

Рост легированных азотом углеродных нанотрубок для создания энергоэффективных сенсоров

Хомленко Д.Н.¹, Горбунов Н.Г.¹, Шиков А.З.¹, Ильин О.И.¹

khomlenko@sfedu.ru

¹ ИНЭП ЮФУ, Таганрог, Россия

За последние годы энергоэффективные деформационные сенсоры стали востребованы в носимой электронике, системах мониторинга и устройствах Интернета вещей благодаря способности регистрировать слабые механические воздействия при низком энергопотреблении [1]. Перспективной основой для таких сенсоров являются легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ), в которых за счет нарушения локальной симметрии и формирования азотсодержащих дефектов может проявляться аномальный пьезоэлектрический эффект [2, 3]. Целью работы являлось выращивание методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) массивов N-УНТ с общей концентрацией азота не менее 8 ат.%, необходимой для создания энергоэффективных сенсоров с аномальным пьезоэлектрическим эффектом [2, 3].

На основе ранее полученных результатов были выбраны режимы PECVD, обеспечивающие формирование массивов N-УНТ с повышенным содержанием азота [2, 3]. На кремниевых подложках с подслоем Mo и каталитическим слоем Ni были выращены четыре образца C1-C4. Для образцов C1-C3 температура роста составляла 550 °C, для C4 — 500 °C. На стадии роста изменялись соотношения потоков газов $C_2H_2:NH_3$, которые составили для C1-C4 1:10, 1:4, 1:9 и 1:3 соответственно. Установлено, что варьирование температуры и газового состава позволяет получать массивы N-УНТ с общей концентрацией азота 8,4; 9,7; 9,9 и 12,6 ат.% и концентрацией пиррольного азота 1,3; 1,5; 1,6 и 2,2 ат.% для C1-C4 соответственно. При этом величина пьезоэлектрического коэффициента d_{33} монотонно возрастает и составляет 64,9; 71,5; 84,2 и 90,8 пм/В.

Показано, что уменьшение температуры роста до 500 °C и переход к более углеродосодержащему режиму $C_2H_2:NH_3=1:3$ способствуют увеличению общей и пиррольной концентрации азота. Вероятно, это связано с повышением дефектности структуры N-УНТ, за счёт более активного включения в неё атомов азота. Геометрические параметры массивов изменялись нелинейно: длина N-УНТ для C1-C4 составила 1,2; 0,9; 1,2 и 2,5 мкм, а диаметр — 70,2; 61,8; 75,2 и 55,5 нм. Нелинейное изменение длины и диаметра, вероятно, обусловлено тем, что при варьировании температуры роста и соотношения $C_2H_2:NH_3$ одновременно изменяются скорость поступления углерода к каталитическим центрам, интенсивность аммиачного травления стенок УНТ и состояние каталитических частиц, определяющее кинетику роста массива.

Изменение температуры роста и соотношения потоков газов позволило получить N-УНТ с содержанием азота 8,4–12,6 ат.% и пиррольного азота 1,3–2,2 ат.%, необходимым для проявления в них пьезоэлектрического эффекта [2, 3]. Установлено, что с ростом концентрации азота, в частности пиррольного, увеличивается коэффициент d_{33} .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-79-10302 в Южном федеральном университете.

Ссылки

1. M. Chandran, M. Veerapandian, B. Dhanasekaran, S. Govindaraju, and K. Yun, Mater. Sci. Eng. R Rep. (2025) **165**, 101015.
2. M.V. Il'ina, O.I. Soboleva, M.R. Polyvianova, N.N. Rudyk, I.V. Pankov, D.N. Khomlenko, O.I. Il'in, Carbon Lett. (2025) **35**, 2307.
3. M.V. Il'ina, N.N. Rudyk, O.I. Soboleva, M.R. Polyvianova, S.A. Khubezhov, and O.I. Il'in, Tech. Phys. (2024) **69**, 1979.