

Multiresonant Nanostructures for Tailoring the Spectral, Directional and Polarization Response of Light Sources

Doctoral Thesis

Author(s):

De Leo, Eva

Publication date:

2018

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000351246>

Diss. ETH No. 25636

**Multiresonant Nanostructures
for Tailoring the Spectral, Directional and
Polarization Response of Light Sources**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Eva De Leo

MSc in Nanotechnologies for ICTs
Politecnico di Torino, INP Grenoble, EPFL

born on 05.10.1988

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. David J. Norris (ETH Zurich), examiner
Prof. Dr. Hatice Altug (EPF Lausanne), co-examiner
Prof. Dr. Juerg Leuthold (ETH Zurich), co-examiner
Dr. Ferry Prins (Universidad Autónoma de Madrid), co-examiner

2018

Abstract

Spatial structuring of materials at the nanoscale can strongly modify their optical properties, such as transmission, reflection, and diffraction with respect to their macroscopically homogeneous counterpart. In particular, when they are periodically structured, light propagation, field localization and spontaneous emission can be more efficiently controlled thanks to scattering and interference phenomena. The use of such nanostructures is widely exploited in research areas like sensing, spectroscopy, integrated light sources or thermal emitters. Nevertheless, most nanostructured surfaces are tailored around one single frequency of interest and are therefore unable to provide enhancements, directionality or polarization-dependent properties to more than one colour simultaneously. This thesis aims to address this challenge by developing new concepts of plasmonic and photonic multiresonant antennas to tailor specific properties of light sources including their spectral, directional and polarization response.

First, exploiting the properties of surface plasmon polaritons and extraordinary optical transmission, we introduce a family of plasmonic directional multiresonant antennas that allows for polarization-resolved spectral sorting of fluorescent emission. Inspired by the single-resonant bull's-eye structure, we design multiresonant bull's eyes with polygonal periodic corrugations around a central nanoaperture. The multiresonant character is provided by introducing variations in the periodicity along the different axes of the structure. Moreover, the transmitted resonant color associated with each axis will acquire a unique linear polarization imposed by the axis orientation. We experimentally demonstrate that the resonant wavelengths of our structures can be directly mapped to the transmitted polarization while wavelength-dependent optical beaming is achieved. To explore the potential of these antennas in sensing applications and simplified detection schemes, we couple fluorescent emitters to the central nanoaperture using it as a nanocuvette and tailor the emission from such nanoscale light sources.

The explored multiresonant concept is then extended to plasmonic hole

arrays by modifying each periodicity axis individually and converting single-resonant square and hexagonal hole array structures into rectangular and oblique ones. Exploiting the polarization dependence of the different structure's axes, we show the simultaneous beaming of multiple colors addressable using polarization. These modified hole array configurations can be used to sort different incoming wavelengths or generate polarization-tunable spectral filters that allow for a wide range of transmitted colors. We demonstrate their working principle by sorting the fluorescent emission from colloidal quantum dots coupled to the antenna and proposing polarization-resolved spectral reconstruction of quasi-monochromatic input signals.

Multiresonant bull's-eye antennas can have intriguing applications also beyond the plasmonic extraordinary optical transmission concept. We demonstrate this by using template stripping to obtain direct patterning of colloidal quantum-dot (cQD) thin films. When nanostructured with linear grating patterns, these thin films generate highly directional and polarized emission. Combining the tunability of colloidal quantum dots with the polarization dependence of grating structures, we pattern multiresonant antennas on films composed by cQDs with different spectral properties to realize polarization-tunable on-chip light sources. More complex antenna designs consisting of multiple linear grating building blocks are then explored to engineer structured beams of fluorescence with elaborate intensity and polarization distributions.

Finally, 1D photonic crystals made up of thin films with a periodic modulation in their refractive index are explored as thermal emitters for thermophotovoltaic applications. Along with the numerical optimization of their spectral response to match energies that can be efficiently converted by a photovoltaic cell, the challenges of high temperature operation have guided the experimental optimization in terms of thermal stability and optical properties of the used refractory materials. Following the integration of the thin films on a microcombustor chamber for use in a hybrid thermophotovoltaic platform, we employ a home-built absorptivity/emissivity setup to characterize the nanostructure's efficiency as a high-temperature thermal emitter.

In summary, this thesis introduces plasmonic and photonic multiresonant

nanostructures with a highly directional and polarization-dependent character for use in applications ranging from sensing and spectroscopy to thermophotovoltaics.

Riassunto

La strutturazione dei materiali su scala nanometrica può modificare in maniera significativa le loro proprietà ottiche, come trasmissione, riflessione e diffrazione rispetto alla loro controparte macroscopicamente omogenea. In particolare, quando la strutturazione è di tipo periodico, la propagazione della luce, la localizzazione del campo elettromagnetico e l'emissione spontanea possono essere controllati in maniera più efficiente grazie ai fenomeni di scattering ed interferenza. L'uso di queste nanostrutture è ampiamente sfruttato in aree di ricerca che comprendono, ad esempio, la spettroscopia, la realizzazione di sensori, sorgenti luminose integrate o emettitori termici. Tuttavia, la maggior parte delle superfici nanostrutturate sono dedicate alla manipolazione di una singola frequenza di interesse e, pertanto, non sono in grado di fornire un aumento del segnale, direzionalità o una dipendenza dalla polarizzazione per più di un colore contemporaneamente. Questa tesi si propone di affrontare questo problema sviluppando nuovi concetti di antenne multirisonanti plasmoniche e fotoniche che possano manipolare diverse proprietà delle sorgenti di luce come la loro risposta spettrale, direzionale e di polarizzazione.

Inizialmente, sfruttando le proprietà delle risonanze plasmoniche di superficie e della trasmissione ottica straordinaria (EOT = extraordinary optical transmission), introduciamo una famiglia di antenne plasmoniche multirisonanti e direzionali che consente di differenziare emissioni fluorescenti con diversa frequenza utilizzando la loro polarizzazione. Ispirati dalla struttura chiamata "bull's eye" che sostiene un'unica risonanza, mostriamo il progetto di bull's eyes multirisonanti costituiti da corrugazioni periodiche poligonali attorno ad una nanoapertura centrale. Il carattere multirisonante è fornito introducendo variazioni nella periodicità lungo i diversi assi della struttura. Inoltre, ogni colore risonante trasmesso sarà associato ad un particolare asse ed acquisirà direzionalità ed una specifica polarizzazione lineare imposta dall'orientamento dell'asse. Per esplorare il potenziale di queste antenne come sensori che utilizzano schemi di rileva-

mento semplificati, dimostriamo che accoppiando emettitori fluorescenti alla nanoapertura centrale, che utilizziamo come nanocuvetta, è possibile modificare l'emissione di queste sorgenti di luce nanometriche.

Il concetto di multirisonanza presentato viene poi esteso ad insiemi ordinati di aperture plasmoniche (plasmonic hole arrays) dove, tramite la modifica della periodicità lungo ciascun asse, è possibile convertire le strutture con singola risonanza a matrice quadrata ed esagonale in strutture rettangolari e oblique. Sfruttando le proprietà polarizzanti di ciascun asse, dimostriamo la trasmissione simultanea di più colori distinguibili effettuando un'analisi della loro polarizzazione. Queste configurazioni modificate di hole arrays possono essere utilizzate per separare diverse lunghezze d'onda o generare filtri spettrali controllabili con la polarizzazione tramite i quali un'ampia gamma di colori trasmessi può essere realizzata. Per dimostrare il loro principio di funzionamento, separiamo le emissioni fluorescenti generate da punti quantici colloidal (colloidal quantum dots, cQDs) accoppiati all'antenna ed effettuiamo, tramite analisi della polarizzazione trasmessa, la ricostruzione spettrale di segnali quasi-monocromatici forniti in ingresso.

Le antenne bull's eye multirisonanti possono avere applicazioni interessanti anche oltre il concetto di EOT. Lo dimostriamo utilizzando il metodo "template stripping" per strutturare su nanoscala, in pochi step di fabbricazione, la superficie di film sottili composti esclusivamente da cQDs. Quando nanostrutturati con reticoli lineari, questi film sottili generano emissioni altamente direzionali e polarizzate. Combinando la sintonizzabilità spettrale dei cQDs con la polarizzazione imposta dalle strutture reticolate, abbiamo fabbricato antenne multirisonanti in un film composto di cQDs con diverse proprietà spettrali e realizzato sorgenti luminose su chip che possono essere controllate tramite polarizzazione. In seguito, presentiamo progetti di antenne più complesse costituite da molteplici blocchi lineari che possono generare fasci di fluorescenza con elaborate distribuzioni di intensità e polarizzazione.

Infine, cristalli fotonici 1D costituiti da film sottili che presentano una modulazione periodica nel loro indice di rifrazione vengono esplorati come emettitori termici per applicazioni termofotovoltaiche. Oltre all'ottimizzazione numerica della loro risposta spettrale per ottenere emissione

termica ad energie che possono essere efficientemente convertite da una cella fotovoltaica, la necessità di funzionamento ad alte temperature ha guidato l'ottimizzazione sperimentale, in termini di stabilità termica e proprietà ottiche, dei materiali refrattari utilizzati. Dopo aver integrato i cristalli fotonici su una camera di microcombustione, come parte di una piattaforma ibrida termofotovoltaica, abbiamo costruito un setup ottico per misurare la radiazione elettromagnetica assorbita/emessa e caratterizzato l'efficienza della nanostruttura come emettitore termico funzionante ad alte temperature.

In sintesi, questa tesi introduce nanostrutture multiresonanti plasmoniche e fotoniche con un carattere altamente direzionale e dipendente dalla polarizzazione per utilizzo in applicazioni che spaziano dalla realizzazione di sensori, fino alla spettroscopia e al termofotovoltaico.