

OPTIČNE METAPOVRŠINE

ZALA POTOČNIK

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Optične metapovršine so ultra tanki metamateriali sestavljeni iz ene plasti določeno urejenih nanoanten, ki izkazujejo posebne optične lastnosti. V članku najprej predstavijo plazmوني tip metapovršin in osnovne principe njihovega delovanja. V drugem delu se osredotočimo na uporabo metapovršin kot optičnih elementov za kontrolo faze, polarizacije in amplitude svetlobe. Na koncu pa obravnavamo še nekatere možne mehanizme za aktivno spreminjanje metapovršin in prilagajanje njihovih optičnih lastnosti.

OPTICAL METASURFACES

Optical metasurfaces are ultra thin metamaterials consisting of one layer of spatially arranged nanoantennas exhibiting special optical properties. The article first describes plasmonic type of metasurfaces and fundamental principles of their operation. The second part of the article is dedicated to applications of optical metasurfaces as optical elements for phase, polarization and amplitude control of light. Finally, they discuss some possible mechanisms of active control of metasurfaces and change of their optical properties.

1. Uvod

Za izdelavo optičnih elementov so že dolgo v uporabi različni materiali, katerih naravne lastnosti vplivajo na fazo in amplitudo svetlobe, ki potuje skozi ta material. Primer takšnega klasičnega optičnega elementa je leča, narejena iz stekla z določenim lomnim količnikom, ki zbere oz. razprši žarke. Pomanjkljivosti klasičnih optičnih elementov so, da so omejeni z lomnim količnikom materiala in zahtevajo makroskopsko strukturo elementov, tipično nekaj mm ali cm, pomembna je tudi natančna obdelava.

Alternativne rešitve znanstveniki iščejo s pomočjo metamaterialov. Metamateriali so umetno zgrajeni materiali iz periodičnih kovinskih ali dielektričnih nanostruktur, ki omogočajo izdelavo naprav z določenimi odzivi na svetlobo, zvočne valove in toplotne tokove, kakršni niso dosegljivi z naravnimi materiali [1]. Nadgradnja 3D metamaterialov so metapovršine, 2D metamateriali z debelino manjšo od valovne dolžine svetlobe, ki so sestavljeni iz ene ali nekaj plasti planarnih nanostruktur. Poleg novih lastnosti, ki jih imajo že 3D metamateriali, kot sta negativni lomni količnik in doseganje nevidnosti (možnost zakrivanja predmetov), je prednost metapovršin v tem, da so veliko lažje za izdelavo, saj gre za nanofabrikacijske tehnike, ki so že dobro razvite v industriji polprevodnikov. Poleg tega pa imajo zaradi zelo majhne debeline veliko manjše izgube energije zaradi ohmskega upora v primerjavi z bolj razsežnimi 3D metamateriali [2].

Metapovršine lahko ločimo v dve skupini glede na sestavo nanostruktur, ki jih imenujemo metatomi, iz katerih so sestavljene. Poznamo plazmonske (prevodniške) in dielektrične metapovršine. V tem članku se bomo omejili na plazmonske metapovršine. V drugem delu si bomo ogledali glavne aplikacije metapovršin za kontrolo faze, amplitude in polarizacije svetlobe. Nato bomo opisali nekaj novih optičnih elementov in pojavov kot so metaleče, elementi za kontrolo polarizacije svetlobe in metapovršinski hologrami. Na koncu pa bomo opisali tudi, s kakšnimi mehanizmi lahko spreminjamo strukturo metapovršin in s tem kontroliramo njihov optični odziv.

2. Principi delovanja in sestava plazmonske metapovršine

Plazmonske metapovršine temeljijo na nanostrukturah, ki so narejene iz kovin. Na proste elektrone v kovini lahko vpliva zunanje električno polje, njihov frekvenčni odziv na oscilirajoče polje pa opišemo

z Drudejevimi modelom, v katerem kovino obravnavamo kot plin prostih elektronov v mreži fiksnih pozitivnih nabojev. Frekvenčno odvisnost dielektrične funkcije v kovini podaja enačba

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

kjer je $\omega_p = \sqrt{\frac{n e^2}{m \varepsilon_0}}$ plazemska frekvenca. Tipične vrednosti plazemskih frekvenc za kovine so $\sim 10^{16}$ Hz, kar je v ultravijoličnem področju spektra svetlobe [3]. Kot vidimo, sta dielektrična funkcija in posledično tudi lomni količnik, ki je enak korenu dielektrične funkcije, kompleksni količini.

Za kovine je značilno, da imajo za frekvence vidne svetlobe veliko negativno vrednost realnega dela dielektrične funkcije in idealno čim manjšo vrednost imaginarnega dela, saj le ta prispeva k disipaciji energije. Za primer zlata za svetlobo z valovno dolžino 551 nm, kar ustreza $\hbar\omega = 2.25$ eV, je vrednost dielektrične funkcije enaka $\varepsilon = -6.308 + 0.4848i$ [4].

Poseben primer je razširjanje elektromagnetnega valovanja po meji med dielektrično snovjo in kovino, takšno razširjanje opisujejo površinski plazmoni polaritoni.

2.1 Površinski plazmoni polaritoni

Imamo mejo med dielektrično snovjo s konstantno realno dielektrično funkcijo ε_d in kovino s kompleksno dielektrično funkcijo $\varepsilon_k(\omega)$, ki je odvisna od frekvence, kot je navedeno v enačbi (1). Maxwelllove enačbe za nemagnetno snov (magnetna permeabilnost $\mu=1$) brez izvorov (torej nabojev in tokov) so

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu_0\mathbf{H} \quad \text{in} \quad \nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}, \quad (2)$$

divergenci obeh polj pa sta enaki nič. Pri zapisu enačb (2) smo pri odvajanju že upoštevali časovno odvisnost električnega in magnetnega polja, ki ima obliko $E(t) = E_0 e^{-i\omega t}$.

