

К. Шварц<sup>1</sup>, А. Даулетбекова<sup>2</sup>, М. Сорокин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Центр по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца, Дармштадт, Германия

<sup>2</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<sup>3</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## Поверхностные плазмоны усиливают интенсивность Рамановских спектров

### 1. Поверхностные плазмоны

Поверхностные плазмоны представляют собой продольные колебания электронов на поверхности (или на границе с диэлектриком) металла или полупроводника. Плазмоны могут быть созданы электромагнитным излучением, быстрыми электронами, протонами и другими видами излучения. Понятие плазмона было предложено в 1952 году известным американским физиком, профессором Калифорнийского университета Дэвидом Пайнсом (*David Pines*, 1924–2018) и с тех пор были всесторонне исследованы. Чуть позже, в 1957 году профессор Университета Теннесси Ричи (*Rufus Haynes Richi*, 1924–2017) вел в физику твердого тела поверхностные плазмоны, обнаруженные в тонких металлических и полупроводниковых пленках. Их можно наблюдать, например, при полном отражения света.

Поверхностные плазмоны не могут излучать на идеальной поверхности без дефектов. Но на поверхности металл-диэлектрик с дефектами энергия поверхностных плазмонов может излучаться. Такие поверхностные плазмоны в английской литературе называют *Gap Surface Plasmons (GSP)* причем «гар» (в переводе щель или зазор) относится к щели между металлом и диэлектриком. Поверхность с периодическими дефектами называют метаповерхностью. Такая метаповерхность может состоять из периодических нанопластинок, причем эти нанопластины (англ. – *nanobricks*) должны быть меньше, чем длина волны применяемого света  $\lambda$ . Метаповерхности, образованные различными наноструктурами, широко используются при обработке информации.

### 2. Наночастицы золота усиливают интенсивность Рамановских спектров

Сотрудники Университета Утрехта (Нидерланды) под руководством проф. *Alfons van Blaaderen* разработали новый наносенсор, который усиливает интенсивность Рамановского излучения адсорбированных на нем молекул или групп молекул десятки тысяч раз. Такие сенсоры могут применяться в химии и медицине. Благодаря высокой чувствительности их часто называют «молекулярными отпечатками пальцев». Исследование было опубликовано в журнале *«Advanced Functional Materials»* [1].

Ведущий исследователь профессор *Jessi van Blaaderen* поясняет: «Эффект усиления основан на взаимодействии с наноплазмонами на поверхности золота, которое усиливает Рамановское рассеяния в десятки тысяч раз. При этом золотые нано-палочки должны быть в определенной оболочке, с оптимальным размером и концентрацией».

Поиск оптимальных параметров для оболочки и подбор размера и концентрации частиц были главной целью исследований. *Jessi van Blaaderen* и *Harith van der Hoeven* объясняют: «Наночастицы золота образуют контролируемые сферические суперчастицы (кластеры), в которых «горячие точки» перекрываются и еще больше усиливают Рамановское излучение. Для этой цели помещались в небольшие капли воды. При медленном испарения воды при нагреве золотые нано-палочки превращаются в суперчастицы - сферические кластеры» [1, 2].

Наночастицы золота показаны на рисунках 1 и 2. При перемешивании в водно-масляной эмульсии нано-палочки скапливаются в водной фазе и образуют суперчастицы при высыхании.

Суперчастицы (кластеры) распыляют на подложку (рис. 3а). Рамановское излучение возбуждают лазером с длиной волны 633 и 532 нм (рис. 3б), усиленное Рамановское излучение показано на рис 4.

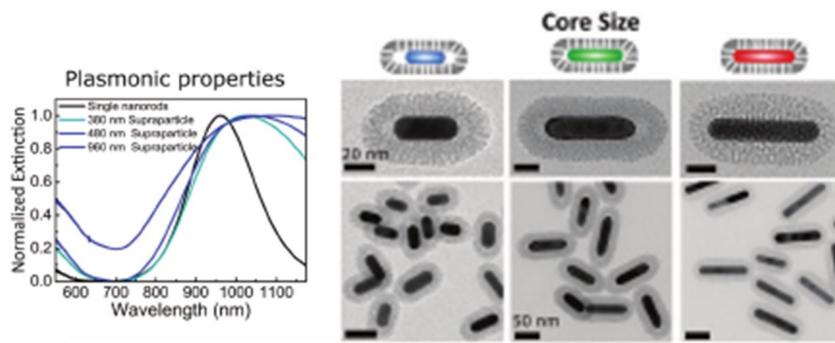


Рисунок 1 - Наночастицы золота с оболочкой, размеры ядра – 43 нм (слева), 66 нм (центр) и 95 нм (справа). Плазмоны имеют различное поглощение, которое показано слева для трех размеров

