

Пленки из углеродных нанотрубок проводят электричество и пропускают видимый свет — идеальное сочетание свойств для прозрачных электродов. Эти ключевые элементы солнечных батарей, сенсорных экранов и ряда других устройств раньше делали из хрупкого и неэкологичного материала — оксида индия-олова. Теперь же лучшее сочетание свойств — проводимости, прозрачности и вдобавок гибкости — обеспечивают углеродные нанотрубки, легированные (дополненные) небольшим количеством других веществ.

«Легирование имеет принципиальное значение. Доступные сегодня технологии не позволяют изготовить углеродные нанотрубки такого качества, чтобы они имели необходимые характеристики в чистом виде. Зато можно отрегулировать свойства путем добавления примесей. Выбор той или иной легирующей добавки продиктован компромиссом между повышением проводимости, прозрачностью пленки и устойчивостью эффекта. Прежде тонкие пленки нанотрубок могли удовлетворить лишь двум критериям из трех. А сейчас нам удалось получить все три в одном материале!» — рассказывает научный руководитель исследования, профессор Центра фотоники и фотонных технологий Сколтеха Альберт Насибулин.

Пример распространенной примеси для легирования нанотрубок — тетрахлороаурат водорода. Он обеспечивает лучшую на сегодняшний день электропроводность пленок из углеродных нанотрубок — и неплохую прозрачность, но эффект сохраняется сравнительно недолго. Бромид меди и другие галогениды металлов позволяют добиться хорошего сочетания устойчивости и проводимости, но ценой прозрачности. Подобные дилеммы характерны для выбора легирующих примесей нанотрубок.

«Мы нашли вариант, который хорош во всех отношениях. Это газообразный диоксид азота — его еще называют „лисий хвост“, из-за ярко-оранжевого цвета. Вообще говоря, мы исследовали другую, нестабильную и нежелательную модификацию углеродных нанотрубок, которую этот газ вызывает при значительно более низких температурах. Но получилось так, что мы нашли другой диапазон температур, в котором происходят очень стабильные модификации. Поскольку наша примесь — газ, процесс легирования быстрый, масштабируемый и безотходный. Диоксид азота легко интегрировать в существующие технологические цепочки синтеза, а излишки этого реагента удаляются из смеси, потому что при охлаждении до 20 °C он сжижается», — добавил другой автор исследования, старший преподаватель Центра фотоники и фотонных технологий Дмитрий Красников.

Согласно результатам исследования, эффект от предлагаемой модификации нанотрубок диоксидом азота за короткое время снижается в полтора раза, что

незначительно, после чего стабилизируется. А у нынешнего материала-чемпиона — тетрахлороаурата — эффект снижается в три раза, причем процесс деградации растянут на долгий промежуток времени. Эффект обоих химиков на электропроводность сопоставим и существенно превосходит другие известные примеси. Достигается хорошая прозрачность: будучи газом, диоксид азота, судя по всему, не садится на пленку несколькими слоями, а останавливается на молекулярной толщине покрытия. Для сравнения: примеси — твердые вещества, в том числе тетрахлораурат, могут осаждаться на ранее осевшие частицы того же состава.

Научная группа ожидает, что прозрачные электроды из допированных диоксидом азота пленок углеродных нанотрубок скоро найдут применение в фотовольтаике, сенсорных дисплеях и других интерактивных поверхностях не только в гаджетах, но и в интерьерах домов и автомобилей, в общественных местах. Кроме того, такие электроды будут биосовместимы, поэтому их можно задействовать и в имплантируемых устройствах. Оптические элементы вроде недавно изготовленной в Сколтехе вариофокальной зонной пластиинки Френеля, которая поможет использовать терагерцовое излучение в связи 6G и устройствах для досмотра и медицинской визуализации без рентгена, тоже выиграют от улучшения характеристик нанотрубочных пленок. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда, а его выводы представлены в журнале *Carbon*.