

13. Roy S. S., Ehrlich A. M., Craigen W. J., Hajnoczky G., VDAC2 is required for truncated BID-induced mitochondrial apoptosis by recruiting BAK to the mitochondria. //EMBO Rep. – 2009. – Vol. 10. – P. 1341-1347
14. Bellot G., Cartron P. F., Er E., et al. TOM22, a core component of the mitochondria outer membrane protein translocation pore, is a mitochondrial receptor for the proapoptotic protein Bax. //Cell Death Differ. – 2007. – Vol. 14. – P. 785-794
15. Ott M., Norberg E., Walter K. M., et al. The mitochondrial TOM complex is required for tBid/Bax-induced cytochrome c release. //J. Biol. Chem. – 2007. – Vol. 282. – P. 27633-27639
16. Billen L. P., Kokoski C. L., Lovell J. F., Leber B., Andrews D. W. Bcl-XL inhibits membrane permeabilization by competing with Bax. //PLoS Biol. – 2008. – Vol. 6. – P. e147
17. Ma S. B., Nguyen T. N., Tan I., et al. Bax targets mitochondria by distinct mechanisms before or during apoptotic cell death: a requirement for VDAC2 or Bak for efficient Bax apoptotic function. //Cell Death Differ. – 2014. – Vol. 21. – P. 1925-1935
18. Veresov V. G., Davidovskii A. I. Structural insights into proapoptotic signaling mediated by MTCH2, VDAC2, TOM40 and TOM22. //Cell. Signal. – 2014. – Vol. 26. – P. 370-382

## СПЕКТРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНООБЪЕКТОВ: ОТ МОЛЕКУЛ К БИОСТРУКТУРАМ

**Зенькевич Э.И.<sup>1</sup>, Старухин А.С.<sup>2</sup>, фон Борцисковски К.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Б.И. Степанова, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup>*Институт физики Технического университета Хемнитца, Германия*

История развития и использования методов спектроскопии высоко-го спектрального и пространственного разрешения при исследовании свойств одиночных органических молекул, нанобъектов (квантовые точки) и биоструктур составляет немногим более 25 лет. Высокая значимость и актуальность данного направления фундаментальной науки была отмечена в 2014 г. Нобелевской премией по химии за развитие методов флуоресцентной микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения (Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner). Возмож-

ности современных методов многоканальной спектроскопии с супервысоким пространственным разрешением (превышающим дифракционный предел) в сочетании с лазерным возбуждением широко продемонстрированы при исследовании оптических свойств и динамики релаксационных процессов для одиночных объектов различной природы и морфологии (органические молекулы-флуорофоры, гетерогенные наноансамбли на основе квантовых точек, нативные биоструктуры и природные комплексы) [1].

В докладе приводится история вопроса, отмечается вклад советской школы в развитии данного направления и рассматриваются основные физические и оптические принципы современных методов пространственно-разрешенной спектроскопии. Обсуждается ряд результатов, полученных как авторами доклада [2, 3], так и другими исследователями в этом направлении, показывающих возможности субдифракционного детектирования одиночных центров для исследования специфики мерцаний интенсивности свечения (“blinking”, рис. 1) одиночных нанообъектов, их структуры и свойств, а также взаимодействия между ними в реальном масштабе времени (“colocalization”, рис. 2). Представлены результаты по спектральной визуализации и кинетике затухания свечения одиночных квантовых точек и наноансамблей «квантовая точка-порфирина» и «квантовая перилен-бисимид» с использованием конфокального микроскопа, сопряженного с детектирующей системой на основе лавинного фотодиода.

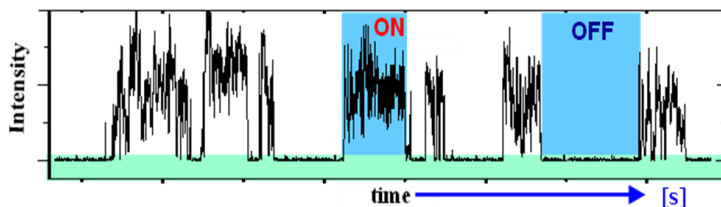


Рисунок 1. Временное мерцание интенсивности свечения одиночной молекулы перилена-бисимида при 295 К, фиксированной на кварцевой подложке при постоянном лазерном возбуждении.

Лазерная спектроскопия одиночных нанообъектов является сверхчувствительным методом изучения физико-химической природы органических молекул (в том числе и тетрапиррольных соединений [2]) при минимальных модификациях структуры и малых концентрациях, когда

другие методы (например, ЯМР-, ИК-спектроскопия) оказываются малоинформативными (рис. 3).