Obravnavajmo vpadno valovanje v TM načinu, torej z magnetnim poljem H , ki ima smer, ki je vzporedna z mejo med snovema in je pravokotna na vpadno ravnino svetlobe. Vzemimo, da je meja med snovema v ravnini xy pri $z = 0$, smer vpadnega valovnega vektorja pa je v ravnini xz . Nastavek za vpadno valovanje je torej

$$H(t, x, z) = H(z) e^{ikx} e^{-i\omega t},$$

enako pa velja za električno polje E . k označuje komponento valovnega vektorja, ki je vzporedna s površino. V TM načinu imata polji torej obliko

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ H \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{in} \quad \mathbf{E} = -\frac{1}{\omega\varepsilon\varepsilon_0} \begin{pmatrix} iH' \\ 0 \\ kH \end{pmatrix},$$

kjer ' označuje odvajanje po z . Iz enačb (2) lahko s še enim delovanjem rotorja zapišemo amplitudno enačbo za spreminjanje polja v smeri z :

$$H'' + \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \varepsilon H = k^2 H.$$

Enačba velja v vsaki snovi posebej, rešitev pa je eksponentno pojemanje magnetnega (in torej tudi električnega) polja v smeri osi z , torej pravokotno na mejo med snovema. Odvisnost lahko zapišemo kot

$$H(z) = e^{-\kappa_j |z|},$$

kjer indeks j predstavlja snov na posamezni strani meje ($j = k, d$) in smo označili

$$\kappa_d = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \varepsilon_d}$$

za odvisnost na strani dielektrika in

$$\kappa_k = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \varepsilon_k(\omega)}$$

na strani kovine. Realna dela obeh vrednosti κ_d in κ_k pa morata biti pozitivna, da opisujemo lokalizirani val, ki ne prodre v kovino, ampak potuje vzdolž meje z dielektrikom.

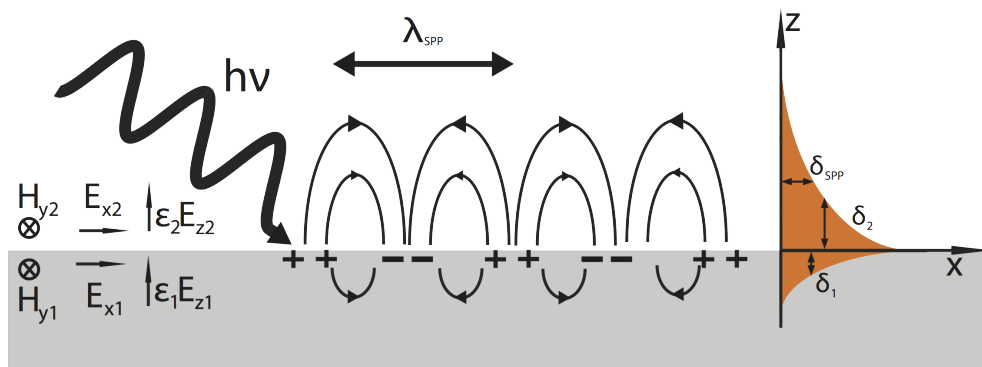
Zadostiti moramo tudi vsem robnim pogojem Maxwellovih enačb na meji med dvema snovema. V konkretnem primeru TM načina morata biti na meji zvezna H in $\frac{H'}{\varepsilon}$. Prvemu pogoju je pri $z = 0$ že zadoščeno, za zveznost $\frac{H'}{\varepsilon}$ pa sledi pogoj

$$\frac{-\kappa_d}{\varepsilon_d} = \frac{\kappa_k}{\varepsilon_k(\omega)}.$$

S kvadriranjem tega izraza dobimo disperzijsko enačbo za valovni vektor elektromagnetnega potovanja vzdolž meje med dielektrikom in kovino

$$k = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_k(\omega)}{\varepsilon_d + \varepsilon_k(\omega)}}. \quad (3)$$

Takim elektromagnetnim valovom, ki se širijo vzdolž meje med dielektrikom in kovino ter katerih frekvenca je dobljena iz disperzijske relacije (3), pravimo *površinski plazmoni polaritoni* (SPP). Razširjanje površinskih plazmonov polaritonov, ki so vzbujeni z vpadlo svetlobo, je shematsko prikazano na sliki 1.

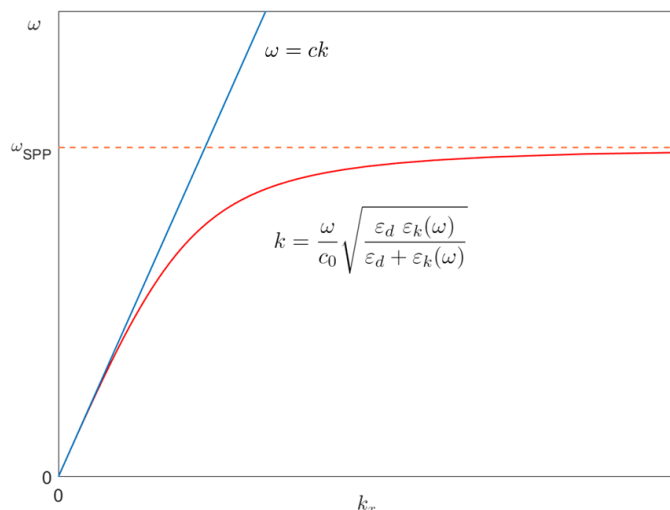


Slika 1. Shematski prikaz razširjanja vala gostote elektronov po meji med kovino in dielektrikom. Oscilacije elektronov in povzročeno elektromagnetno polje imenujemo površinski plazmon polariton. Na desni je prikazana eksponentna odvisnost intenzitete elektromagnetnega polja v odvisnosti od oddaljenosti od površine. Takšni valovi so lahko vzbujeni s svetlobo v vidnem delu elektromagnetnega spektra [5].