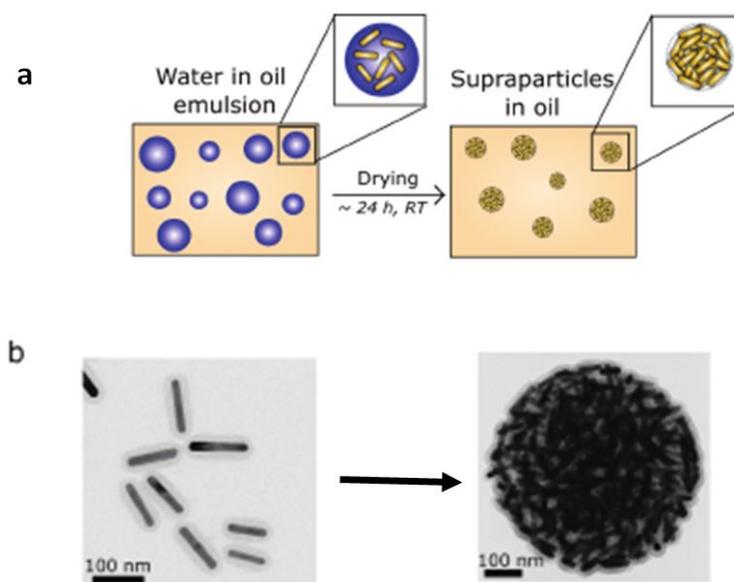


Рисунок 2 – а – Коагуляция наночастиц золота в суперчастицы (кластеры) при медленном нагреве; б – наночастицы золота (18 нм) до и после нагрева в трансмиссионном электронном микроскопе

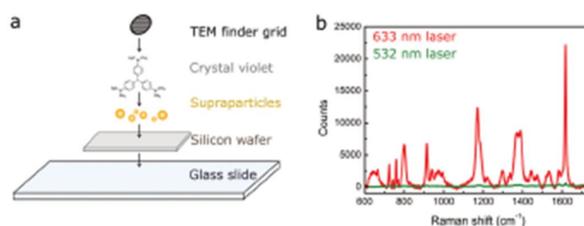


Рисунок 3 – а – Материал, выбранный для анализа, наносится на подложку с кластерами золота; б – Рамановское излучение возбуждается лазером с длиной волны 633 и 532 нм

Химическое травление усиливает Рамановское излучение (рис.5). Исследованный научной группой из Утрехта метод самоорганизации процессов коагуляции и диффузии наночастиц золота позволяет получать оптимальные наночастицы и может применяться для других материалов.

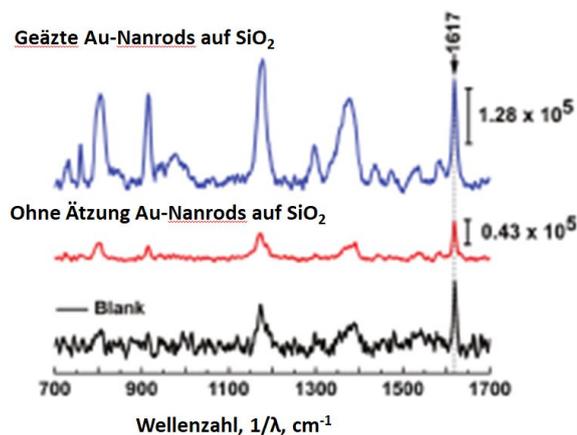


Рисунок 4 – Рамановские спектры, возбужденные лазером с длиной волны волны 633 нм. Травление усиливает интенсивность Рамановского излучения

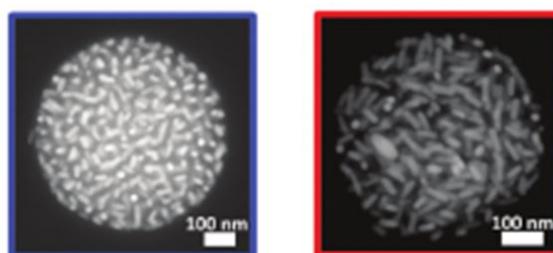


Рисунок 5 – Изображение суперчастиц (кластеров) в трансмиссионном электронном микроскопе после травления и без травления

## Список литературы

- 1 Jessi E.S. van der Hoeven, Harith Gurunaryanan, Maarten Bransen, D.A. Matthijs de Winter, Petra E. de Jongh and Alfons van Blaaderen, Silica-Coated Gold Nanorod Supraparticles: A Tunable Platform for Surface Enhanced Raman Spectroscopy, *Adv. Funct. Mater.*, 220148, 2022. [Электронный ресурс] - URL: <https://DOI:10.1002/adfm.20220148>
- 2 Alfons van Blaaderen. [Электронный ресурс] - URL: <https://mcec-researchcenter.nl/people/blaaderen>

### Сведения об авторах:

*Шварц К.* - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

*Даулетбекова А.К.* - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Нур-Султан, Казахстан.

*Сорокин М.* - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

*Schwartz K.* - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

*Dauletbekova A.* - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukhan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Sorokin M.* - Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow.