

## Терагерцовая и инфракрасная спектроскопия бактериальных нанофиламентов

З.В. Гагкаева<sup>1</sup>, Е.С. Жукова<sup>1,2</sup>, К.А. Мотовилов<sup>1</sup>, К.В. Сидорук<sup>3</sup>, А.С. Тобохова<sup>1</sup>,  
А.К. Гребенко<sup>1</sup>, Л.С.Кадыров<sup>1,2</sup>, П.И. Барзилович<sup>1</sup>, В. Гриненко<sup>4</sup>, М. Дрессель<sup>5</sup>,  
В.И. Торгашев<sup>6</sup>, Б.П. Горшунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

<sup>3</sup> Государственный научно-исследовательский институт генетики и селекции  
промышленных микроорганизмов

<sup>4</sup> Institute for Metallic Materials, IFW Dresden

<sup>5</sup> 1.Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

<sup>6</sup> Физический факультет Южного Федерального Университета

Последние несколько лет внимание ученых все чаще привлекают бактерии, проводящие электрический ток. Электрогенные бактерии, такие как, например, *Shewanella oneidensis* или *Geobacter sulfurreducens*, представляют собой интерес как для практического применения (системы очистки воды, синтез квантовых точек и т.д. [1], [2]), так и для фундаментальных исследований механизмов зарядового транспорта в искусственных и естественных биологических системах. Известно, что наиболее активно изучаемые в настоящее время электрогенные бактерии *Geobacter sulfurreducens* и *Shewanella oneidensis* осуществляют перенос электронов на внешний субстрат-окислитель с помощью нитевидных структур, нанофиламентов, имеющих как чисто белковую, так и белково-липидную природу [1]. Однако механизм проводимости внутри этих структур все еще неясен, и выдвигаемые некоторыми коллективами экспериментаторов предположения о наличии в нанофиламентах зонной органометаллической проводимости [2] пока дискуссионны и вызывают критику со стороны специалистов в области транспортных измерений твердых тел [3].

Настоящая работа стала одним из компонентов масштабного проекта по изучению зарядового транспорта в различных видах внеклеточных бактериальных филаментов. В качестве объектов рассмотрения были выбраны бактерии *Shewanella oneidensis* MR-1, а точнее их лиофилизированные пилы - выросты периплазматической мембраны, насыщенной мультигемовыми белками-цитохромами [4]. Также для сравнения проводились исследования проводимости белка цитохрома с, схожего по химическому составу с мультигемовыми цитохромами пилей, и бычьего сывороточного альбумина (BSA), белка,

максимально отличающегося составом и от пилей, и от вышеупомянутого цитохрома с и не обладающего возможностью проводить ток. Проводимость пилей исследовалась при помощи измерения спектров поглощения образцов в терагерцовом и инфракрасном диапазонах: метод оптической спектроскопии очень эффективен при исследовании электродинамических характеристик различных систем и обладает рядом преимуществ при работе с биологическими объектами, т.к. он высокочувствительный, точный и бесконтактный, что сводит к минимуму влияние паразитных токов на измерения и проблемы в связи с возможными низкими концентрациями носителей заряда.

. Спектры поглощения образцов измерялись на трех установках: импульсном терагерцовом спектрометре с временным разрешением “**Tera K15**”, терагерцовом ЛОВ-спектрометре “**Эпсилон**” (спектрометр, в котором в качестве источника терагерцового излучения используется лампа обратной волны) и инфракрасном Фурье-спектрометре “**Vertex 80v**” фирмы Bruker, в диапазоне частот  $2 \text{ см}^{-1} - 10000 \text{ см}^{-1}$  и в широком температурном интервале - от 1.8 до 300 К. Анализ полученных результатов показал, что при комнатных температурах доминируют интенсивные процессы поглощения, обусловленные откликом воды, находящейся внутри и между пилями. Это дебаевская релаксация в области спектра ниже  $10 \text{ см}^{-1}$ , трансляционные и либрационные колебания молекул  $\text{H}_2\text{O}$  на частотах  $200 \text{ см}^{-1}$  и  $600 \text{ см}^{-1}$ , соответственно. В температурном поведении терагерцовых спектров и теплоёмкости пилей выявлена особенность при 250 К, природа которой объясняется замерзанием содержащейся в нанофиламентах связанной воды. При температурах, близких к гелиевым, в терагерцовой области частот спектров поглощения, а также в температурной зависимости теплоёмкости ниже 10 К найдены слабые признаки возбуждения с энергией порядка 2 мэВ, происхождение которого мы связываем с бозонным пиком – проявлением дополнительной по отношению к дебаевской плотности акустических фононных состояний, возникающей в разупорядоченных средах. Кроме того, температурная зависимость теплоёмкости содержит линейный вклад в районе  $T \leq 2 \text{ К}$ , что указывает на наличие стеклянной фазы.

## Литература

1. В. К. Ильин, И. А. Смирнов, П. Э. Солдатов, Т. А. Воейкова, Д. В. Коршунов, П. Е. Чумаков, С. А. Сафронова и А. Ю. Тюрин-Кузьмин. Исследование электрогенных свойств ассоциаций и монокультур анаэробных бактерий. – Материалы конференции "Научные чтения памяти К. Э. Циолковского". – 2010. – Калуга.

2. *H. Bao, Z. Lu, X. Cui, Y. Qiao, J. Guo, J. M. Anderson u C. M. Li.* Extracellular microbial synthesis of biocompatible CdTe quantum dots. – *Acta biomaterialia* – 2010. – № 6(9). – C. 3534-41.
3. *Pirbadian, S., Barchinger, S. E., Leung, K. M., Byun, H. S., Jangir, Y., Bouhenni, R. A., El-Naggar, M. Y.* *Shewanella oneidensis* MR-1 nanowires are outer membrane and periplasmic extensions of the extracellular electron transport components. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2014. – № 111(35). – C. 12883-12888.
4. *Malvankar, N. S., Vargas, M., Nevin, K. P., Franks, A. E., Leang, C., Kim, B.-C., Lovley, D. R.* Tunable metallic-like conductivity in microbial nanowire networks. *Nature Nanotechnology*. – 2011. – № 6(9). C. 573-579.
5. *Yan, H., Chuang, C., Zhugayevych, A., Tretiak, S., Dahlquist, F. W., Bazan, G. C.* Inter-Aromatic Distances in *Geobacter Sulfurreducens* Pili Relevant to Biofilm Charge Transport. – *Advanced Materials*. – 2015. – № 27(11). – C. 1908-1911.