Površinski plazmoni polaritoni so kvazidelci, ki jih lahko razumemo kot fotone vpadne svetlobe sklopljene z oscilacijami prostih elektronov blizu površine kovine [6]. Če upoštevamo frekvenčno odvisnost dielektrične funkcije (enačba (1)) in zanemarimo dušenje ($\gamma = 0$), se frekvenca površinskih plazmonov polaritonov ω_{SPP} , ki jo dobimo iz enačbe (3), približuje asimptotični vrednosti

$$\omega_{SPP} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \varepsilon_d}}$$

in je manjša od kc_0 , kot je prikazano na sliki 2. Ker je frekvenca površinskih plazmonov polaritonov manjša od plazemske frekvence, lahko torej površinsko valovanje vzbudimo tudi s frekvencami, ki so nižje od ω_p in pri katerih valovanje (svetloba) ne more prodreti v kovino, na primer s svetlobo v vidnem spektru.



Slika 2. Disperzijska relacija za površinske plazmone polaritone brez izgub (rdeča), ki se približuje asimptotični vrednosti ω_{SPP} , z modro je označena disperzijska krivulja fotona.

Kot smo omenili na začetku, imajo kovine veliko negativno vrednost dielektrične funkcije, zaradi česar bo imel valovni vektor k vzdolž površine realno vrednost in valovanje se bo lahko širilo, čim manjša imaginarna komponenta pa prispeva k čim manjšemu dušenju, torej k čim daljši prepotovani poti vala. Če pogledamo primer zlata, bo pri svetlobi z valovno dolžino $\lambda = 551$ nm povprečna prepotovana pot površinskega plazmona polaritona po površini enaka $l = 5.6 \mu\text{m}$, kar je veliko v primerjavi z vdorno globino, ki je 16 nm.

Do zdaj smo ves čas obravnavali TM način, saj površinski plazmoni polaritoni v TE načinu ne obstajajo. Izpeljava je zelo podobna kot pri TM načinu, le da so robni pogoji Maxwellovih enačb na meji med kovino in dielektrikom drugačni: zahtevajo, da $\epsilon_d^2 = \epsilon_k^2$, čemur pa lahko zadostimo le, če sta $\kappa_d = \kappa_k = 0$, valovanje vzdolž površine torej ne obstaja.

2.2 Plazmonske metapovršine

Pri optičnih metapovršinah namesto homogene kovine uporabljamo kovinske nanodelce, ki jih pogosto imenujemo tudi nanoantene. Optični odziv tovrstnih metapovršin urejajo plazmonsko-polaritonske resonance nanodelcev. Pri interakciji kovinskih delcev s svetlobo zaradi zunanjega električnega polja (EM valovanje) na elektrone v kovini deluje električna sila, ki jih premakne iz ravnovesnega stanja glede na pozitivno nabite ione. To povzroči polarizacijo delca, kar generira notranje električno polje v nasprotni smeri, ki vrača elektrone nazaj v ravnovesno stanje.

Pri nanostrukturah, katerih dimenzija je veliko manjša od valovne dolžine vpadne svetlobe, vpadno EM valovanje (svetloba) ne povzroči površinskih plazmonov polaritonov, ampak vzbudi tako imenovane lokalizirane površinske plazmone. Gre za podoben princip, vendar v tem primeru ne pride do razširjanja valov, ampak so površinski plazmoni lokalizirani in vezani na ukrivljen kovinski objekt. Opišemo jih z diskretnimi, kompleksnimi frekvencami, ki so odvisne od velikosti in oblike nanodelca, vrste kovine, iz katere je nanodelec in dielektričnega okolja. [6] V časovno oscilirajočem električnem polju (svetloba) pride do resonančnega odziva, kjer je največja amplituda (polarizacija) pri resonančni plazmonski frekvenci posameznega nanodelca, največji možni fazni zamik med vpadno svetlobo in plazmanskimi oscilacijami nanoantene čez celotno območje resonančnega vrha pa je π . Absorpcija in sipanje svetlobe sta tako odvisna od frekvence vpadle svetlobe in resonančne plazmonske frekvence posameznega delca.

Odvisno od velikosti delca so lahko le ti polarizirani popolnoma (manjši delci) ali samo na površini (večji delci), kar lahko pri večjih delcih privede tudi do višjih momentov polarizacije in s tem več resonančnih frekvenc. Ker so večji delci polarizirani samo na površini, je resonančna frekvenca še bolj občutljiva na spremembe velikosti in oblike delca, prav tako pa tudi na njihovo orientacijo glede na zunanje polje [2] [7].

