

Streszczenie rozprawy doktorskiej

W niniejszej rozprawie zawarto wyniki symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych dotyczących wybranych struktur metamateriałów hiperbolicznych mających postać wielowarstwowych stosów zbudowanych z naprzemiennie ułożonych warstw metalu i dielektryka. Jako warstwy przewodzące wykorzystano metale – srebro (Ag), glin (Al), alternatywne materiały plazmoneczne – tlenek cynowo-indowy (ITO), tlenek indowo-galowo-cynkowy (IGZO), azotek tytanu (TiN), a także grafen. Z kolei rolę dielektryków pełniły warstwy tlenku krzemu (SiO_2) i tlenku hafnu (HfO_2).

W oparciu o dostępne dane materiałowe – korzystając z programu Lumerical – wykonano symulacje elektromagnetyczne metamateriałów hiperbolicznych. Co istotne, otrzymane wyniki potwierdziły hiperboliczną dyspersję efektywnej przenikalności elektrycznej badanych metamateriałów hiperbolicznych. Ponadto, w oparciu o symulacje współczynnika *Purcella* określono wzmocnienie emisji/absorpcji zamodelowanych struktur hiperbolicznych w zakresie VIS i IR. Na podstawie rezultatów symulacji wytypowano materiały i wytworzono kilkadziesiąt struktur metamateriałów hiperbolicznych, które następnie scharakteryzowano przy użyciu elipsometrii, mikroskopii sił atomowych, zaś parametry rozproszenia (transmitancja, reflektancja oraz absorbancja) metamateriałów hiperbolicznych zostały przebadane eksperymentalnie z wykorzystaniem spektrofotometru, uwzględniając różne kąty padania fali elektromagnetycznej. W celu wzmocnienia emisji zastosowano rodaminę B oraz specjalną mieszaninę ciekłokrystaliczną zawierającą w swoim składzie barwnik fluorescencyjny. Struktury hiperbolicznych metamateriałów modyfikowanych barwnikami scharakteryzowano w oparciu o pomiary widm fluorescencyjnych oraz metodą spektroskopii powierzchniowo wzmocnionego rozproszenia *Ramana* (SERS). Uzyskane wyniki eksperymentalne – zgodnie z oczekiwaniami – potwierdziły rezultaty otrzymane w wyniku symulacji numerycznych – wzmocnienie dla badanych struktur zostało zarejestrowane zarówno w metodzie fluorescencyjnej, jak i w metodzie SERS. Ponadto wykazano, że zwiększenie wzmocnienia emisji/absorpcji następuje wraz ze wzrostem ilości warstw w strukturze metamateriału hiperbolicznego, jak również ze wzrostem stężenia zastosowanego barwnika (emitera) naniesionego na powierzchnię struktury metamateriału hiperbolicznego. Tendencja ta jest obserwowana w metodzie fluorescencyjnej, jednakże w metodzie SERS istnieje pewne stężenie graniczne, powyżej którego sygnał wzmocnienia ulega „maksymalnemu wysyceniu”. W takim przypadku intensywności sygnałów w zmierzonych widmach dla wszystkich struktur – bez względu na ilość warstw występujących w strukturze – są do siebie bardzo zbliżone (uzyskuje się praktycznie identyczne widma SERS).

Uzyskane wyniki badań pokazują, że największe wartości wzmocnień wykazują wielowarstwowe struktury skonstruowane z dwudziestonanometrowych warstw Ag/ SiO_2 z wierzchnią warstwą SiO_2 wynoszącą 10 nm. Większe wartości wzmocnień otrzymano dla rodaminy B zastosowanej jako emiter aniżeli dla zastosowanej mieszaniny ciekłokrystalicznej.

Zaproponowane w pracy metamateriały hiperboliczne mogą przyczynić się do powstania supersoczewek, wysokowydajnych absorberów, jak również przestrajalnych urządzeń fotonicznych, umożliwiających zmianę gęstości stanów fotonicznych.

Słowa kluczowe: metamateriały hiperboliczne (HMMs), ciekłe kryształy (LCs), metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), współczynnik wzmocnienia (*Purcella*), gęstość stanów fotonicznych (PDOS).

Abstract

Dissertation contains the results of numerical simulations and experimental studies on selected hyperbolic metamaterials which take the form of multi-layer stacks composed of alternating metallic and dielectric layers. Silver (Ag), aluminum (Al), alternative plasmonic materials - indium tin oxide (ITO), indium gallium zinc oxide (IGZO), titanium nitride (TiN), and graphene were used as conducting layers. Furthermore, silicon oxide (SiO₂) and hafnium oxide (HfO₂) served as dielectrics.

Taking into account the available material data and using the Lumerical electromagnetic solver numerical simulations of hyperbolic metamaterials were performed. Importantly, the obtained results fully confirmed the hyperbolic dispersion of the effective permittivity of the examined hyperbolic metamaterials. In addition, the emission/absorption enhancement of the hyperbolic stacks in the VIS and IR range was determined employing Purcell coefficient simulations. Consequently, this allowed the selection of appropriate materials and dozens of hyperbolic metamaterial structures were fabricated, which were then characterized using ellipsometry, atomic force microscopy, while the scattering parameters (transmittance, reflectance and absorbance) of the hyperbolic metamaterials were tested experimentally using a spectrophotometer and taking into account different angles of incidence of the electromagnetic radiation. Rhodamine B and a special liquid-crystal mixture containing a fluorescent dye were used to enhance the emission. The structures of the dye-modified hyperbolic metamaterials were characterized based on measurements of fluorescence spectra and by surface-enhanced Raman scattering (SERS) spectroscopy. As expected, the acquired experimental results confirmed the results obtained from numerical simulations – the enhancement for the investigated structures was registered both in the fluorescence method and in the SERS method. In addition, it was shown that an increase in emission/absorption enhancement occurs with an increase in the number of layers in the stack, as well as with an increase in the concentration of the applied dye (emitter) applied to the surface of the hyperbolic metamaterial stack. This trend is observed in the fluorescence method, however, in the SERS method there is a certain limiting concentration above which the enhancement signal becomes "maximally saturated." In this case, the signal intensities in the measured spectra for all structures – regardless of the number of layers present in the structure - are very close to each other (virtually identical SERS spectra are obtained).

Finally, the obtained test results show that the highest gain values are achieved by multilayer structures composed of twenty-nanometer Ag/SiO₂ layers with a top ten-nanometer SiO₂ layer. Larger gain values were obtained for rhodamine B used as an emitter than for the liquid-crystal mixture.

The hyperbolic metamaterials proposed in this work can contribute to the creation of superlenses, high-performance absorbers, as well as tunable photonic devices that enable changing the photonic density of states.

Keywords: hyperbolic metamaterials (HMMs), liquid crystals (LCs), finite difference time domain method (FDTD), enhancement factor (Purcell factor), photonics density of states (PDOS)