



Nanophotonics (I)

Section.3: Plasmonics

Mohammad Ali Mansouri-Birjandi

Faculty of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)

mamansouri@yahoo.com

mansouri@ece.usb.ac.ir

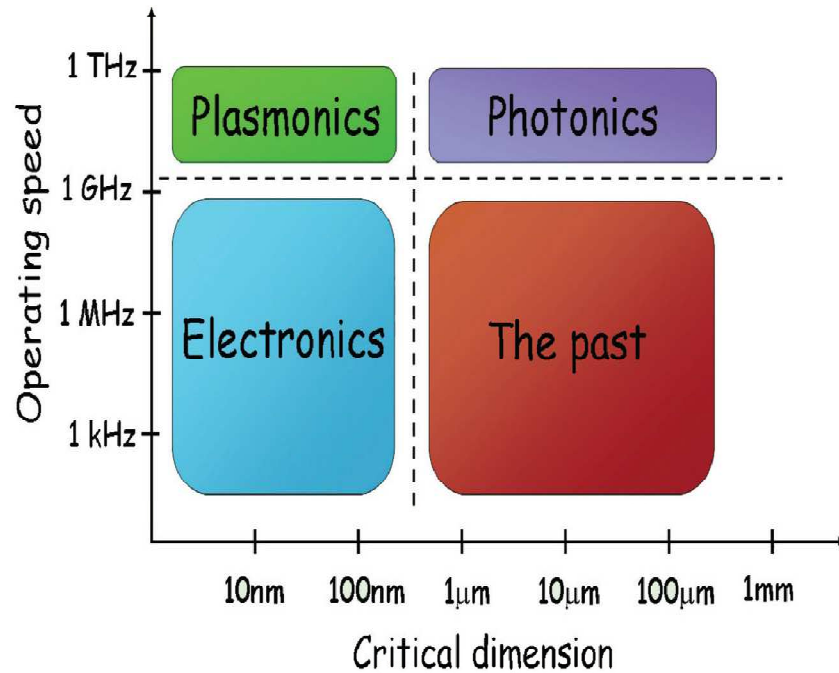
فهرست مطالب

- ۱- مقدمه
- ۲- تاریخچه مختصر
- ۳- پلاسمون
- ۴- خواص نوری فلزات
- ۵- پلاریتون پلاسمون سطحی
- ۶- معادلات ماکسول و انتشار امواج الکترومغناطیس در محیط پلاسمونیک
- ۷- مثال هایی از نانوفوتونیک

۱- مقدمه

چرا پلاسمونیک؟

✓ ابعاد مدارهای الکترونیک
✓ سرعت مدارهای فوتونیک



شکل ۱. محدودیت اندازه و سرعت برای فناوری های مختلف

الکترونیک:
✓ ابعاد کوچک
✓ سرعت کم
✓ تاخیر زمانی اتصالات داخلی

فوتونیک:
✓ سرعت زیاد
✓ ابعاد بزرگ
✓ محدودیت پراش

می توان پلاسمونیک را پلی بین الکترونیک و فوتونیک محسوب کرد

۱- مقدمه

❖ در سالهای اخیر تمرکز شدید نور با تلفات انتشاری قابل قبول، توجه بسیاری را به منظور دستیابی به مدارهای مجتمع نانوفوتونیک به خود جلب کرده است.

❖ نور تزویج شده به نوسانات الکترونیهای آزاد در **سطح مشترک فلز - دی الکتریک**، که با عنوان **پلاسمون پلاریتون سطحی** شناخته می شود، به دلیل تمرکز نور در ابعاد نانومتر، موضوع تحقیقات فراوانی شده است که **نانوسیم-های فلزی**، **آرایه نانوذرات فلزی** و **گوه های V شکل** از آن جمله می باشند.

❖ برخی از این ساختارها با تمرکز نور در هسته دی الکتریک محدود شده بین دو لایه فلزی، عبور نور در **ابعاد نانومتر** را فراهم می کنند.

❖ این ساختار نه تنها طول انتشار مناسبی دارد، بلکه تمرکز مکانی خوبی نیز ایجاد می کند. در نتیجه می توان از آن برای **سیستم های تمام نوری** استفاده کرد.

۲- تاریخچه مختصر:

□ ۱۹۶۸ یک پیشرفت بزرگ در زمینه **پلاسمون های سطحی** رخ داد: رفتار غیرطبیعی یک پراشه فلزی را به وجود **پلاسمون های سطحی** نسبت دادند، اما هنوز رابطه بین نور و پلاسمون های سطحی کشف نشده بود.

□ سال ۱۹۷۰ به مقایسه خواص الکتریکی و نوری **نانو ذرات طلا و نقره** پرداختند، برای نخستین بار خواص نوری نانو ذرات فلزی، با عنوان **پلاسمون های سطحی** توصیف شد.

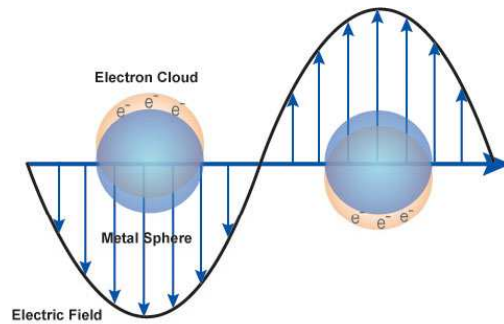
□ سال ۱۹۸۹ پدیده جالبی مشاهده شد. با تاباندن نور به یک **صفحه طلا** که روی آن **حفره هایی با اندازه نانو** ایجاد شده بود، مشاهده کردند نور در سمت دیگر صفحه خیلی بیشتر از مقدار نوری است که توقع داشته است.

□ هشت سال بعد (یعنی ۱۹۹۷)، این پدیده را با **پلاسمون های سطحی** توجیه کردند: در فلزها، الکترونها در فاصله دور نسبت به اتم قرار دارند، بنابراین در سطح فلز دریایی از الکترون وجود دارد. فوتون ها دریای الکترون آزاد را تحریک می کنند و دریای موج دار ایجاد می کنند، این دریای موج دار شدت نور عبوری از ورقه طلا را افزایش می دهد.

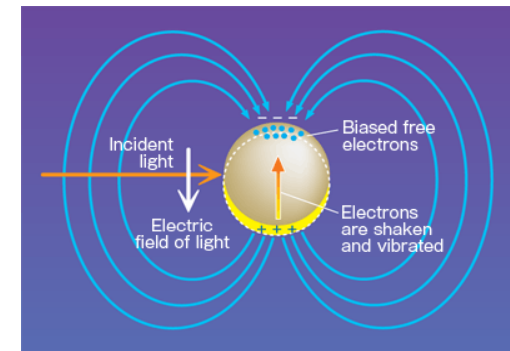
۳- پلاسمون

نوسان های همسان و منسجم الکترون های باند هدایت فلزات، **نوسان های پلازما** نام دارد.

میدان الکترومغناطیسی نوری که با **روش مناسب** به فلز تابیده می شود، می تواند الکترون های باند هدایت را دچار **قطبی شدگی** نماید. به این معنی که الکترون ها مطابق شکل های زیر تحت تاثیر میدان اعمالی قرار گرفته و نسبت به یون های مثبت هسته **جابجا** می شوند.



شکل ۳. جابجایی ابر الکترونی اتم فلز در حضور میدان الکتریکی



شکل ۲. نانو ذره در حضور میدان الکتریکی

وابسته به اندازه فلز، میان **مدهای مختلف نوسان های پلاسمونیک** باید تمایز قائل شد:

- تشدید **پلاسمون های حجمی** در اجسام فلزی **سه بعدی** اتفاق می افتند.
- تشدید **پلاسمون های سطحی** در مرز مشترک **فلز- عایق** اهمیت می یابند و
- تشدید **پلاسمون نانو ذره ای** تاثیر مستقیم طیف های نوری روی **نانو ذره های** فلزی است.

پلاسمون های حجمی

پلاسمون های سطحی

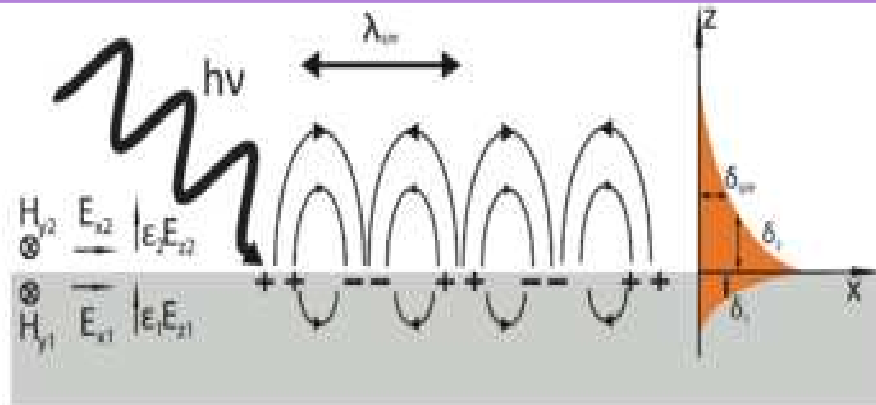
پلاسمون نانو ذره ای

۴- خواص نوری فلزات

- پلاسمون نقش عمده ای در توجیه خواص نوری فلزات دارد. با توجه به رابطه پاشندگی در سطح فلز:
- نور با فرکانس پایینتر از فرکانس پلاسما (فرکانس نوسان پلاسمون ها) بازتاب میشود، زیرا الکترونها در فلز، میدان الکتریکی نور را نمایش می دهند.
- نور با فرکانس بالای فرکانس پلاسما از سطح فلز عبور می کند، زیرا الکترون ها نمی توانند به اندازه کافی سریع، به نمایش آنها پاسخ دهند.
- بسیاری از فلزات که فرکانس پلاسما آنها در ناحیه فرابنفش قرار دارد، در ناحیه مرئی براق هستند.
- برخی از فلزات مانند مس و طلا، در ناحیه مرئی دارای گذارهای باند الکترونی هستند، در نتیجه انرژی های نوری خاص جذب می شوند.
- در نیمه رساناها، فرکانس پلاسمای الکترون ظرفیت، معمولا در اعماق فرابنفش است، به همین دلیل آنها نیز بازتابنده هستند.

❖ پلاسمون های سطحی آن دسته از پلاسمون هایی هستند که محدود به سطح شده، به صورت قوی با نور بر هم کنش کرده و باعث تولید پلاریتون می شوند.

❖ پلاریتون پلاسمون سطحی، تحریک های الکترومغناطیسی منتشر شونده در سطح تماس فلز و عایق می باشند که می توانند مدهای مختلفی را در سطح ایجاد کنند، دامنه این مدهای سطحی در هر دو محیط به صورت نمایی کاهش می یابد. ❖ پلاریتون پلاسمون های سطحی شکل های متفاوتی را به خود می گیرند. این شکل ها، امواج پلاسمای الکترون های آزاد که در طول فلز منتشر می شوند، تا نوسان های محلی الکترون ها در نانو ذرات فلزی را شامل می شود.



شکل ۴. نمایش میدان الکتریکی و عمق نفوذ میدان الکتریکی در فلز و عایق.

۶- معادلات ماکسول و انتشار امواج الکترومغناطیس در محیط پلاسمونیک

❖ بر همکنش بین **فلزات** و **میدانهای الکترومغناطیس** را می توان در چارچوب **کلاسیک** مبتنی بر معادلات ماکسول توصیف کرد.

❖ حتی نانوساختارهای حدود چندین **نانومتر** را نیز می توان **بدون** آنکه نیاز به ورود به مباحث مکانیک کوانتومی باشد، توصیف کرد.

❖ بنابراین خواص نوری فلزات در قلمرو **تئوری های کلاسیک** قرار می گیرد، اگر چه این مطلب به معنای عدم وقوع پدیده های نوری مختلف که ناشی از **وابستگی شدید خواص نوری به فرکانس** است، نمی باشد.

(1) به ازای فرکانس های تا بخش **مرئی طیف**، فلزات به شدت امواج را **بازتاب** نموده و اجازه وارد شدن امواج را به داخل فلز نمی دهند. در این گستره فرکانس های پایین، تقریب **هادی ایده آل** با هدایت بی نهایت یا مقداری مشخص برای اغلب مقاصد معتبر می باشد، زیرا تنها مقدار اندکی از امواج الکترومغناطیس به درون فلز نفوذ می کنند.

(2) در فرکانس های بالاتر نزدیک به **قسمت فرورسرخ و مرئی طیف**، میزان **نفوذ** میدان ها به شکل قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که این پدیده منجر به **افزایش میزان تلفات** توان می شود.

