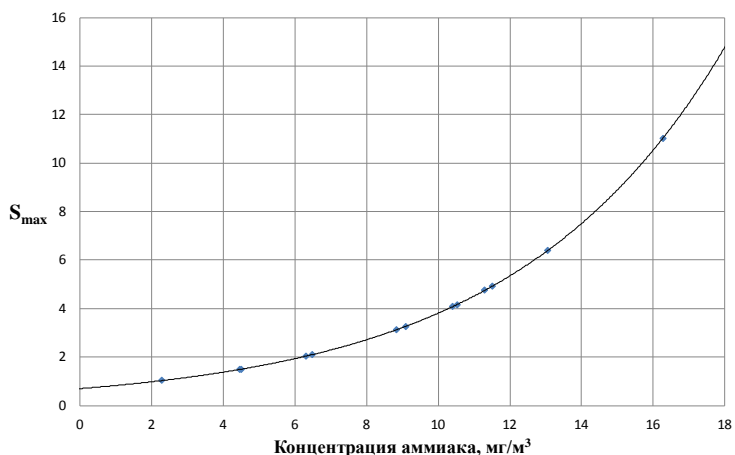


Рис. 4. Зависимость отклика сенсора от концентрации аммиака: точки – экспериментальные данные; сплошная линия – теоретический расчет

Проведены расчеты зависимости адсорбционно-резистивного отклика от относительной концентрации адсорбированных молекул аммиака при двух значениях относительной концентрации адсорбированных молекул кислорода. Результаты расчетов показывают, что адсорбция аммиака увеличивает электросопротивление пленок  $\text{CuPcF}_{16}$ , причем увеличение концентрации адсорбированного аммиака увеличивает адсорбционно-резистивный отклик. Кроме того, этот отклик растет при уменьшении концентрации адсорбированного кислорода, которая, в свою очередь, уменьшается при росте температуры пленки.

Для установления связи между концентрацией молекул регистрируемого газа в окружающей среде и концентрацией адсорбированных молекул этого газа была использована изотерма адсорбции по Генри. Теоретическая модель влияния адсорбированных газовых молекул на электропроводность пленок органических полупроводников с прыжковым механизмом проводимости позволила интерпретировать экспериментальные зависимости проводимости наноструктурированных пленок фторзамещенного фталоцианина меди от концентрации и времени воздействия аммиака в окружающей воздушной среде. Это дает возможность улучшения и оптимизации характеристик сенсоров аммиака и кислорода в воздухе, что может быть использовано Министерством сельского хозяйства и продовольствия.

**Заключение.** Результаты работы открывают новый путь получения пленок с управляемыми сенсорными свойствами, а разработанные при этом системы могут найти применение при создании сенсорных микро- и наносистем для контроля газовой среды и в качестве элементов упаковки, позволяющих контролировать сохранность продуктов, а также в других отраслях народного хозяйства Беларуси. Работа выполнена при поддержке НИОКТР 20211250.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балышева, О. Л. Разработка информационно-справочной системы компонентов на ПАВ / О. Л. Балышева, Ю. Г. Смирнов, Л. П. Коновалова // Микросистемная техника. – 2003. – № 10. – С. 6–9.
2. Ализов, Я. И. Зеленая полоса люминесценции пленок оксида цинка, легированных медью в процессе термической диффузии / Я. И. Ализов, М. В. Чукичев, В. А. Никитенко // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 1. – С. 34–38.
3. Барайшук, С. М. Исследование влияния условий формирования на микроструктуру молибденовых тонкопленочных тыльных контактов, используемых для создания биосенсоров / С. М. Барайшук, А. И. Туравец, В. К. Долгий // Эпоха науки. – 2020. – № 23. – С. 181–186.
4. Русак, Л. Д. Адсорбционно-резистивный эффект при воздействии аммиака на пленки фторзамещенного фталоцианина меди / Л. Д. Русак, А. Е. Почтенный, А. В. Мисевич // Тр. БГТУ. – 2016. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 86–90.
5. Почтенный, А. Е. Адсорбционно-резистивный сенсор аммиака в воздухе на основе наноструктурированных пленок фторзамещенного фталоцианина меди / А. Е. Почтенный, Л. Д. Русак, А. В. Мисевич // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. ст. / Ин-т тепло- и массообмена НАНБ; под ред. П. А. Витязя [и др.]. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2016. – С. 342–348.