Za popoln nadzor valovne fronte vpadnega vala svetlobe potrebujemo možnost zamika faze vse do 2π [8]. Na ravni metapovršini sekundarni valovi, ki so odbiti ali prepuščeni skozi nanoantene, pridobijo različne fazne zamike in po Huygensovem principu med seboj interferirajo in tvorijo novo valovno fronto. Da bi povečali fazni zamik dipolne resonance z enim načinom (faza π) na 2π , so znanstveniki izumili nanoantene v obliki črke V (slika 3), ki podpirajo dva lastna načina nihanja v resonanci: simetričen in antisimetričen način. S superpozicijo obeh resonančnih načinov lahko dosežemo fazni zamik za 2π za tisti del prepuščene svetlobe, katere smer polarizacije je pravokotna na smer polarizacije vpadne svetlobe. Ker pa gre tukaj za zasuk polarizacije prepuščene svetlobe glede na vpadno polarizacijo, je izkoristek (razmerje intenzitet prepuščene in vpadne svetlobe) takšne oblike nanoanten po navadi nizek. [8] [9]

Da bi izboljšali izkoristek, so razvili še eno postavitev, ki deluje sicer samo v režimu, kjer opazujemo odbito svetlobo, in vključuje kovinsko ploščo, ki leži pod plastjo nanoanten in je od nje ločena s tanko dielektrično plastjo. Vpadna svetloba tako inducira nasprotno električne tokove na nanoantenah in kovinski plošči in s tem ustvari resonančno režo, ki poveča fazni zamik na 2π . V tem primeru gledamo izkoristek odbite svetlobe glede na vpadno, ki pa ima v nasprotju z V antenami enako polarizacijo kot vpadna, zato je tudi izkoristek večji. [2] [10] [11]

Ker plazmوني materiali zagotavljajo močen optični odziv, so bili izbrani za sestavo metapovršin v začetnih fazah raziskav. Vendar obstajajo tudi jasne omejitve pri uporabi takšnih materialov, energija svetlobe se namreč močno disipira zaradi upornosti kovine. Disipirana energija se pretvarja v termično, kar pomeni, da se lokalna temperatura na metapovršini lahko zelo hitro močno poveča. Zato se plazmonske nanostrukture hitro deformirajo oz. uničijo že pri razmeroma majhnih vhodnih energijah. To zmanjša učinkovitost naprav in jih omejuje pri mnogih praktičnih aplikacijah. Poleg tega se kot materiali za izdelavo plazmonske nanostrukture uporabljajo žlahtne kovine, kot sta srebro in zlato, ki so razmeroma drage [2].

Da bi prešli omejitve, ki se pojavljajo v kovinskih metamaterialih, se razvijajo nove metapovršine, narejene samo iz dielektričnih materialov. [12] [13] [14]

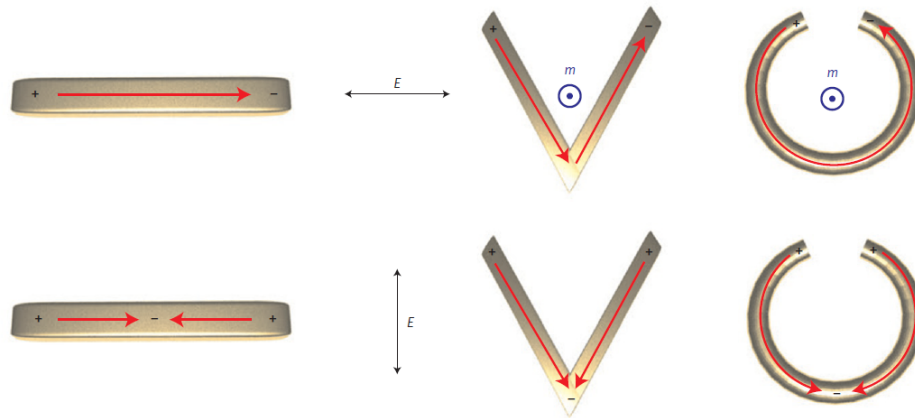
3. Pojavi in uporaba metapovršin

3.1 Ukrivljanje in fokusiranje svetlobe (metaleče)

Metapovršine lahko torej spremenijo fazo vpadne svetlobe takoj na površini in v primerjavi s klasično optiko, kjer se sprememba faze akumulira po celotni poti svetlobe skozi optični element, nudijo boljše rešitve za kontrolo faze na optično tanki plasti.

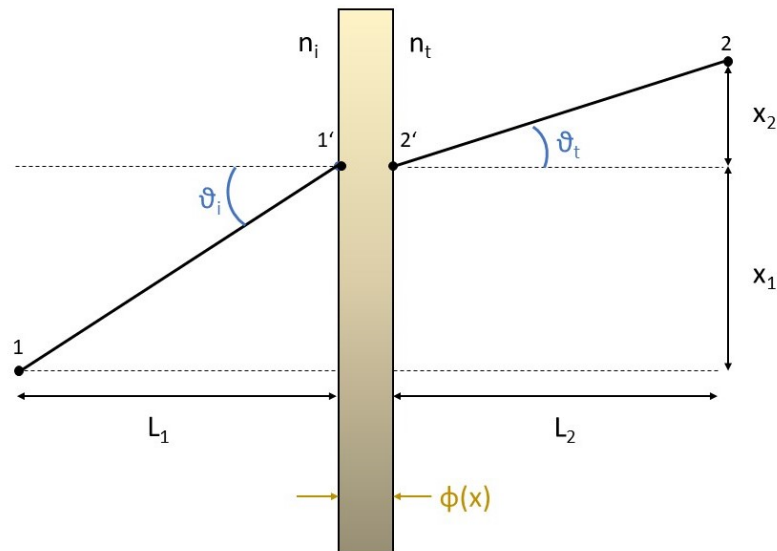
Osnovni pojav, ki ga lahko dosežemo z metapovršinami, je fazno-gradientna metapovršina. To je površina, kjer se faza prepuščene (oz. odbite) svetlobe linearno spreminja s koordinatami na ploskvi. Posledica tega je, da se žarki, ki vpadajo pod pravim kotom glede na površino, sipajo pod nekim manjšim kotom.

Podobno, kot opišemo lom in odboj svetlobe na meji dveh snovi s Snellovim (lomnim) zakonom, lahko za lom in odboj na metapovršinah s faznim gradientom uvedemo generaliziran Snellov zakon. Tako kot navadni Snellov zakon ga lahko izpeljemo s Fermatovim teoremom, ki pravi, da svetloba med dvema točkama potuje po tisti poti, za katero potrebuje najkrajši čas [15]. Razliko med klasičnim in generaliziranim Snellovim zakonom si lahko dobro predstavljamo, če si ogledamo Feynmanovo analogijo z reševalcem iz vode, ki rešuje utapljajočega človeka [2]. Ilustracija te pri-



Slika 3. Resonance v plazmonskih nanoantelah. Prehod iz palične nanoantene v anteno v obliki črke V. Različna lastna resonančna načina sta vzbujena za različni polarizaciji vpadnega električnega polja (E). Na skici je prikazana porazdelitev naboja v lastnih načinih ter ustrezni električni (rdeča) in magnetni (modra) dipolni moment. Na skrajni desni sta prikazani še nanoanteni v obliki črke C oz. U (split-ring resonator), ki imata poleg električnega tudi velik magnetni dipolni moment, kar zagotavlja magnetni odziv nanoantene tudi pri vidnih frekvencah. Magnetni odziv je pomemben pri ustvarjanju metamateriala z negativnim lomnim količnikom. Vir: [7]

merjave je prikazana na sliki 5a. Ker hitrosti plavanja v vodi in teka reševalca po kopnem nista enaki, izbere reševalec pot, ki vzame najmanj časa in je seveda sestavljena iz lomljene črte, ki se zlomi na meji med vodo in kopnim. To poznamo kot klasični lomni zakon za svetlobo, ki potuje v različnih medijih. V primeru metapovršine pa v analogiji dodamo na mejo med morjem in kopnim zid z višino, ki se linearno spreminja. Če privzamemo, da je čas, ki ga reševalec porabi za plezanje čez zid, premo sorazmeren z višino zidu, se pot reševalca spremeni, saj mora upoštevati tudi čas plezanja čez zid. S preprostim matematičnim izračunom, kjer minimiziramo čas potovanja, dobimo generaliziran Snellov zakon.



Slika 4. Skica k izpeljavi generaliziranega Snellovega zakona z naraščajočo fazno bariero na meji med dvema snovema.

Imamo dve snovi z lomnima količnikoma n_i in n_t , na njuni meji pa je naraščajoča fazna bariera (skica na sliki 4). Fazni premik se linearno spreminja s koordinato x

$$\Phi(x) = \Phi_0 + Kx,$$

Izvor vpadnega žarka je v točki (1), ki je od meje oddaljena za L_1 , žarek vpada na mejo pod kotom θ_i in žarek se lomi pod kotom θ_t , opazujemo pa ga v končni točki (2) na oddaljenosti L_2 od meje. Zanima nas, na kateri višini x_1 bo žarek prečil mejo ob konstantni poziciji točk (1) in (2), torej $L = L_1 + L_2 =$ fiksen in $x = x_1 + x_2 =$ fiksen. Fermatov princip pravi, da mora biti čas potovanja od točke (1) do (2) najmanjši, kar pa je ekvivalentno temu, da je celotna faza Φ_{tot} na tej poti minimalna

$$\Phi_{\text{tot}} = \int_1^2 d\Phi = \min.$$

Diferencial faze je enak

$$d\Phi = k_0 n(s) ds,$$

kjer je $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ valovni vektor svetlobe v vakuumu, $n(s)ds$ pa je diferencial optične poti svetlobe. Izračunamo celotno fazo na poti

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{tot}} &= \int_1^{1'} k_0 n_i ds + \int_{1'}^{2'} d\Phi + \int_{2'}^2 k_0 n_t ds \\ &= k_0 n_i \sqrt{x_1^2 + L_1^2} + k_0 n_t \sqrt{(x - x_1)^2 + L_2^2} + Kx_1 + \Phi_0. \end{aligned}$$

Izraz minimiziramo

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{\text{tot}}}{dx_1} = 0 &= \frac{k_0 n_i x_1}{\sqrt{x_1^2 + L_1^2}} - \frac{k_0 n_t (x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + L_2^2}} + K \\ \frac{K}{k_0} &= n_t \frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + L_2^2}} - n_i \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + L_1^2}} \end{aligned}$$

Če razmerje dolžin spremenimo v sinuse vpadnih kotov dobimo generaliziran Snellov zakon za lom (enačba (4))

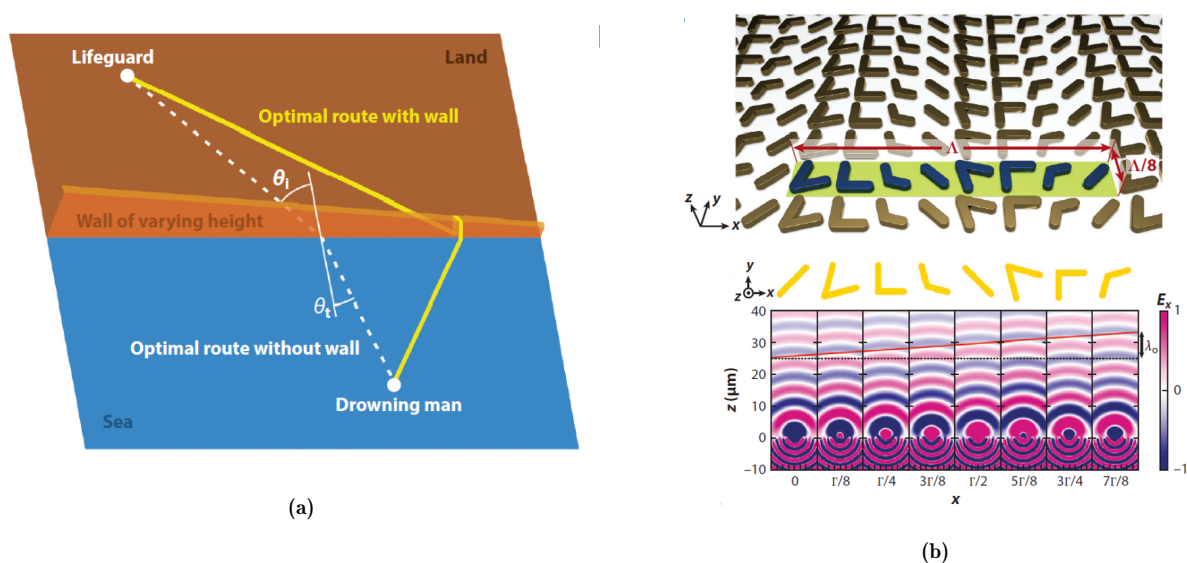
$$\sin(\theta_t) n_t - \sin(\theta_i) n_i = \lambda_0 \nabla \Phi / 2\pi, \quad (4)$$

