



# НАНОФОТОНИКА

Авторы: А. В. Шипулин

---

НАНОФОТОНИКА (нанооптика), раздел оптики, в котором изучаются явления, возникающие при взаимодействии оптич. излучения с объектами размером от сотен до единиц нанометров, т. е. существенно меньшим длины волны оптич. излучения (300–800 нм). Иногда к Н. относят также явления, возникающие при взаимодействии электромагнитных волн с периодич. структурами, период которых лишь немного меньше длины волны, — [фотонными кристаллами](#).

Нанообъекты разделяют на естественные (атомы, молекулы) и искусственные, полученные из естеств. материалов в результате технологич. процессов.

Взаимодействие излучения с атомами и молекулами, хотя и попадает в класс Н., однако не является чем-то принципиально новым.

Искусств. нанообъекты могут быть изготовлены двумя принципиально разл. способами: искусств. структурированием (напр., путём электронно-лучевой литографии) либо в результате процессов [самоорганизации](#), когда нанообъекты, взаимодействуя друг с другом, сами выстраиваются в структуры. Результатом наноструктурирования являются металлич. нанообъекты на диэлектрич. подложке. Процессы самоорганизации ответственны, напр., за рост полупроводниковых кристаллов в форме [квантовых точек](#), используемых в качестве активных молекул для квантовых усилителей и лазеров (см. [Лазер на квантовых точках](#)), за создание нанотрубок, обладающих перспективными оптич. и электрич. свойствами, а также графена, применение которого в микроэлектронике может качественно улучшить свойства компонентов. Нанообъекты могут формироваться в результате химич. реакций, модификации к.-л. способом биомолекул, что также можно отнести к самоорганизации.

Взаимодействие классич. нанообъектов (диэлектриков и металлов, для описания

физич. процессов в которых нет необходимости использовать понятия квантовой физики) носит резонансный характер. В случае резонанса возбуждается собств. мода колебаний, свойства которой зависят от материала, из которого состоит нанообъект. Для диэлектрика свойства собств. моды обусловлены связанными, а для металла – свободными электронами. Резонансные колебания во много раз увеличивают эффективность взаимодействия нанообъектов.

Свойства квантовых нанообъектов описывают с помощью квантовых представлений о взаимодействии с внешними полями, которое приводит к поглощению или испусканию фотонов. Важным свойством квантовых нанообъектов (напр., квантовых точек) является зависимость внутр. структуры квантовых уровней от размера нанообъекта, что позволяет модифицировать эту структуру и получать нанообъекты, резонансные на заданной длине волны.

Резонансно возбуждённые нанообъекты могут взаимодействовать не только с полями, но и с др. нанообъектами, как естественными, так и искусственными. Сила такого взаимодействия многократно возрастает, если оба объекта обладают одинаковыми резонансными частотами. Такие резонансные взаимодействия исследованы для комбинаций структур разл. природы: металлич. нанообъектов, нанотрубок, квантовых точек, полимерных и биомолекул. Изучение взаимодействий нанообъектов с биомолекулами открывает возможности для принципиально новых методов биомедицинской диагностики и лечения. Взаимодействие квантовых точек с металлич. нанообъектом привело к созданию [нанолазера](#).

Возможности Н. используют при разработке нового поколения миниатюрных устройств для управления потоками световой энергии – полосковых волноводов, частотных фильтров, наноконтуров электромагнитной связи. В основу таких устройств положена миниатюризация принципиально схожих схем радиотехники сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн. Изготовление таких миниатюрных устройств в оптич. диапазоне стало возможным благодаря успехам [нанотехнологии](#) в напылении тонких металлич. и диэлектрич. плёнок контролируемой толщины на диэлектрич. подложки. Напр., полосковый волновод, созданный на основе напылённой плёнки, может иметь толщину порядка 40–50 нм. Др. важное применение

металлич. плёнок в Н. связано с созданием периодич. структур вдоль их поверхности; напр., на фольге можно формировать решётки равноотстоящих отверстий или выступов с характерными размерами порядка 100 нм. Резонансное взаимодействие света с колебаниями электронов металла на краях отверстий приводит к прозрачности такой фольги для узкой полосы частот, определяемой геометрией этой структуры.

Исследования в области Н. перспективны для создания материалов с отрицательным показателем преломления  $n$ , предсказанных В. Г. Веселаго в 1967 (см.

[Метаматериалы](#)). Первые образцы такого материала получены экспериментально в оптич. диапазоне В. М. Шалаевым с сотрудниками в 2005. В отличие от обычного закона преломления света на границе двух сред, луч света, падающий из воздуха на границу среды с отрицат. значением  $n$ , отклоняется в сторону, обратную направлению своего движения. Расходящийся пучок лучей, преломляясь на границе такой среды, может превратиться в сходящийся, формируя т. н. суперлинзу, позволяющую при определённых условиях рассмотреть объекты меньших размеров, чем возможно с помощью обычной стеклянной линзы. Среды с отрицат. показателем преломления открывают перспективу создания т. н. оболочки невидимости, когда лучи, падающие от внешнего источника, не отражаются от объекта, а огибают его, распространяясь дальше без отражения и рассеяния.

Теоретич. исследования в области Н. включают в себя численное моделирование и разл. аналитич. модели, которые обычно носят оценочный характер. Для эксперим. исследований в Н. используются практически все имеющиеся в оптике методы: спектроскопические, временные, а также методы оптич. и электронной микроскопии. Развитие новых эксперим. методов, таких как [атомно-силовая микроскопия](#) и сканирующая микроскопия (см. [Туннельный микроскоп](#)), также стимулировало развитие Н., позволяя получать информацию о нанообъекте с необходимым пространственным разрешением.

## Литература

Лит.: Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. № 7; Novoselov K. a. o. Two-

dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // Nature. 2005. Vol. 438. № 7065; Jarillo-Herrero P., Van Dam J., Kouwenhoven L. Quantum supercurrent transistors in carbon nanotubes // Ibid. 2006. Vol. 439. № 7079; Klimov V. a. o. Single-exciton optical gain in semiconductor nanocrystals // Ibid. 2007. Vol. 447. № 7143; Boltasseva A., Shalaev V. Fabrication of optical negative-index metamaterials: Recent advances and outlook // Metamaterials. 2008. Vol. 2. № 1; Zheludev N. The road ahead of metamaterials // Science. 2010. Vol. 328. № 5978. См. также лит. при ст. Нанолазер.