

Streszczenie

W rozprawie zostały przedstawione zagadnienia inżynierii fotonicznej przy wykorzystaniu metamateriałów hiperbolicznych (HMM). Zaobserwowano, że struktury HMM zapewniają duże sprzężenie i mogą w niestandardowy sposób oddziaływać z falami elektromagnetycznymi ze względu na wysoką fotoniczną gęstość stanów. W pracy zaprojektowano i wykonano HMM Ag/TiO₂ oraz zbadano dwa istotne zjawiska fizyczne, tj. emisji spontanicznej i wzmacnionej powierzchniowo spektroskopii Ramana (SERS). Jest to szczegółowo opisane i zademonstrowane, że ten HMM zapewnia niezwykłe wzmacnienie emisji spontanicznej w dwóch odrębnych zakresach hiperbolicznych: w fotonicznym analogu osobliwości Van Hove (2-krotne wzmacnienie) i w reżimie typu II (6-krotne wzmacnienie). Okazało się, że HMM Ag/TiO₂ jest znakomitym wzmacniaczem dla SERS. Badano różne architektury HMM „epsilon-near-zero” (ENZ) oraz zjawiska fotoniki „epsilon-near-zero-and-pole” (ENZP). W szczególności pokazano bezprecedensowe ultraszybkie przełączanie w hiperbolicznej podwójnej strukturze ENZ o niskiej stratności. Metamateriał oparty na TiN/IT w zakresie O jest zgodny z CMOS. To urządzenie umożliwia przełącznik „on-off”, w dwóch efektywnych stanach ENZ, aż do skali femtosekundowej, w który może pracować jako ultraszybki modulator w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni z prędkością 3,5-2,27 THz. HMM zapewnia możliwość kolimacji światła w swoim ENZP, gdzie obserwowane jest zjawisko dyspersji. Tutaj wykazano, że HMM oparty na tlenku indu i tlenku cyny może aktywnie i odwracalnie dostroić zakres kolimacji w zakresie ponad 1100 nm w zakresie bliskiej podczerwieni, co prowadzi do dużego efektu kolimacji około 0,26 μm i wysokiej rozdzielcości aż do $\lambda/8,8$ p.

Co więcej, ten HMM charakteryzuje się niezwykłą nieliniowością kolimacji jak również dużą wartością współczynnika wzmacnienia Purcella (teoretycznie do 700.) Zjawiska te są ze sobą powiązane, narzucając kompromis między tymi dwoma zjawiskami. Daje to możliwość potencjalnych zastosowań, które mogą być oparte np. na grafeniu. HMM. Takie nowe fotoniczne HMM oparte na grafeniu oferują możliwość uzyskania aktywnych i rekonfigurowalnych modulatorów odbicia (bliskich 100%) w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, która jest również wrażliwa na kąt padania fali elektromagnetycznej i polaryzacji. Zbadano symulacyjnie właściwości HMM opartych na grafeniu oraz konstrukcję mikrownęki jako rezonatora Fabri-Perot. Zaobserwowano dużą wartość współczynnika odbicia w średniej podczerwieni, co daje możliwość zastosowania takiej struktury zarówno w aplikacji sensorycznej, jak i w bardziej złożonych konstrukcjach fotonicznych. Ponadto zbadano wydajność przełączania i wysoka rozdzielcość tej wnęki na bazie grafenu i SiO₂. Ta struktura posiada okresowość około 1 nm grafenu i 1 nm SiO₂. Ta struktura HMM pozwala osiągnąć modulację elektro/optyczną około 40 GHz przełączania prędkość ujawniająca również bezprecedensowy, odwracalny, przestrzenny reżim kanalizacyjny w górę do 5 μm, z wysoką rozdzielcością do $\lambda/1660$, co umożliwia nowe zastosowania w badaniach biologicznych w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni oraz nowej generacji szybkich optoelektronicznych przełączników.



Abstract

In this thesis various technological aspects concerning photonic manipulation at the nanoscale enabled by hyperbolic metamaterials (HMMs) have been investigated and critically addressed. It has been seen that HMMs devices provide a stunning coupling and control of electromagnetic waves fostered by high photonic density of states. In particular, an Ag/TiO₂ HMM has been designed and fabricated to study two relevant physical phenomena: spontaneous emission and surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). It is described in detail and demonstrated that this HMM provide a remarkable enhancement of the spontaneous emission in two distinct hyperbolic regime: in the photonic analog of the Van Hove singularity (2-fold enhancement) and in the Type II regime (6-fold enhancement). Furthermore, Ag/TiO₂ HMM turns out to be a tremendous amplifier for SERS. With different HMM architectures it has been investigated the epsilon-near-zero (ENZ) and epsilon-near-zero-and-pole (ENZP) photonics phenomena. In particular, it is shown an unprecedented ultra-fast switching in a low-loss double ENZ hyperbolic metamaterial based on TiN/ITO which is CMOS compatible. This device enable a switch on-off, in its two effective ENZ, down to femtoseconds scale which is capable to work as a ultra-fast modulator in visible and near-IR range at a speed of 3.5-2.27 THz. Yet, HMM provide the possibility to canalize light in its ENZP dispersion. Here it is demonstrated that indium-tin-oxide based HMM can actively/reversibly tune the canalization regime in more than 1100 nm in near-IR range leading to high collimation effect of about 0.26 μm and high resolution down to $\lambda /8.8$ beyond the Abbe limit. Furthermore, this HMM feature a remarkable nonlinearities in its canalization regimes to which high Purcell effect (up to 700) are associated, imposing a trade-off between these two phenomenon.

Conjointly, in this thesis are reported several potential applications empower by graphene-based HMMs. Such new photonic HMMs based on graphene offers the possibility of obtaining an active and reconfigurable reflection (close to 100%) modulators in near and mid infrared range which is also sensitive to the angle of incident and polarizations. Another graphene-based HMM architecture has been explored towards microcavity design. It is reported that via breaking the periodicity of the graphene-HMM, a Fabri-Perot modes arise as a narrow deep in reflectance in mid-infrared, giving the possibility to adopt such structure either in sensing application or in photonic chips.

Furthermore, it has been investigated the switching performances and high resolution with nanometer design of stacking graphene and silica. This structure possess a periodicity of about 1 nm of graphene and 1 nm of SiO₂. This HMM allows to achieve an electro/optical modulation of about 40 GHz switching speed revealing also an unprecedented reversible tunable canalization regime up to 5 μm, with high resolution down to $\lambda /1660$, envisioning a novel platform for biological studies in the near and mid infrared windows and a new generation of fast switching optoelectronics.