$$\sin(\theta_r) n_i - \sin(\theta_i) n_i = \lambda_0 \nabla \Phi / 2\pi, \quad (5)$$

enačba (5) pa predstavlja generaliziran odbojni zakon, ki ga lahko izpeljemo na analogen način. Z $\nabla \Phi = K$ smo označili gradient faznega zamika, ki se ustvari vzdolž metapovršine [1].

Za prvo eksperimentalno realizacijo generaliziranega Snellovega zakona so bile uporabljene vrstice plazmonskih nanoanten v obliki črke V v srednjem in bližnjem infrardečem območju (slika 5b). Kot je razloženo v 2. poglavju, imajo tako oblikovane nanoantene dve plazmonski lastni stanji in s tem je lahko sipanemu valu, ki je prečno polariziran glede na vpadnega, dodana faza od 0 do 2π . Velikost dodane faze kontroliramo z orientacijo in obliko nanoanten, predvsem s spreminjanjem kota med krakoma. Kot je prikazano na sliki 5b, je osnovna celica metapovršine sestavljena iz osmih nanonaten, za linearen gradient pa mora vsaka naslednja nanoantena povečati fazo za dodatnih $\pi/4$. Kasneje so demonstrirali tudi uporabo metapovršin v odbiti svetlobi. Za nanoantene so postavili kovinsko ploščo, ločeno od nanoanten z dielektrično plastjo. S tako postavitvijo dosežemo, da nanoantene interagirajo s svojimi slikami na plošči in tako dobimo fazni zamik do 2π . Prednost te postavitve je, da je veliko bolj učinkovita, saj je intenziteta odbite svetlobe veliko večja od prepuščene pri prvi konfiguraciji, prav tako ostane polarizacija odbitega vala enaka polarizaciji vpadnega [7].

Metapovršine, ki vzpostavljajo fazni gradient v prepuščeni/odbiti svetlobi, efektivno lahko delujejo kot snovi z negativnim lomnim količnikom. Kako se žarek lomi oz. odbije v taki snovi je shematično prikazano na sliki 6b, lahko pa bi opisali, da lomljeni oz. odbiti žarek ne seka vpadne pravokotnice in ostane na isti vpadni polravnini (ki je omejena z vpadno pravokotnico), kot vpadni žarek.



Slika 5. (a) Primer utapljajočega se človeka in reševalca iz vode. Prikazuje primerjavo loma svetlobe na klasični meji med dvema sredstvom in z vključeno metapovršino (v analogiji jo predstavlja zid z spreminjajočo se višino). (b) Zgoraj: Ena celica metapovršine je sestavljena iz osmih nanoanten v obliki črke V z različno orientacijo in kotom med krakoma. Spodaj: Postavitev nanoanten podobna kot zgoraj. Valovna fronta, ki vpada vzporedno s površino, na drugi strani spremeni smer. Razdalja, ki jo je prepotovala svetloba na nasprotnih koncih celice, se razlikuje za λ_0 (valovno dolžino svetlobe v vakuumu), kar ustreza največjemu zamiku faze za 2π . Vir: [2]

