

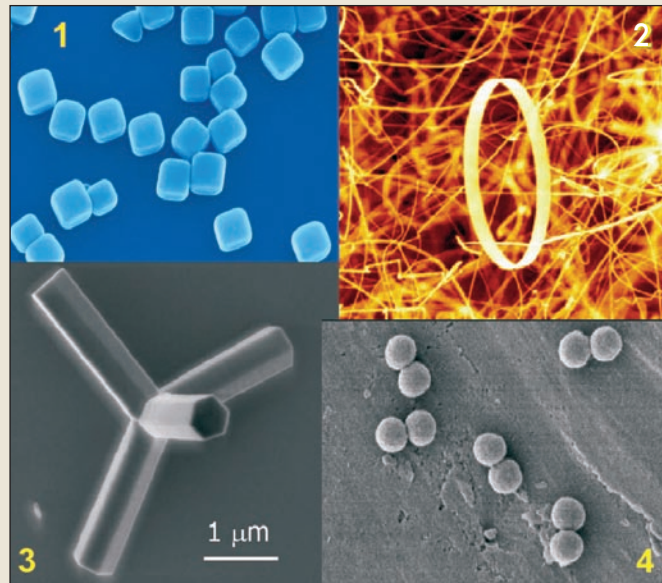
# Наноплазмоника

Благодаря успехам в производстве и визуализации металлических и полупроводниковых наночастиц быстро развивается новая область нанотехнологий – наноплазмоника. О ее перспективах и достижениях рассказывает доктор физико-математических наук Василий Климов.

**Н**аноплазмоника изучает явления, связанные с колебаниями электронов проводимости в металлических наноструктурах и наночастицах (рис. 1) и взаимодействием этих колебаний со светом, атомами и молекулами с целью создания сложных оптических устройств. Плазмонные колебания в наночастицах (рис. 2) существенно отличаются от электромагнитных волн, распространяющихся по поверхности металла («поверхностных плазмонов»). Именно эти колебания, которые называют локализованными плазмонами, являются основой всех приложений наноплазмоники.

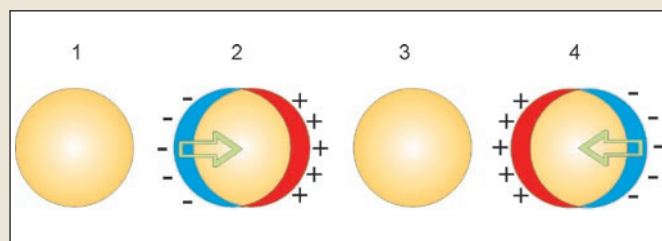
Важнейшая черта явлений в наноплазмонике заключается в комбинации сильной пространственной локализации электронных колебаний с их высокой частотой (в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного). В свою очередь, сильная локализация приводит к гигантскому увеличению локальных оптических и электрических полей. И, наконец, свойства локализованных плазмонов критически зависят от формы наночастиц, что позволяет «настраивать» их систему резонансов на эффективное взаимодействие со светом или элементарными квантовыми системами (молекулы, квантовые точки).

Эти важнейшие свойства плазмонных наночастиц уже позволили обнаружить целый ряд новых эффектов. Прежде всего, гигантские локальные поля вблизи наночастиц приводят к увеличению сечения комбинационного рассеяния на 10–14 порядков, что позволяет говорить о возможности наблюдения отдельных молекул. Эти же локальные поля могут привести к разработке методов определения структуры ДНК без прикрепления к ним флуоресцентных маркеров. Используя сложную структуру спектров плазмонных наночастиц, можно одновременно усиливать как поглощение, так и испускание света ими и, таким образом, создавать эффективные флуорофоры и наноразмерные источники света (и даже нанолазеры). Помимо этих новых приложений, основанных на физике плазмонных наночастиц, использование достижений наноплазмоники позволяет существенно увеличить отношение эффективность-стоимость, например, в солнечных батареях и светоизлучающих диодах. И, наконец, считается, что наноплазмоника

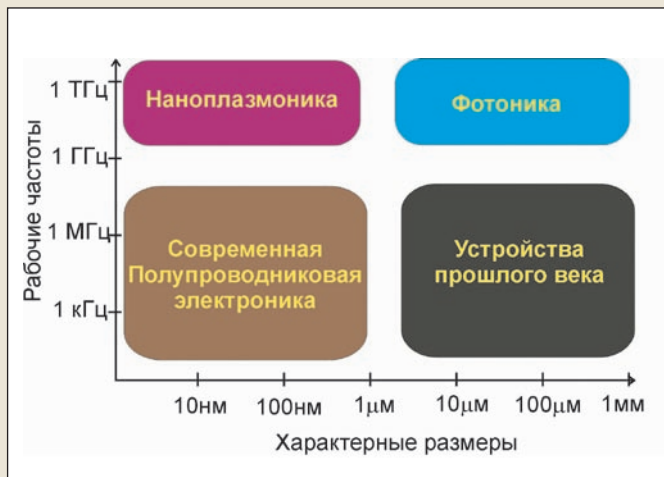


**РИСУНОК 1** | Примеры некоторых наночастиц, для которых разработаны эффективные методы синтеза. 1 – серебряные кубики со стороной 175 нм; 2 – нанокольцо из окиси цинка; 3 – кристаллы окиси цинка в форме тетраподов; 4 – кластеры из двух наносфер

