**Исследование механических свойств наноструктурированных пористых стержней кремния методами атомно-силовой микроскопии**

***А.Ю. Гагарина, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников***

*Аспирант, 3 год обучения*

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: gagarina.au@gmail.com*

Иерархический наноструктурированный пористый кремний (ПК) является перспективным материалом анодов литий-ионных аккумуляторов нового поколения, поскольку сочетает в себе высокую удельную емкость по литию (4200 мАч/г) [1], характерную для кристаллического кремния, более высокие механические характеристики, которыми обладают оксид кремния и аморфный кремний [2-3], что позволяет замедлить процессы механической деградации электрода в процессе циклирования при сохранении высокой разрядной емкости. Структуры на основе ПК обладают высокой удельной площадью поверхности, что приводит к увеличению площади контакта наноструктуры с электролитом и низким начальной кулоновской эффективности и объемной плотности энергии. При этом уменьшение размеров материала анода приводит к увеличению скоростных характеристик [4]. Избежать этих недостатков возможно при рациональном дизайне структуры анода, например, при переходе от наночастиц ПК к наностержням. Так, морфология кремниевых пористых наностержней обеспечивает боковое расширение в процессе интеркаляции ионов лития за счет свободного пространства между стержнями, что приводит к снижению деградации структуры за счет растрескивания. Также для наностержней реализуется транспорт ионов лития в поперечном направлении в процессе заряда/разряда. Но куда более важным достоинством таких структур является возможность их функционализации металлами и неметаллами, в результате которой улучшаются стабильность и циклируемость анода [5].

В рамках работы методом модифицированного металл-стимулированного электрохимического травления монокристаллического кремния [6] были сформированы наноструктурированные пористые кремниевые стержни (НПКС). Исследование механических свойств НПКС осуществлялось методами атомно-силовой микроскопии в режиме HybriD Mode (сканирующая прыжковая микроскопия) с одновременной регистрацией топографии. Были получены данные о величине модуля упругости, деформации и жесткости по всей длине одиночного стержня.

**Литература**

1. Михайлюкова М. Ю., Федорин Е. А., Меньшова И. И. Кремнийсодержащие анодные материалы для литий-ионных аккумуляторов //Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34 (3) С. 62-64.

2. Grushina, A. A., Lozhkina, D. A., Krasilin, A. A., Rumyantsev, A. M., Astrova, E. V.Electrochemical performance of LIB anodes based on silicon monoxide: the effect of disproportionation and treatment in HF // Technical Physics Letters. 2023. Vol. 49(1). P. S11-S14.

Jung, H., Park, M., Yoon, Y. G., Kim, G. B., Joo, S. K. Amorphous silicon anode for lithium-ion rechargeable batteries //Journal of power sources. 2003. Vol. 115(2). P. 346-351.

4. Ding, N., Xu, J., Yao, Y. X., Wegner, G., Fang, X., Chen, C. H., Lieberwirth, Determination of the diffusion coefficient of lithium ions in nano-Si //Solid State Ionics. 2009. Vol. 180(2-3). P. 222-225.

5. Yoo J.-K., Kim J., Lee H., Choi J., Choi M.-J., Min Sim D., Jung Y.S., Kang K. Porous silicon nanowires for lithium rechargeable batteries //Nanotechnology. 2013. Vol. 24(42) P. 424008.

6. Gagarina, A. Y., Bogoslovskaya, L. S., Spivak, Y. M., Novikova, K. N., Kuznetsov, A., & Moshnikov, V. A. Synthesis of arrays nanostructured porous silicon wires in electron conductivity type silicon with crystallographic orientation (111) //Tech. Phys. 2023. Vol. 68. P. 254.