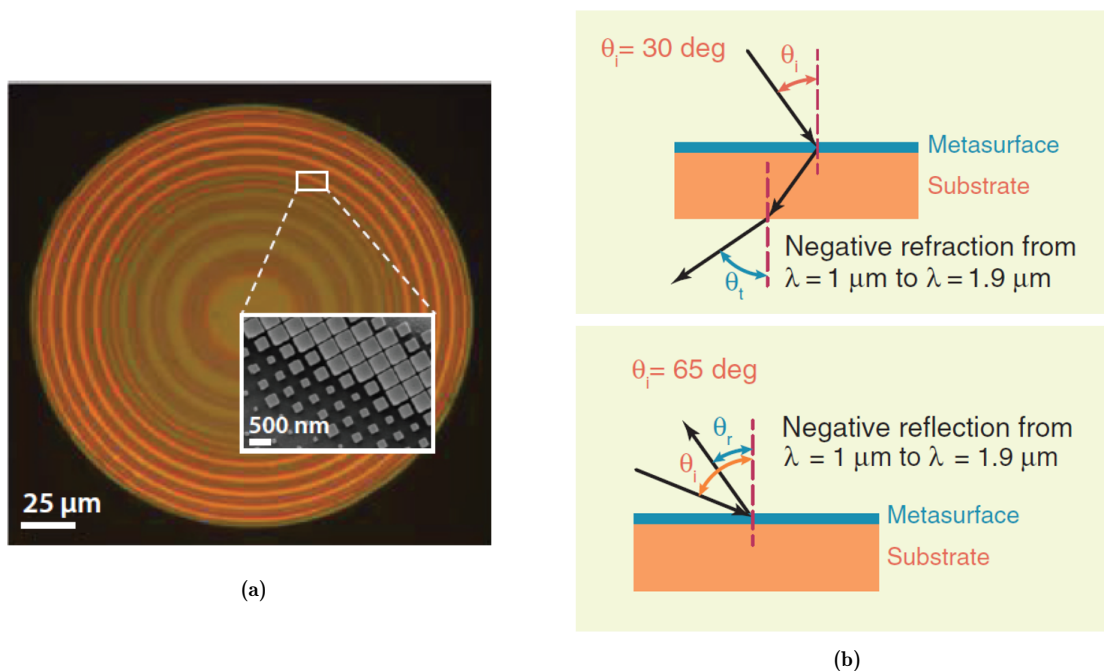
Pomembna uporaba možnosti kontrole faze prepuščene (oz. odbite) svetlobe je ustvarjanje ravnih leč na osnovi metapovršin, tako imenovanih metaleč, ki imajo enako funkcionalnost kot klasične leče. Metaleče so narejene tako, da tvorijo radialno simetrično strukturo in tako lahko tvorijo parabolični fazni profil, kar je prikazano na sliki 6a. Poenostavljeno si lahko predstavljamo, da vzamemo vrstice (oz. osnovne celice) iz nanoanten v obliki črke V za ustvarjanje fazno gradientne površine in jih postavimo pri različnih kotih, tako da posamezna vrstica kaže v radialni smeri. Na ta način dosežemo, da se pri vsakem kotu svetloba lomi proti središču leče, kar pomeni, da se svetloba lahko zbere v eni točki, kjer se te valovne fronte sekajo. Za metalečo z določeno goriščno razdaljo f lahko izračunamo, kakšen fazni zamik morajo ustvariti nanostrukture v vsaki točki metapovršine:

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{(x^2 + y^2) + f^2} - f), \quad (6)$$

kjer sta x in y koordinati na površini metaleče z izhodiščem v središču leče, λ pa je valovna dolžina vpadne svetlobe [16].

Velika prednost metaleč pred klasičnimi lečami je, da nimajo monokromatskih optičnih napak kot so sferična aberacija, koma in astigmatizem, ki so pri klasičnih lečah posledica nepopolne oblike leče. Zaradi tega pride pri klasičnih lečah do manjše ločljivosti, ker se svetloba z različnih delov leče zbere v različnih točkah. Problemi nastajajo tudi pri svetlobi, ki prihaja pod velikimi koti glede na optično os ali na rob leče, zato pri klasičnih lečah delamo v obosnem približku, ker so tam napake najmanjše. Pri metalečah pa lahko z natančno izdelavo nanoanten ustvarimo dober paraboličen fazni profil in zaradi tega delujejo z veliko resolucijo tudi daleč izven območja optične osi [2].

Glavni problem delovanja metaleč pa je velika odvisnost od valovne dolžine vpadne svetlobe. Določen vzorec nanoanten tako deluje samo za določeno barvo vpadne svetlobe, kar lahko vidimo tudi iz enačbe (6), ki kaže odvisnost goriščne razdalje f od valovne dolžine λ pri fiksnem polju faznih zamikov na metapovršini. Posledica tega je kromatična (barvna) aberacija. Za ta problem je bilo podanih več rešitev. Najbolj preprosta rešitev za demonstracijo naprav, ki delujejo za več valovnih dolžin je, da sestavimo več metapovršin, ki delujejo za različne valovne dolžine. Vzorci nanoanten



Slika 6. (a) Radialno simetrična struktura akromatske metaleče in njena SEM slika [2]. (b) Shematski prikaz negativnega lomnega kota θ_t (zgoraj) in negativnega odbojnega kota θ_r (spodaj). Eksperimentalno sta bila dosežena pri vpadnem kotu θ_i je 30° in 65° za svetlobo v bližnjem infrardečem območju in sicer za valovni dolžine od $1.0 \mu\text{m}$ do $1.9 \mu\text{m}$. Vir: [1]

za različne valovne dolžine so lahko pozicionirani na isti površini ali pa je metaleča sestavljena iz večih makroskopskih plasti, vsaka plast pa deluje za eno valovno dolžino. Obstaja tudi več bolj kompleksnih in naprednih načinov za povečanje pasovne širine valovnih dolžin pri katerih deluje metaleča, razvoj takšnih metaleč pa še aktivno poteka. Omenimo samo še način, kjer v eno osnovno celico postavijo več nanoanten (tako imenovane meta-molekule) in tako zagotovijo delovanje pri večih valovnih dolžinah [12].

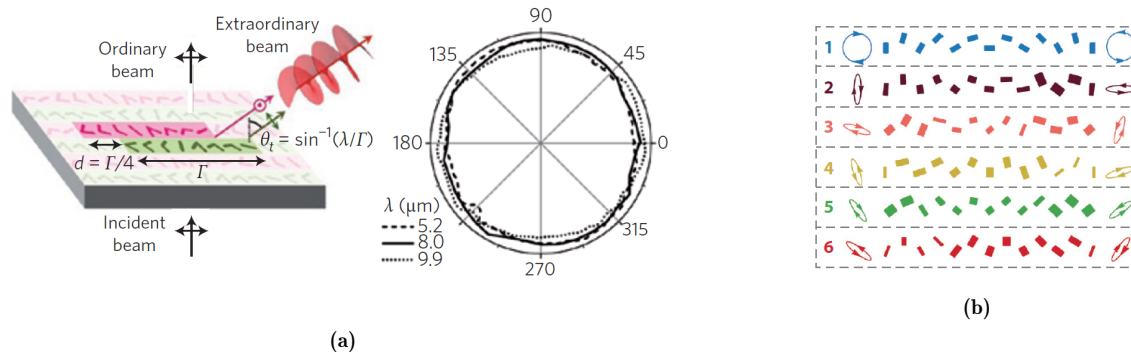
Drug problem je, da je delovanje metaleče pogosto odvisno od polarizacije vpadne svetlobe, kar je posledica nesimetričnih oblik nanoanten in postavitve le teh. Rešitev je visoko simetrična struktura, ki jo lahko dosežemo s cilindričnimi oblikami nanoanten in simetrično krožno postavitvijo.