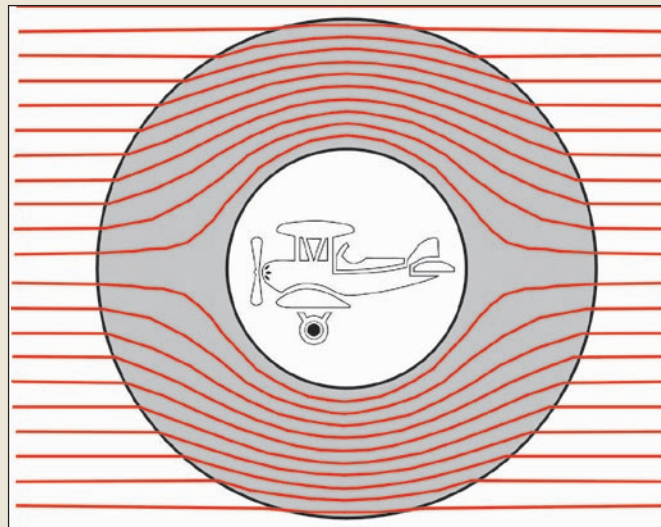
позволит создать новую элементную базу для компьютеров и устройств обработки данных за счет использования малых размеров металлических наноструктур и оптического быстродействия происходящих в них процессов. Сами по себе элементы полупроводниковых устройств могут иметь и очень малые размеры (в процессорах Intel уже используются технологии 65 нм) и высокие частоты функционирования, однако соединение этих элементов электрическими проводниками приводит к ограничениям частоты функционирования, связанным с неустранимым выделением в проводниках тепла. С другой стороны, фотонные устройства (оптоволоконная техника) имеют высокие (оптические) частоты функционирования, но при этом их физические размеры слишком велики



**РИСУНОК 2** | Различные фазы свободных колебаний электронов относительно кристаллической решетки в плазмонной наночастице. 1 – электроны не смещены относительно решетки. 2 – под действием импульса света электроны сместились влево от кристаллической решетки. Возникающая сила притяжения между зарядами разного знака (стрелка на 2) приводит к возвращению электронов в положение равновесия (3), но силы инерции приводят к тому, что электроны пролетают положение равновесия и оказываются справа от кристаллической решетки частицы (4), где на них снова действует возвращающая сила притяжения кристаллической решетки и т.д.



**РИСУНОК 3** | Место наноплазмонных устройств среди устройств, основанных на других технологиях. Фотонные устройства имеют высокие частоты функционирования, но их размеры слишком велики для наноустройств. Современные полупроводниковые устройства имеют слишком малые частоты функционирования из-за выделения тепла в соединительных проводниках. Устройства, основанные на принципах наноплазмоники, лишены этих недостатков



**РИСУНОК 4** | Покрытие-невидимка. Вокруг скрываемого объекта размещается слой метаматериала специальной формы и, главное, со специально подобранными распределениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Все лучи света обходят скрываемый объект, который кажется невидимым

для наноустройств. Использование вместо проводников наноплазмонных волноводов позволит устранить эти проблемы и повысить частоты функционирования компьютеров и других устройств (рис. 3).

Еще одним важным применением наноплазмоники является создание метаматериалов, т.е. искусственных материалов, в которых место обычных атомов занимают плазмонные наночастицы или наноструктуры специально подобранной формы. Иногда такие частицы называют «искусственными атомами» или «плазмонными атомами». Такие метаматериалы обладают свойствами, которыми принципиально не могут обладать естественные материалы. Например, плазмонные метаматериалы могут иметь не только отрицательную диэлектрическую проницаемость (как в обычных благородных металлах), но и отрицательную магнитную проницаемость. Комбинация этих свойств приводит к возможности создания оптических устройств (наноскопов), в которых, в отличие от обычных микроскопов, не существует т.н. дифракционного предела и можно увидеть объекты размером в несколько нанометров.

На основании плазмонных метаматериалов также разрабатывается концепция т.н. покрытия-невидимки («плаща-невидимки»). Этот метаматериал с такими распределениями электрических и магнитных свойств, что все лучи света будут обходить некоторый объем без рассеяния и отражения и, следовательно, любой объект, помещенный внутрь этого объема, будет казаться невидимым для стороннего наблюдателя (рис. 4).

Наноплазмоника — очень молодая наука, и далеко не все ее законы в настоящее время понятны, что приводит к возникновению самых различных парадоксов.

В частности, если вблизи слоя метаматериала с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями поместить точечный источник света, например, излучающий атом, то в зеркально симметричной относительно поверхности точке необходимо одновременно поместить поглощающий излучение атом, т.е. атомы в такие системы можно помещать только парами. Существование такого рода парадоксов позволяет быть уверенным, что эту нанофизику ждет большое будущее.

Интересно, что во многих основополагающих работах по наноплазмонике в числе авторов фигурируют русские имена: Владимир Шалаев, Анатолий Заяц, Николай Желудев, Сергей Божевольный, Игорь Смолянинов, Михаил Ногинов и многие другие. Печально, но все они работают вне России. В России наноплазмоника развивается в основном в области теории (группа Климова, ФИАН), хотя и у нас созданы технологии производства плазмонных наноструктур, которые в дальнейшем станут основой устройств самого различного назначения (группа Балыкина, ИСАН).

*Работа поддержана РФФИ (гранты № 09-02-13560, 07-02-01328) и Президиумом РАН.*

Д. ф.-м. н. Василий Климов работает в Физическом институте им. Лебедева РАН в секторе теории взаимодействия излучения с веществом. В 2009 г. в издательстве «Физматлит» вышла его книга — «Наноплазмоника».