

К. Шварц¹, А. Даулетбекова², М. Сорокин³

¹ Центр по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца, Дармштадт, Германия

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Поверхностные плазмоны запасают солнечную энергию

1. Поверхностные плазмоны

Плазмоны являются коллективными возбуждениями свободных электронов в электронном газе твердых тел. Они были введены в физику профессором Дэвидом Пайнсом (*David Pines*, 1924 -2018), Университет Калифорнии, в 1952 году и с тех пор детально исследованы. В 1957 году профессор Ритчи (*Rufus Haynes Ritchie*, 1924 - 2017), Университет Теннесси, предсказал существование поверхностных плазмонов, которые были обнаружены несколько лет спустя в тонких металлических пленках [1]. Поверхностные плазмоны являются колебаниями свободных электронов, которые происходят параллельно поверхности. Они могут возбуждаться в металлах и полупроводниках светом или пучком электронов (Рис.1 и 2). Поверхностные плазмоны широко применяются для создания метаматериалов [2]. Интенсивность поверхностных волн зависит от материала. Когда частота падающего света соответствует частоте поверхностных плазмонов возникает плазмонный резонанс с максимальной интенсивностью. Такие условия могут быть созданы в наноматериалах.

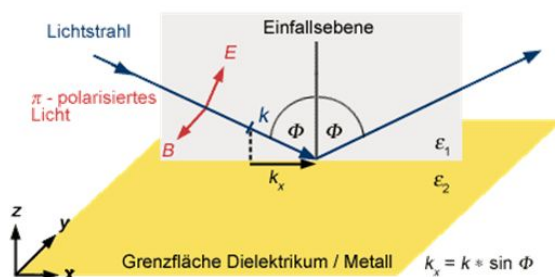


Рисунок 1 – На границе диэлектрик-металл или диэлектрик-полупроводник, часть энергии падающего света переходит в металл или полупроводник и создает поверхностные плазмоны, которые распространяются параллельно поверхности. Интенсивность уменьшается экспоненциально и переходит в тепло (колебания решетки)

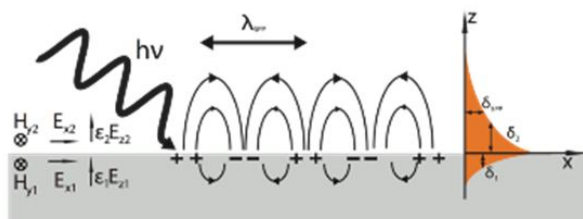


Рисунок 2 – Поверхностные плазмоны являются колебаниями свободных электронов с частотой ν_p , зависящей от материала. При возбуждении со светом резонансной частоты $\nu = \nu_p$, поверхностная волна наиболее сильная

Недавно сотрудники Института физики твердого тела совместно с Лабораторией Фотоэлектрических материалов Китайской Академии Наук (*Institute of Solid State Physics*

and Key Laboratory of Photovoltaic and Energy Conservation Materials Chinese Academy of Sciences) разработали новые фототермические материалы на основе сульфида меди ($Cu_{24}S_{27}$) с поверхностными плазмонами, представляющие большой интерес в области фототермических солнечных элементов. Эти исследования открывают новые применения поверхностных плазмонов (Рис.3). Исследование было проведено под руководством профессора Жерняна Ванга (*Zhernyan Wang, Direktor of Intelligent Micro-Nano Device Research Laboratory*) и его молодым сотрудником Мин Си (*Dr. MinXi*) [3].

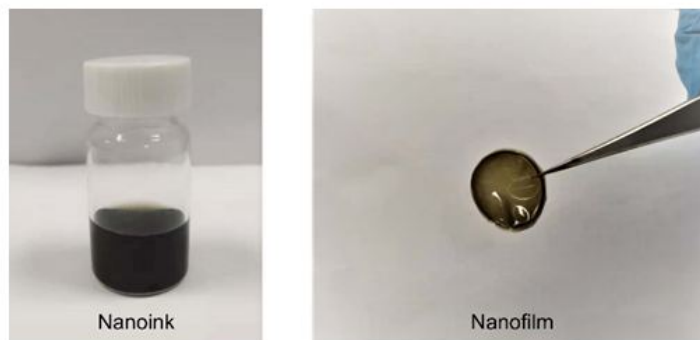


Рисунок 3 – Китайские ученые, Институт физики твердого (Китайская Академии Наук), на основе сульфида меди ($Cu_{24}S_{27}$) разработали нано-чернила и фототермические нанопленки, которые используются для поглощения солнечной энергии [4]