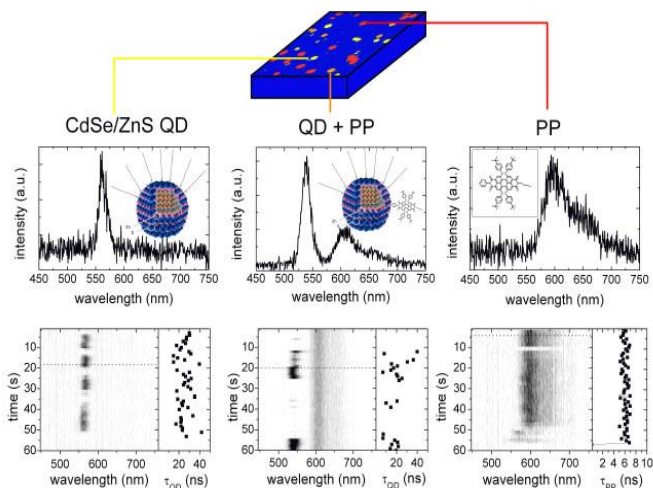


Рисунок 2. Спектрально-временная динамика полос свечения и кинетики затухания одиночных наноансамблей «квантовая точка CdSe/ZnS-периленибисимид», фиксированных на поверхности Si/SiO<sub>2</sub>.

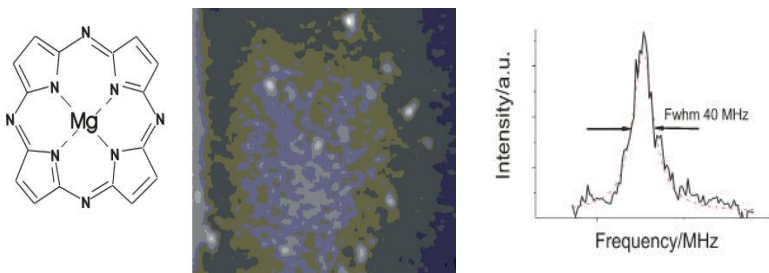


Рисунок 3. Структура, флуоресценция (image) и спектр свечения одиночной молекулы Mg-ТАП в матрице твердого ксенона при 1.2 К

В качестве примеров приводятся результаты исследований NH-таутомерии в одиночных молекулах свободных оснований порфиринов (рис. 4), а также экспериментальные данные по спектроскопии одиноч-

ных фотосинтетических светособирающих антенных комплексов зеленых растений и фотосинтезирующих бактерий

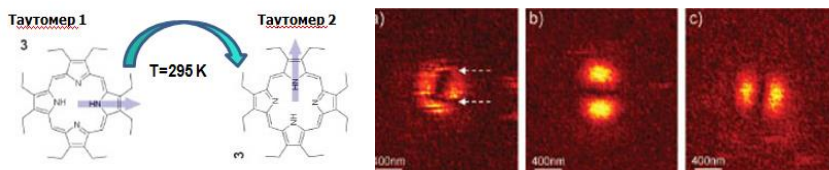


Рисунок 4. Схема NH-таутомерии и спектральная визуализация (image) ориентации дипольных моментов переходов в реальном масштабе времени для молекулы ОЕР в матрице РММА при 295 К.

Отметим, что разработанные методы и подходы в спектроскопии одиночных нанообъектов различной морфологии и природы позволяют решать широкий круг междисциплинарных задач в физике, физической химии, оптике и спектроскопии, биофизике, медицинской физике, квантовой информатике, а также осуществлять оперативную диагностику и высокочувствительный спектральный анализ сложных молекулярных систем и нанообъектов. С другой стороны, разработки в этой области характеризуются высокой практической значимостью, поскольку открывают широкие возможности при решении диагностических и других смежных задач материаловедения, биомедицины, нанотехнологий и др.

Финансовая поддержка работы: ГПНИ «Конвергенция - 2020 3.0.3 и 3.04» (Беларусь) и DFG Priority Unit FOR 877 (Германия).

### Литература

1. Moerner W.E. A Dozen years of single-molecule spectroscopy in physics, chemistry, and biophysics // J. Phys. Chem. B. -2002. - Vol. 106. - P. 910-927.
2. Starukhin A., Shulga A., Sepiol J., Knyukshto V., Renn A., Wild U. Single molecule spectroscopy of Mg-tetrazaporphyrin in xenon matrix. Heavy atom effect // Chem. Phys. - 2002. - Vol. 285. - P.121-125.
3. Zenkevich E.I., Blaudeck T., Kowerko D., Stupak A.P., Cichos F., von Borczyskowski C. Ligand dynamics and temperature effects upon formation of nanocomposites based on semiconductor CdSe/ZnS quantum dots and porphyrins: ensemble and single object measurements // Macroheterocycles. -2012. - Vol. 5. - P. 98-114.