(3) در نهایت، در فرکانس های **فرابنفش**، فلزات خواص **دی الکتریکی** کسب کرده و **اجازه انتشار امواج**، البته با میزان تلفات مختلف وابسته به ساختار باند الکترونیکی را می دهند

۶- معادلات ماکسول و انتشار امواج الکترومغناطیس

$$\nabla \cdot D = \rho_{ext}$$

این معادلات، چهار میدان ماکروسکوپیکی D (بردار جابجایی دی الکتریک)، E (بردار میدان

$$\nabla \cdot B = 0$$

الکتریکی)، H (بردار میدان مغناطیسی) و B (بردار القای مغناطیسی یا چگالی شار مغناطیسی) را با

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t$$

"چگالی بار خارجی ρ_{ext} " و "چگالی جریان خارجی J_{ext} "، مرتبط می‌سازد. توجه شود که ما از روند

$$\nabla \times H = J_{ext} + \partial D / \partial t$$

معمول که معادلات ماکروسکوپی را توسط تقسیم کردن "چگالی بار کلی ρ_{tot} " و "چگالی جریان کلی

J_{tot} "، به دو قسمت "آزاد" و "مقید" ارائه می‌دهد، پیروی نمی‌کنیم که البته آن روش هم یک

دسته‌بندی دلخواه است ولی می‌تواند (بخصوص در زمینه‌ی سطح تماس‌های فلزات) باعث پیچیده

شدن کاربرد شرایط مرزی برای بردار جابجایی دی الکتریک شود [2]. در عوض، در روش ارائه شده در

این تحقیق، بین چگالی بار و جریان خارجی (J_{ext}, ρ_{ext}) و چگالی بار و جریان داخلی (J, ρ) تمایز

قائل می‌شویم بطوریکه در مجموع $\rho_{tot} = \rho_{ext} + \rho$ و $J_{tot} = J_{ext} + J$ ، می‌باشد. مجموعه‌ی

خارجی، سیستم را تحریک می‌کند در حالیکه مجموعه‌ی داخلی به تحریک خارجی پاسخ می‌دهد

چهار میدان ماکروسکوپیک، بوسیله‌ی بردارهای "قطبی شدگی P" و "مغناطیش شدگی M"

نیز بصورت ذیل به یکدیگر مرتبط می‌باشند:

$$D = \epsilon_0 E + P$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon E$$

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

$$J = \partial P / \partial t$$

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M$$

$$B = \mu_0 \mu E$$

$$J = \sigma E$$

$$(\nabla \cdot J = -\partial \rho / \partial t)$$

که ϵ_0 و μ_0 ، به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشند. از

آنجاییکه ما در این تحقیق بر روی محیط‌های غیرمغناطیسی کار می‌کنیم، دیگر نیازی نیست که پاسخ

مغناطیسی M را در نظر بگیریم و می‌توانیم بحث خود را بر روی پدیده‌های قطبی شدگی محدود

نماییم. بردار P، ممان دو قطبی الکتریکی در واحد حجم در درون ماده را، که بوسیله‌ی هم راستا

شدن ماکروسکوپیک دو قطبی‌ها با میدان الکتریکی پدید می‌آید، توصیف می‌نماید. این بردار به

چگالی بار داخلی بوسیله‌ی رابطه‌ی $\nabla \cdot P = -\rho$ ، مرتبط می‌گردد. اصل بقای بار $(\nabla \cdot J = -\partial \rho / \partial t)$

$$D(K, \omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(K, \omega) E(K, \omega)$$

$$J(K, \omega) = \sigma(K, \omega) E(K, \omega)$$

$$\varepsilon(K, \omega) = 1 + i \frac{\sigma(K, \omega)}{\varepsilon_0 \omega}$$

در برهم کنش بین نور و فلزات، شکل کلی پاسخ دی‌الکتریک $\varepsilon(K, \omega)$ را می‌توان به حد "پاسخ موضعی مکانی" به صورت $\varepsilon(K=0, \omega) = \varepsilon(\omega)$ ساده کرد. این ساده سازی تا زمانی اعتبار دارد که طول موج λ در ماده، بسیار بلندتر از همه‌ی ابعاد مشخصه مثل اندازه‌ی سلول واحد یا "مسیر میانگین آزاد الکترون‌ها" باشد. این شرط بطور کلی، هنوز در فرکانس‌های فرابنفش نیز برقرار است.

در کل، $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ و $\sigma(\omega) = \sigma_1 + i\sigma_2$ توابع مختلطی از فرکانس‌های زاویه‌ای می‌باشند

مشخصات پاشندگی را می توان توسط یک **تابع دی الکتریک مختلط** توصیف کرد

$$\varepsilon(K, \omega) = 1 + \frac{i\sigma(K, \omega)}{\varepsilon_0 \omega}$$

خواص نوری مواد در یک بازه فرکانسی گسترده توسط **مدل های پاشندگی** تعیین می شود.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega}$$

تابع دی الکتریک برای الکترون های آزاد، به دست آمده توسط **مدل درود** به صورت ذیل است: که در رابطه فوق ω فرکانس **پلاسمای فلز** و γ ضریب **میرایی** نوسان کننده ها است.

به دلیل وجود الکترون های مقید، این مدل به تنهایی قادر به ارائه توصیف دقیقی از خواص نوری بسیاری از فلزات نیز نمی باشد. بنابراین مدلی که برای توصیف این فلزها صدق می کند به شکل ذیل خواهد بود: (**مدل لورنتس**)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\gamma_e \omega} + \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$

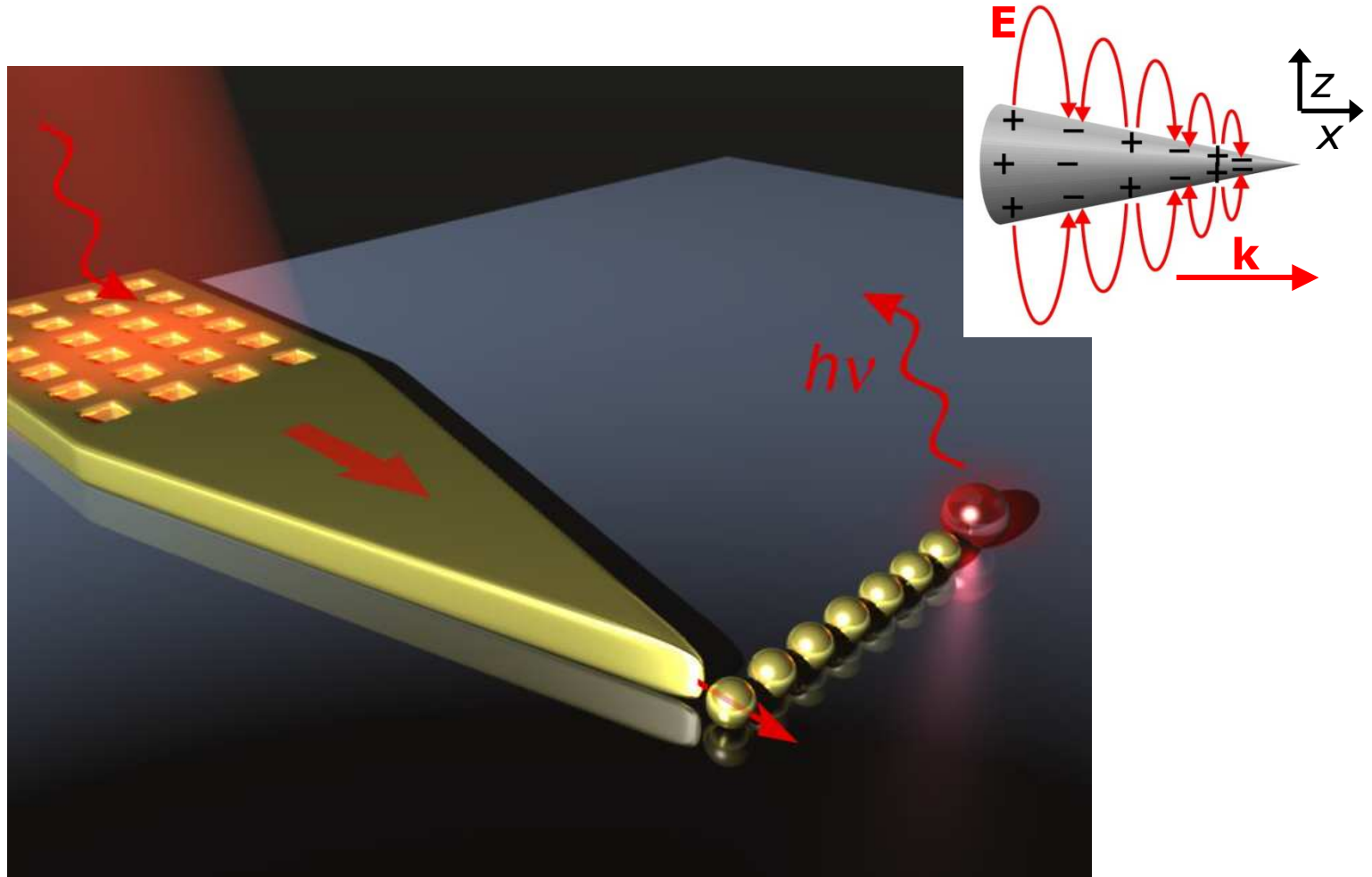
$$\varepsilon = \varepsilon_f + \delta\varepsilon_b$$

ε_f تابع دی الکتریک الکترون های آزاد.

$\delta\varepsilon_b$ تابع دی الکتریک ناشی از نوسان کننده های لورنتس.

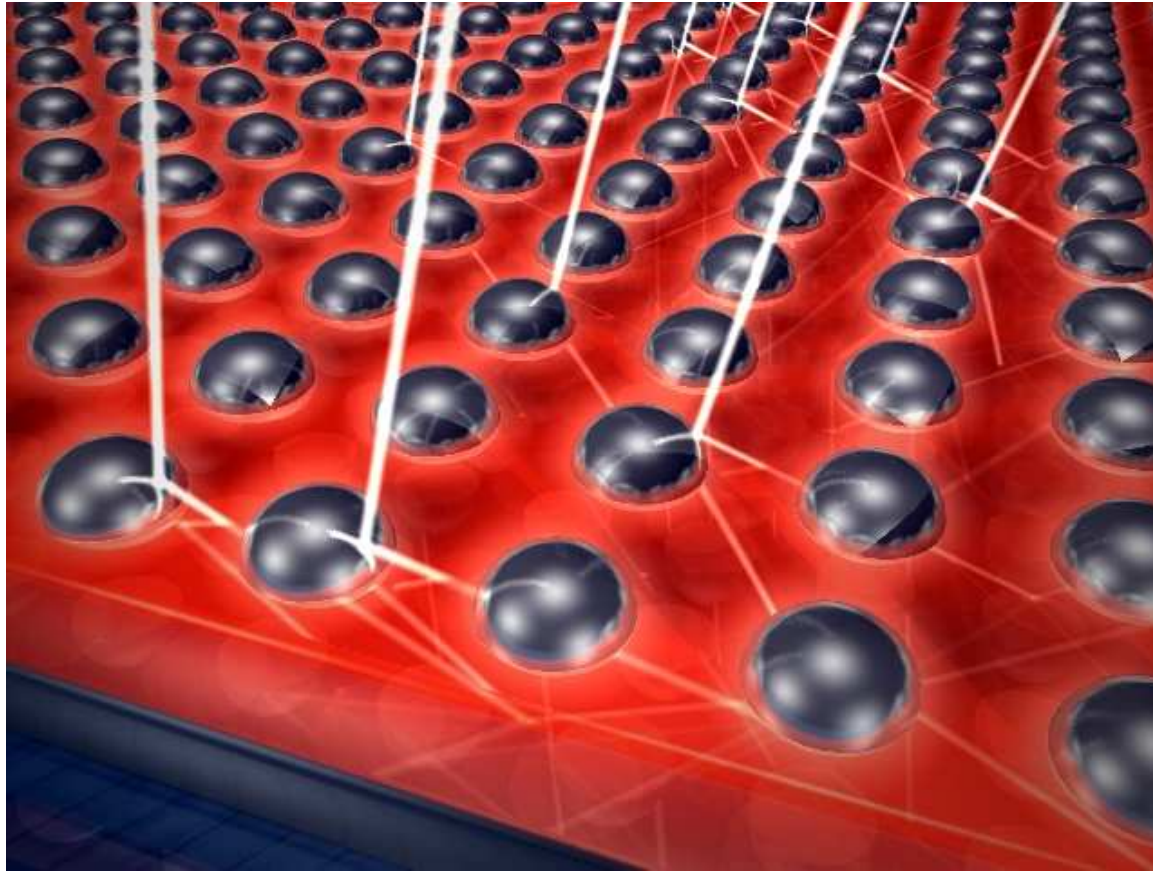
Nanophotonics examples:

1. Surface plasmons guide light to the nanoscale



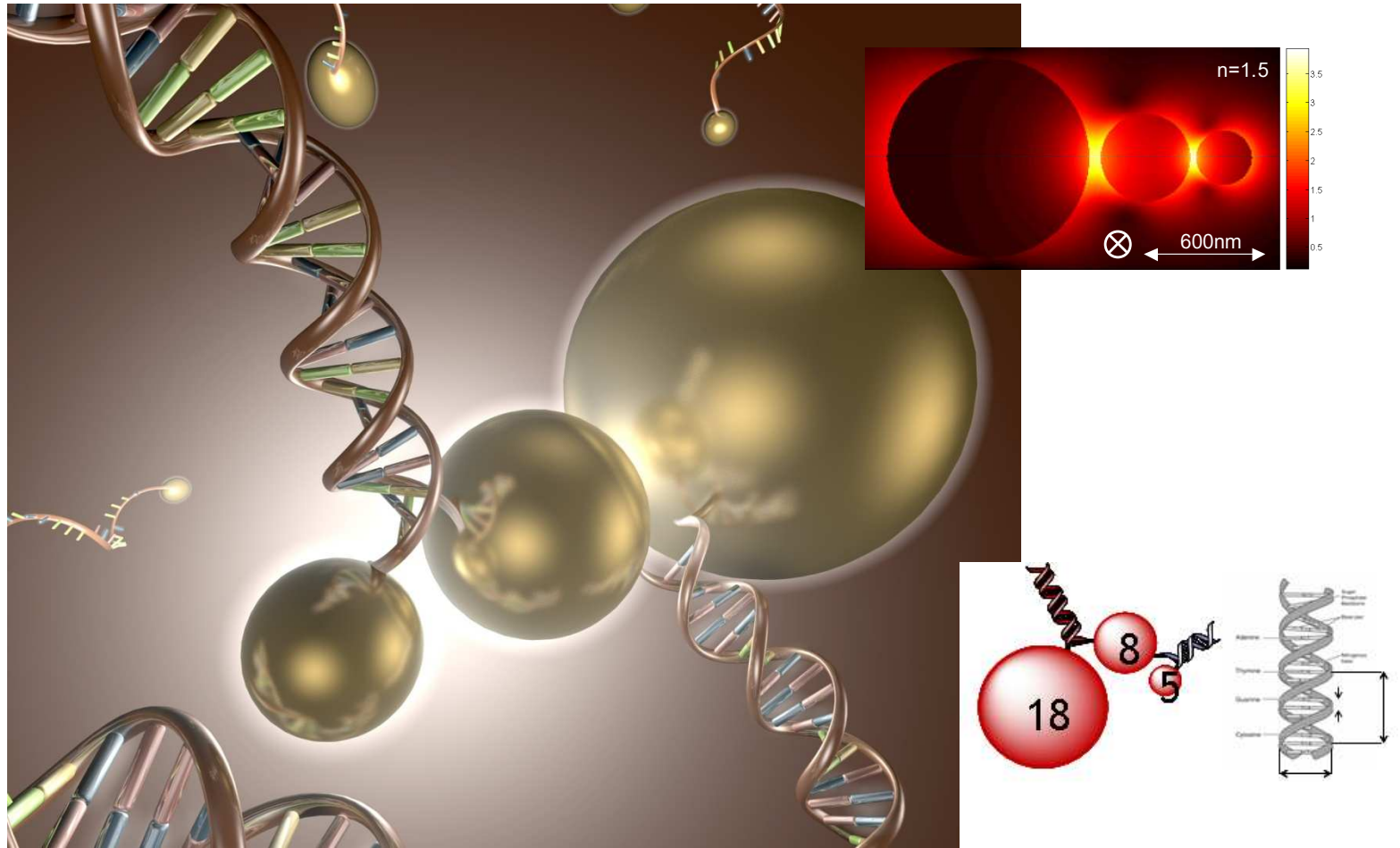
Nanophotonics examples:

2. light trapping in solar cells by metal nanoparticles



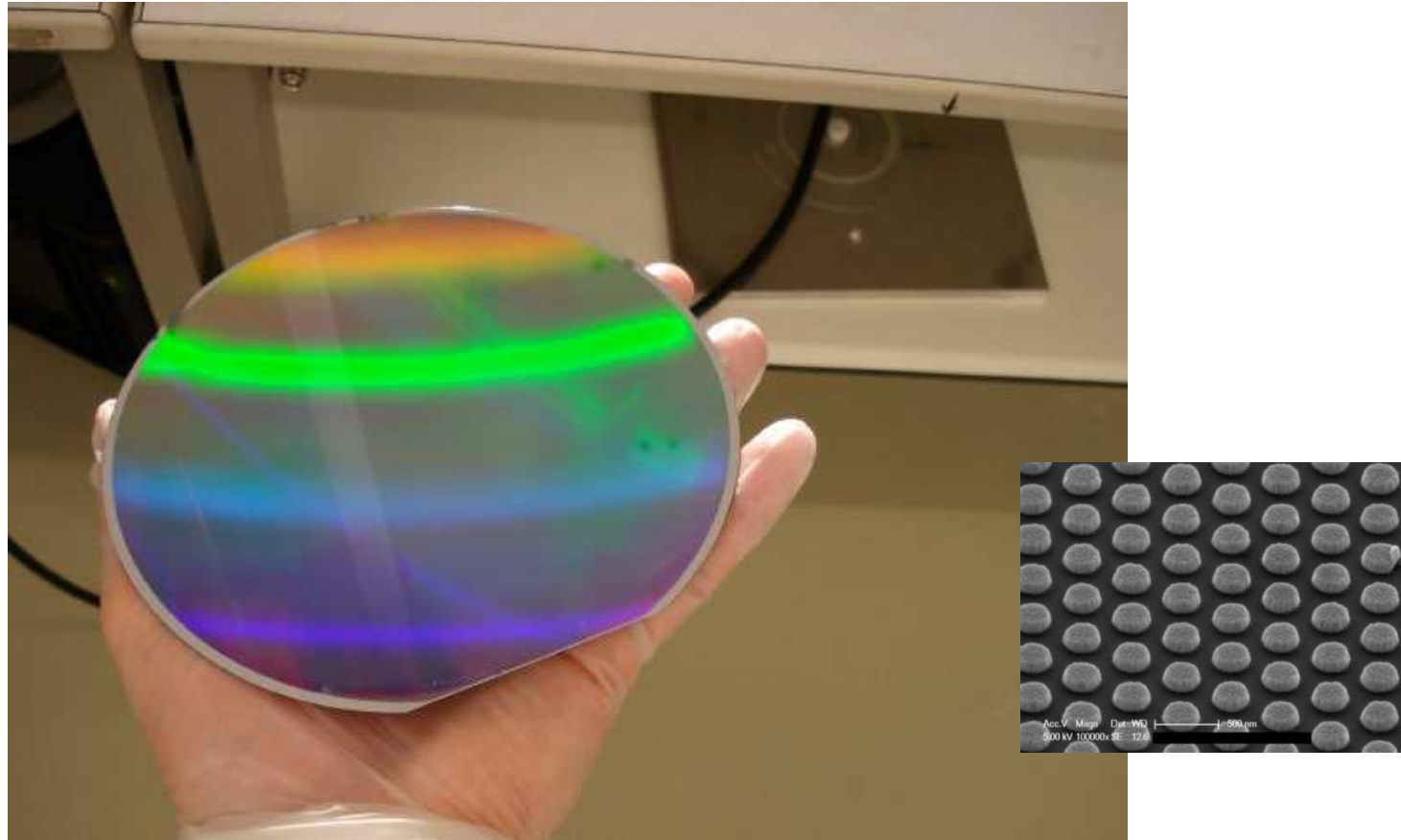
Nanophotonics examples:

3. DNA assisted assembly of metal nanoparticles



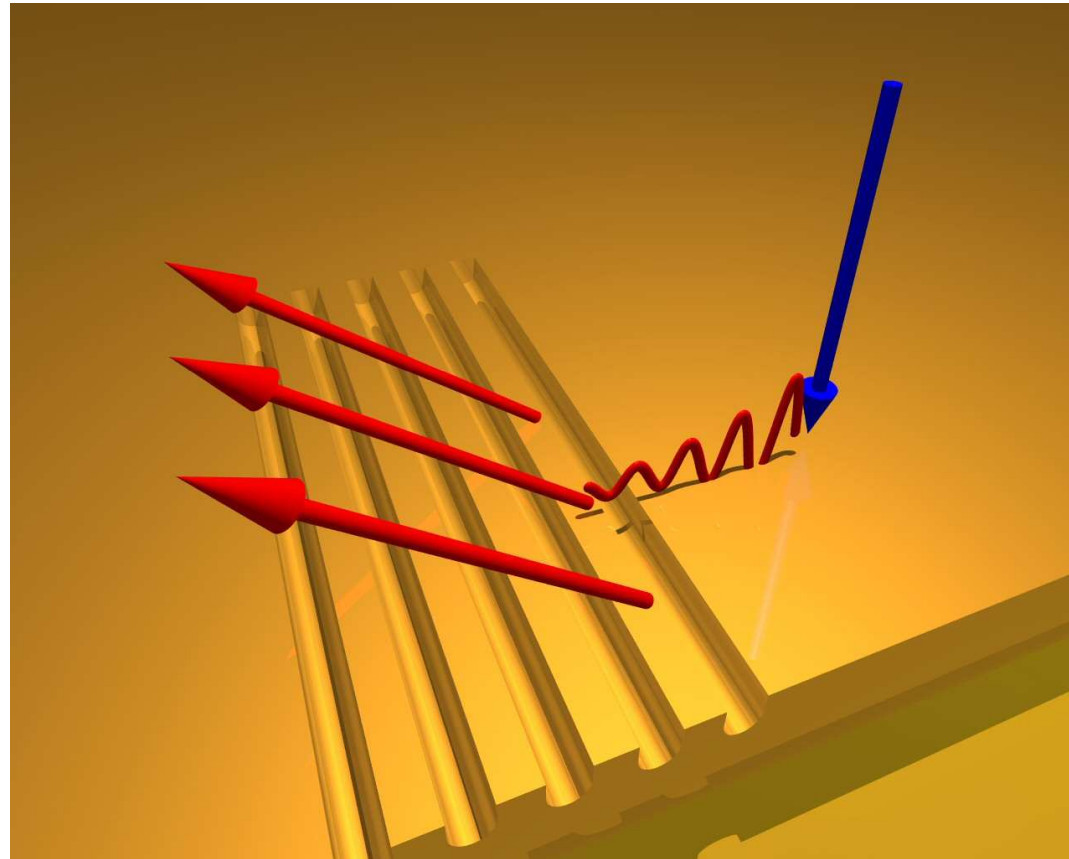
Nanophotonics examples:

4. large-area fabrication of photonic nanostructures



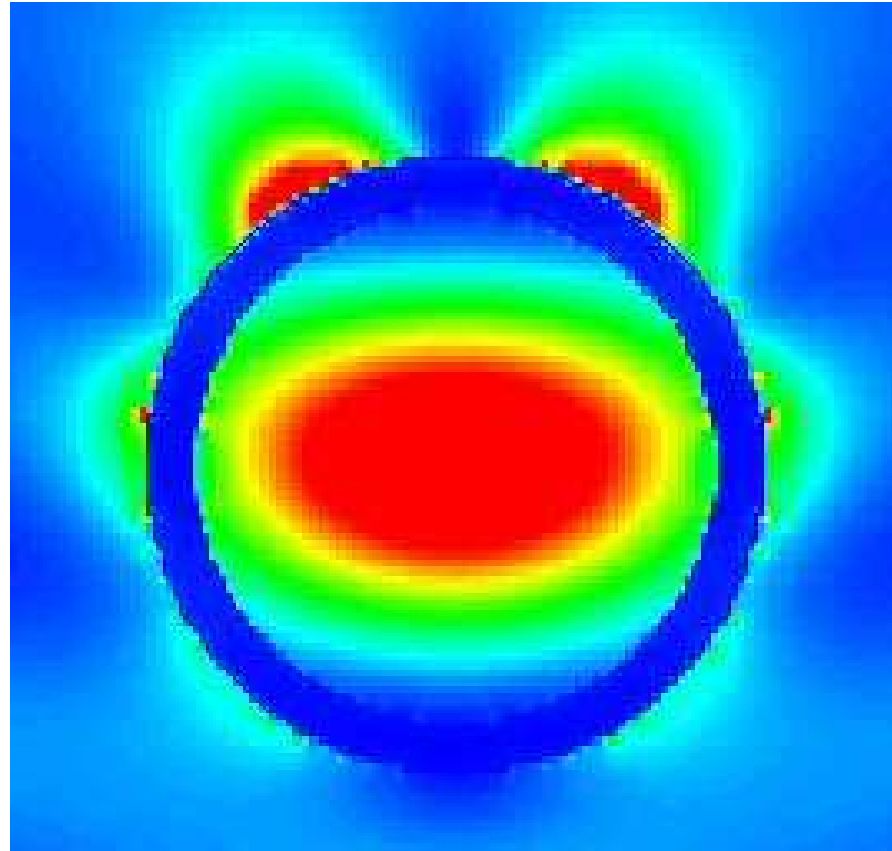
Nanophotonics examples:

5. Exciting surface plasmons with an electron beam



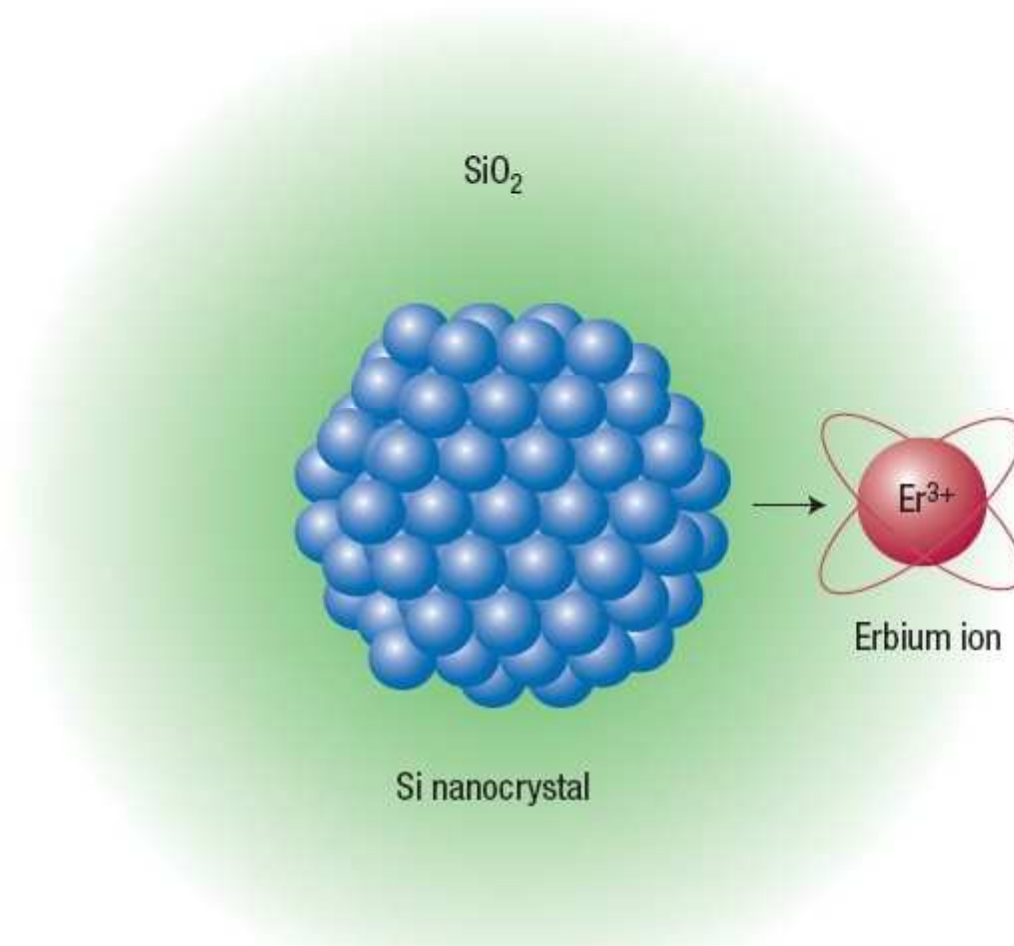
Nanophotonics examples:

6. Light concentration in core-shell particles



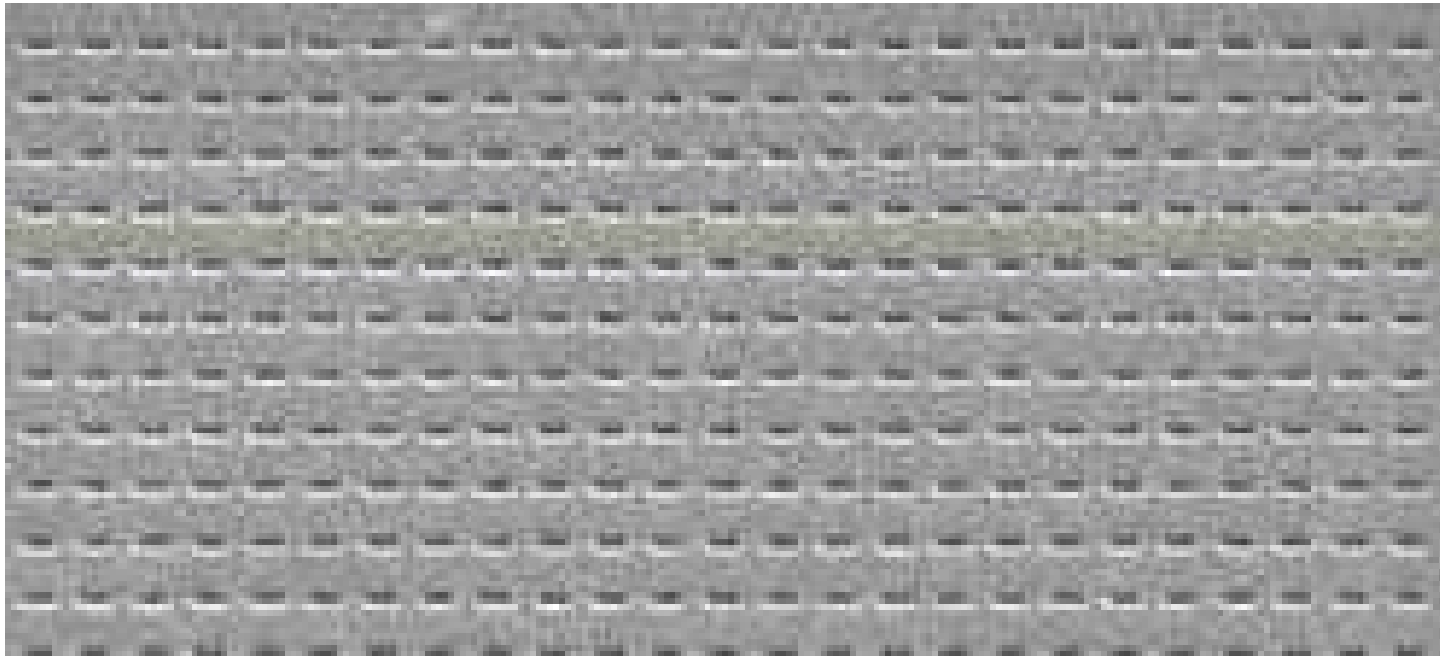
Nanophotonics examples:

7. Energy transfer in quantum dot / Er system



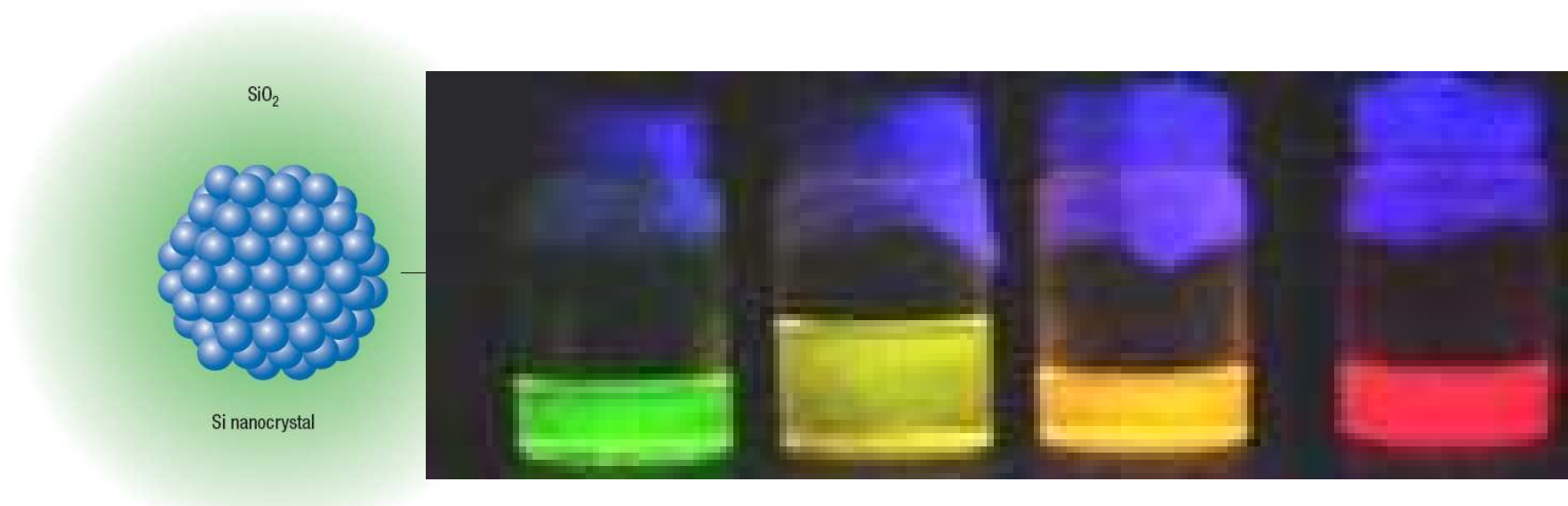
Nanophotonics examples:

8. Anomalous transmission in metal hole arrays



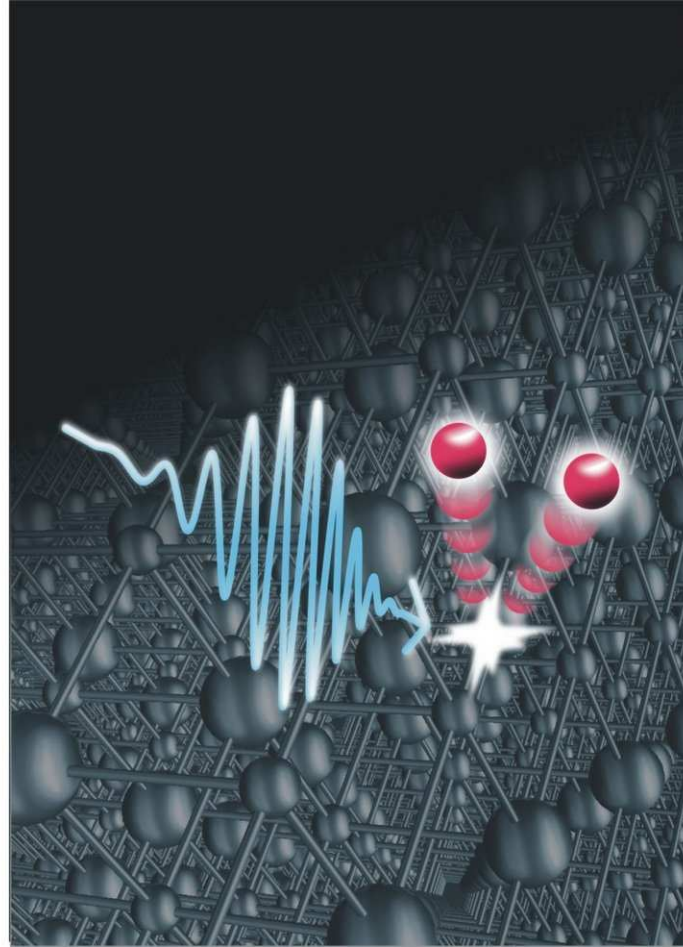
Nanophotonics examples:

9. Light emission from quantum dots



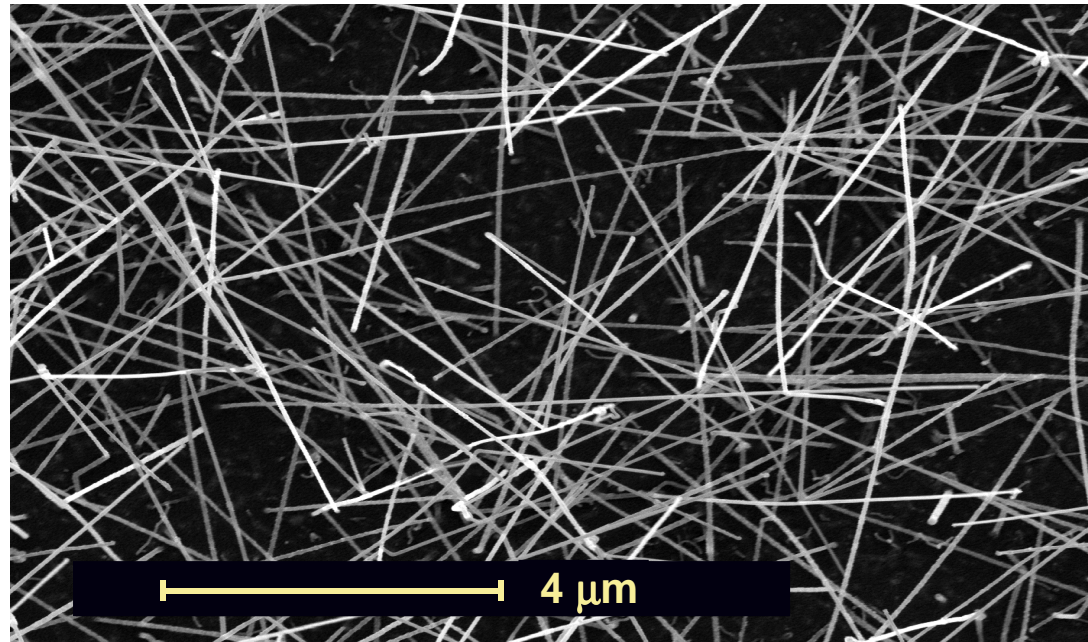
Nanophotonics examples:

10. Multiple exciton generation in quantum dots



Nanophotonics examples:

11. Light emission from semiconductor nanowires



Nanophotonics examples:

12. Controlled spontaneous emission in photonic crystals