2. Синтез наноматериалов с поверхностными плазмонами

Фотовольтаические солнечные батареи сегодня широко используются для преобразования солнечной энергии в электрическую. Эти солнечные элементы производят 253 ГВт электроэнергии (по состоянию на 2020 год), что соответствует около 5% электрогенерации мира [3]. Но, в дополнение к преобразованию солнечной энергии в электричество, сегодня разрабатываются материалы, которые эффективно поглощают солнечный свет и преобразуют его энергию в тепло. Такие материалы должны поглощать максимум энергии солнечного спектра (рис.4.).

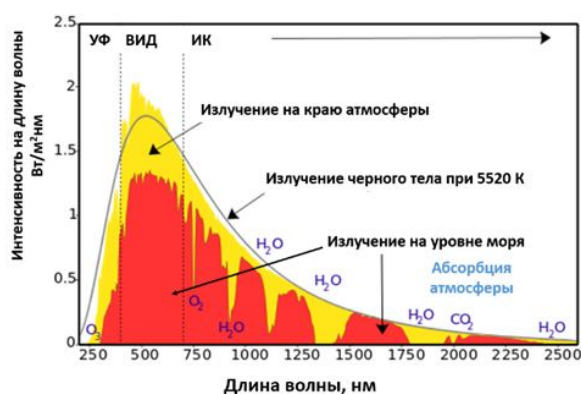


Рисунок 4 – Спектр солнечного излучения на Земле

Китайские ученые изучали поверхностные плазмоны в сульфиде меди с различной структурой (рис. 3). Результаты показали, что поверхностные плазмоны создавались более

эффективно в наноматериалах, с характерными размерами меньше длины волны света (рис. 5 и 6). Они разработали физические модели для взаимодействия света с плазмонами [4].

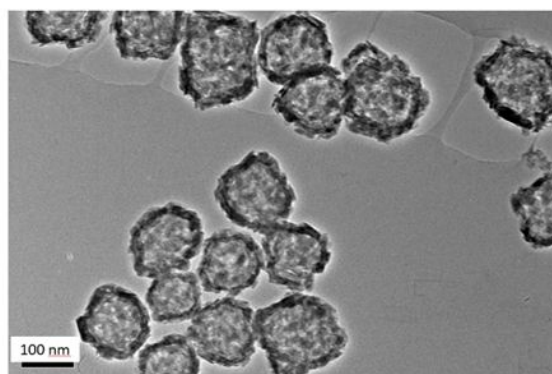


Рисунок 5 – Наночастицы сульфида меди $Cu_{24} S_{27}$ в электронном микроскопе (англ. *Scanning Electron Microscope, SEM*) [4]

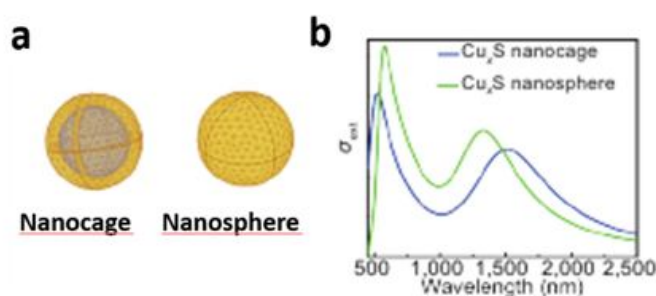


Рисунок 6 – а - Были разработаны различные наночастицы: наноклетки (англ. *Nanocage*) и наносферы (*Nanosphere*). Наноклетки - это наночастицы с внутренними полостями, окруженные слоем ПВДФ [3]. б - Спектрыпоглощения наносфер и наноклеток [4]

Было обнаружено, что максимальное поглощение солнечного света осуществляется в сульфиде меди с стехиометрией $Cu_{24} S_{27}$. В дальнейшем была разработана технология гидротермального химического преобразования $Cu_{24} S_{27}$ в наночастицы. Были созданы различные наноструктуры - наносферы (англ. *nanosphere*) и наноклетки (*nanocage*). Наносферы являются однородными наноструктурами, а наноклетки имеют наноструктуру с полостями и меньшую плотность. Наноклетки были покрыты слоем поливинилиденфторида (ПВДФ или фторопласт-2, англ. PVDF). Оптимальный размер наночастиц составляет от 100 до 150 нм (рис. 5). ПВДФ повышает поглощение света и преобразование солнечного света. Контроль нанозадающих элементов осуществлялся с помощью электронного микроскопа.

