

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЗОНДОВОЙ ЛИТОГРАФИИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В последнее время разработчики новых элементов электроники с улучшенными характеристиками все чаще обращают внимание не только на традиционно используемый кремний, но и на альтернативные материалы, в частности, пленки графита толщиной в несколько атомных слоев, графен и углеродные нанотрубки. Эти материалы характеризуются низким содержанием структурных дефектов и высокой подвижностью носителей заряда, что позволит повысить быстродействие и снизить энергопотребление разрабатываемых на их основе устройств. С использованием таких материалов уже созданы образцы транзисторов, полевых эмиттеров, высокочувствительных сенсорных элементов [1–3].

Для успешного развития углеродной наноэлектроники требуется разработка прецизионных методов формирования углеродных наноструктур. К наиболее перспективному методу можно отнести сканирующую зондовую микроскопию (СЗМ), которая уже зарекомендовала себя как один из важнейших инструментов нанотехнологий. С помощью СЗМ возможно не только изучение поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением, но и ее модификация (зондовая литография) [4].

Ниже рассматриваются экспериментальные данные по локальному анодному окислению (ЛАО) углеродных слоев с помощью зондов сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов (АСМ).

В экспериментах использовался сканирующий зондовый микроскоп "ФемтоСкан" (ООО НПП "Центр перспективных технологий"), кантилеверы с проводящим покрытием IrC_{11} (НИИФП им. Ф.В.Лукина), высокоориентированный пиролитический графит (ООО "Атомграф АГ", <http://www.nanoscopy.net/rus/products/accessories/hopg.shtml>). Иглы для сканирующей туннельной микроскопии изготавливались из платиново-иридиевой проволоки. Зондовые изображения обрабатывались с помощью программного обеспечения "ФемтоСкан Онлайн".

ЛАО поверхности графита проводилось с помощью иглы сканирующего туннельного микроскопа при подаче разности потенциалов величиной от 2 до 9 В между зондом и поверхностью графита. При ЛАО графита зонд является катодом, поверхность графита – анодом. В роли электролита выступает адсорбированная из атмосферы пленка воды, причем ее молекулы непосредственно участвуют в процессе окисления графита. В работе [5] было показано, что добавление паров воды при модификации поверхности графита в условиях вакуума приводит к уменьшению напряжения, необходимого для начала травления поверхности графита, более чем в три раза. На рис.1а представлена зависимость необходимого для окисления одного углеродного слоя порогового напряжения от относительной влажности воздуха. Видно, что такое напряжение резко возрастает при уменьшении относительной влажности воздуха. Другие ключевые факторы, определяющие скорость протекания ЛАО – форма и материал иглы. При полном окислении графита происходит образование газообразных оксидов углерода CO и CO_2 , а на поверхности образца возникают ямки травления (рис.1б).

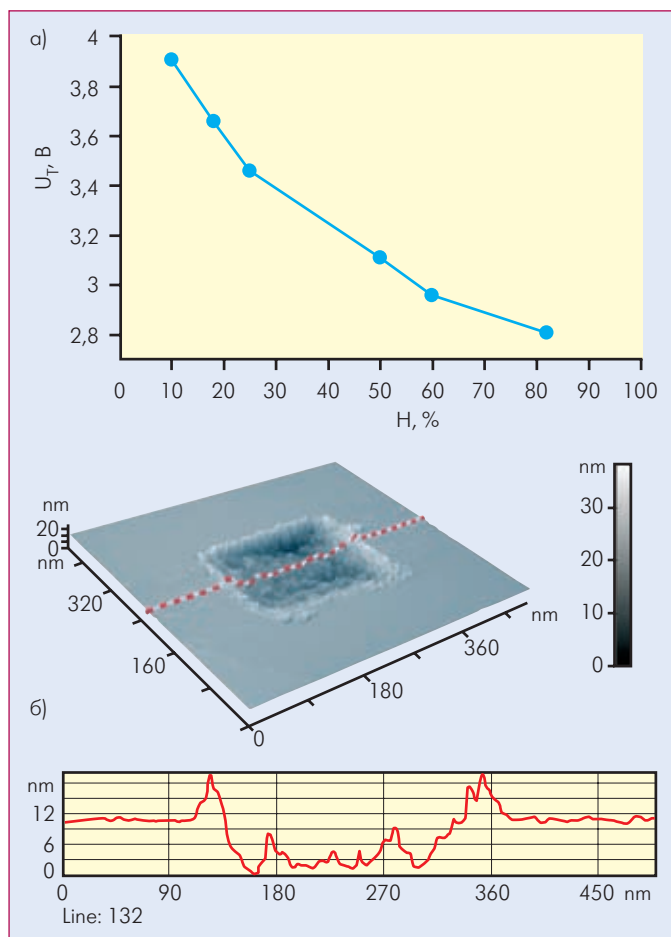


Рис.1 а) Зависимость порогового напряжения от относительной влажности для полного окисления графита. б) Вверху – изображение образованной при окислении полости на поверхности графита, внизу – профиль поверхности, указанный на изображении

При увеличении расстояния между электродами может происходить частичное окисление графита с образованием выпуклых областей (рис.2а), причем окисление начинается, когда напряжение между зондом и образцом достигает порогового значения, которое, как и в случае полного окисления графита, зависит от относительной влажности воздуха (рис.2б). Так, при увеличении относительной влажности воздуха с 25% до 75% пороговое напряжение снижается с 6 В до 3,5 В. При этом образуются выпуклые области с высотой до 4 нм. Поверхности окисленных областей характеризуется высоким коэффициентом трения, превосходящим на порядок коэффициент трения для поверхности немодифицированного графита.