3. Поверхностные плазмоны поглощают солнечную энергию

Ученые искали стратегию для достижения высокой эффективности поглощения солнечной энергии для различных применений, таких как солнечные водонагреватели, энергосберегающие здания, системы сушки и другие.

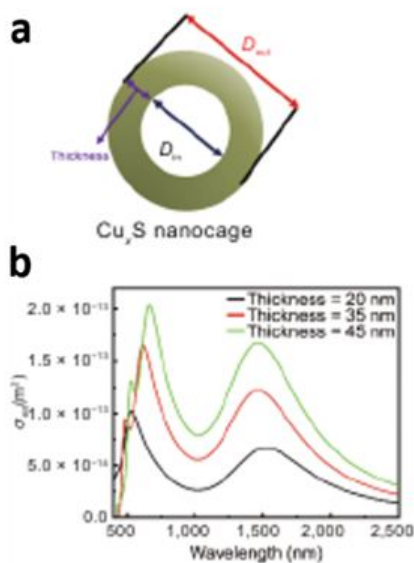


Рисунок 7 – Свойства наноклеток зависят от материала и покрытия (ПВДФ). Толщина полимера также влияет на поглощение [4]

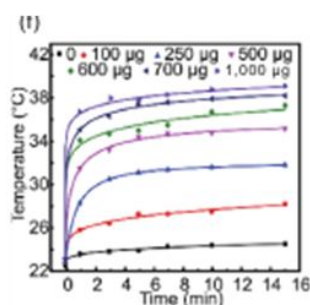


Рисунок 8 – Измеренный фототермальный нагрев наноклеток со слоем ПВДФ с различным количеством $Cu_{27} S_{24}$ [4]

Эффективность преобразования энергии нанопленками была экспериментально измерена по повышению температуры пленок в режиме насыщения (рис. 8). Эффективность определялась как $\eta = Q_{film}/Pt_{sat}$, где Q_{film} представляет собой генерируемое тепло, $P = 1361$ Вт/м² - солнечная константа, t_{sat} - время насыщения (3 - 6 мин). Оптимальными оказались наноклетки со средним диаметром 150 нм, окруженные 45 нм слоем ПВДФ (рис. 7). Удалось добиться эффективности $\eta \approx 23\%$ в режиме насыщения после ~ 5 мин [3]. Для сравнения эффективность солнечных элементов составляет 20% (теоретически максимальная 33%) [5]. Профессор Жерьян Вангна основании расчетов при помощи метода конечных элементов утверждает, что эффективность преобразования света в тепло может быть в дальнейшем увеличена. Ведущий исследовательского проекта Мин Си пишет: «наше исследование может способствовать пониманию взаимодействия света с плазмонами и открыть новые возможности для приложений плазмонных наночастиц» [4].

Список литературы

- 1 Ritchie R.H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films, Phys. Rev., 106, 874 (1957).
- 2 Fei Ding, Yuanqing Yang, Rucha A. Deshpande and Sergey I. Bozhevolnyi, A review of gap-surface plasmon meta-surfaces: fundamentals and applications, Rep. Prog. Phys, 81, 026401.
- 3 Topagrar-online. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.topagrar.com/energie/news/solarenergie> (дата обращения: 06.12.2021)
- 4 Min Xi, Longchang Xu, Nian Li, Shudong Zhang, and Zhenyang Wang, Plasmonic Cu₂S₂₄ nanocages for novel solar photothermal nanoink and nanofilm, Nano Research (2021).[Электронныйресурс] - URL: <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3880-3> (дата обращения: 06.12.2021)
- 5 Photovoltaik-Wirkungsgrad von Solarzellen. [Электронныйресурс] - URL:<https://echtsolar.de/photovoltaik-wirkungsgrad-solarzelle> (дата обращения: 06.12.2021)

Сведения об авторах:

Шварц К. - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштадт, 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, 13 Kazhymukhan str., Nur-Sultan, Kazakhstan.

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