Можно предположить, что выпуклые участки на поверхности графита, возникающие при окислении, обладают структурой оксида графита. Вначале в верхних слоях графита образуются единичные вакансии, через которые под действие электрического поля с поверхности в межслоевое пространство происходит диффузия молекул воды. Интеркаляция воды приводит к локальному росту расстояний между слоями в графите

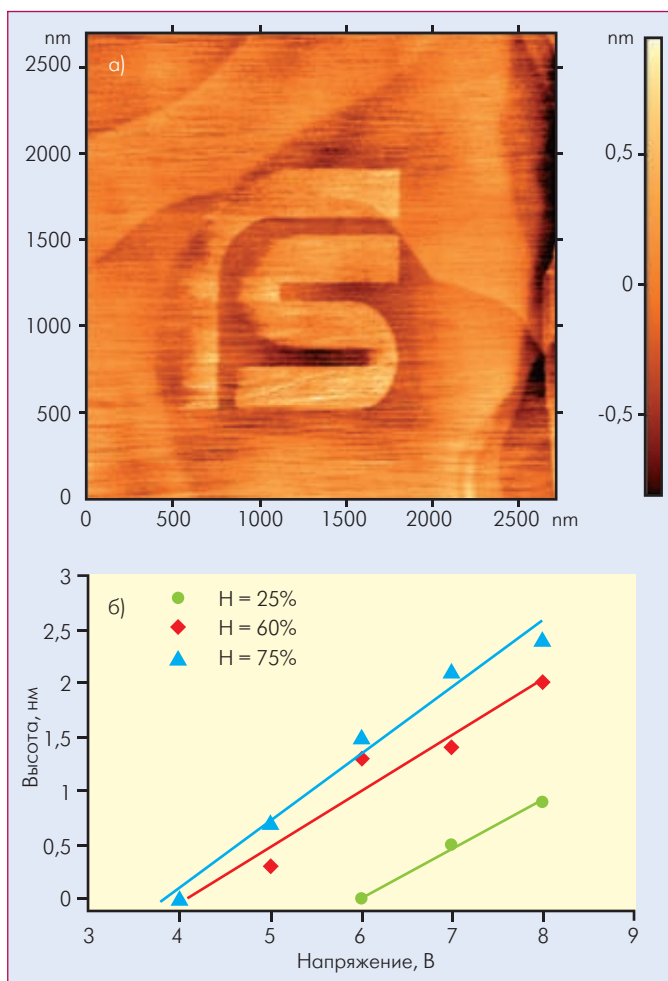


Рис.2 а) Литографический рисунок, выполненный методом частичного ЛАО графита. б) Зависимость высоты окисленных областей от напряжения при различных значениях относительной влажности воздуха (ЛАО проводилось с помощью зонда АСМ)

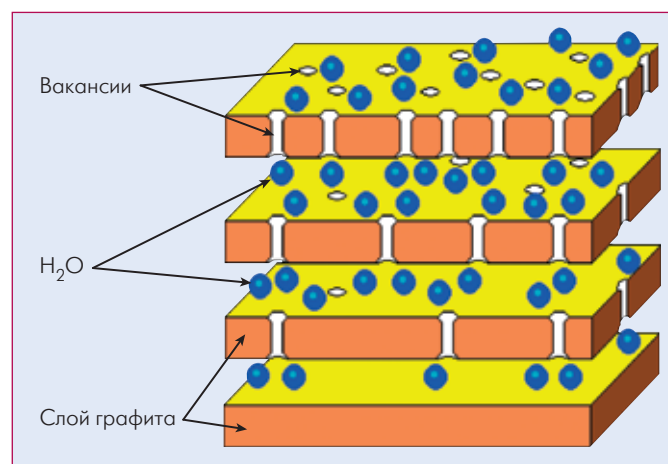


Рис.3 Схематичное изображение структуры частично окисленного графита, образующегося при ЛАО

и позволяет объяснить появление рельефа на поверхности.

Схема предполагаемой структуры частично окисленных областей графита показана на рис.3. Такие области обладают пониженной проводимостью. Известно, что для объемных об-



разцов оксида графита с различным содержанием кислорода удельное сопротивление составляет 10^3 – 10^7 Ом*см [6].

Суммируя результаты работы, можно сделать следующие выводы:

1. Основное влияние на кинетику ЛАО графита оказывают: величина напряжения между зондом и образцом, концентрация водяных паров в атмосфере, форма и материал иглы.

2. ЛАО можно осуществлять в двух режимах: полного и частичного окисления графита. В первом случае образуются полости в углеродных слоях. Во втором – формируется слой оксида графита.

3. Метод ЛАО можно использовать для формирования наноструктур из углеродных материалов, причем пленка оксида графита может служить изолятором в устройствах нанoeлектроники на основе таких материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen Z., Lin Y.-M., Rooks M.J., Avouris P.** Graphene nanoribbon electronics. – *Physica E*, 2007, V. 40, p. 228–232.
2. **Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., et al.** Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. – *Nat. Mater.*, 2007, V. 6, p. 652–655.
3. **Елецкий А.В.** Перспективы применения углеродных нанотрубок. – *Российские нанотехнологии*, 2007, т. 2, № 5–6, с. 6–17.
4. **Неволин В.К.** Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
5. **Kondo S., Lutwyche M., Wada Y.** Nanofabrication of layered materials with the scanning tunneling microscope. – *Surface Science*, 1994, V. 75, p. 39–44.
6. **Chung D.D.L.** Review graphite. – *Journal of Materials Science*, 2002, V. 37, p. 1475–1489.