3.2 Kontrola polarizacije svetlobe

Polarizacija kot fizikalna lastnost in prostostna stopnja svetlobe ima veliko vlogo v skoraj vseh vrstah optičnih sistemov. Zato so učinkovite metode kontrole polarizacije zelo pomembno področje v optiki in fotoniki. Z razvojem metapovršin, ki lahko kontrolirajo fazni zamik na ultra tanki površini, lahko pričakujemo tudi izjemno možnost manipulacije polarizacijskih stanj.

Retardacijske ploščice so široko uporabljene komponente optičnih sistemov, ki lahko spremenijo polarizacijo vpadne svetlobe. Temeljijo na principu, da ustvarijo fazni zamik med dvema pravokotno polariziranimi komponentama svetlobe, v klasični optiki so to ponavadi ploščice iz dvolomnih snovi. Metapovršine lahko delujejo s podobnim mehanizmom kot klasične ploščice, s tem da upravljajo z dvema lastnima načinoma vpadne svetlobe, ki ustrezata dvema polarizacijama [2]. Dva različna seta nanoanten na isti površini vplivata vsak na eno polarizacijo vpadne svetlobe, zaradi določenega zasuka oz. oblike nanoanten, in tako lahko ustvarita fazni zamik med posameznima komponentama [16].

Začetne konstrukcije retardacijskih ploščic so bile izvedene z že večkrat omenjenimi vrsticami nanoanten v obliki črke V. Narejene ploščice so delovale kot $\lambda/4$ ploščice, ki linearno polarizirano



Slika 7. (a) Levo: shematski prikaz metapovršinske $\lambda/4$ ploščice. Enotska celica je sestavljena iz dveh podenot (roza in zelena), ki sta med seboj zamaknjeni za četrtno dolžine podenote. Pri osvetlitvi z normalno linearno polarizirano svetlobo se generira krožno polariziran sipani žarek zaradi faznega zamika valovnih front, sipanih na različnih podenotah. Desno: Eksperimentalno izmerjena polarizacija sipanega žarka za različne valovne dolžine določena kot intenziteta pri različnih kotih linearnega polarizatorja na poti svetlobe. Vir: [7] (b) Shema postavitve šestih različnih vrstic nanoanten za pretvorbo sučnosti krožne polarizacije. Pri primerih 2-5 se spremeni tudi nagnjenost osi eliptično polarizirane svetlobe. Vir: [2]

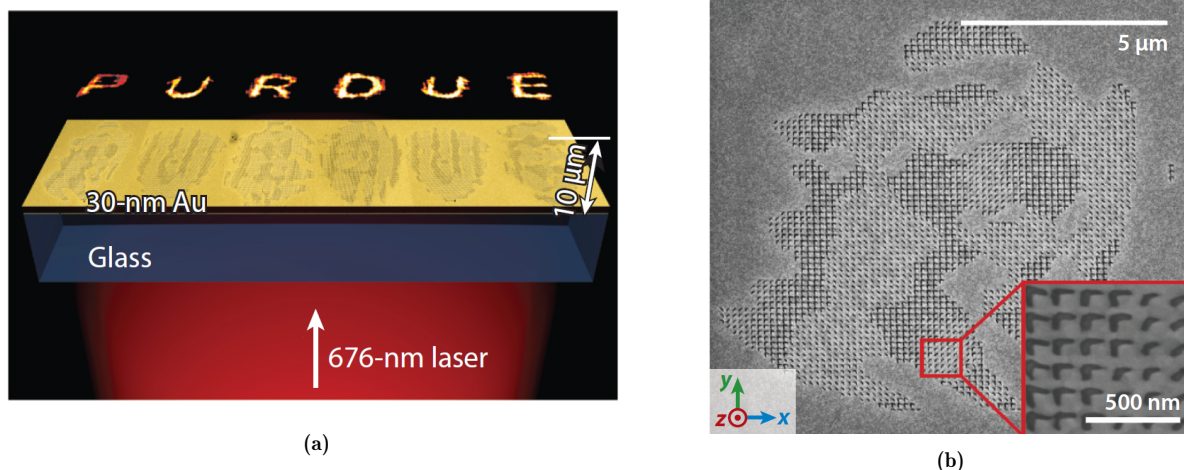
svetlobo spremenijo v krožno polarizirano svetlobo, s tem da ustvarijo fazni zamik $\Delta\Phi = \pi/2$ med ortogonalnima komponentama svetlobe. To so dosegli tako, da so osnovne celice, ki so enake kot pri fazno gradientni metapovršini, alternirajoče zamaknili za četrtno periode (oz. četrtno dolžine celice), kot je prikazano na sliki 7. Tako so sipani valovi, ki so ortogonalni, za $\pi/2$ iz faze in tako tvorijo krožno polarizirano svetlobo [10].

Z različnimi postavitvami nanoanten pa so dosegli tudi že pretvorbo med dvema linearnima polarizacijama, torej princip delovanja $\lambda/2$ ploščice, ter levo in desno sučno krožno polarizacijo [2]. Zaradi veliko svobode pri izbiri postavitve in oblike nanoanten, pa se razvoj nadaljuje v veliko bolj komplicirane elemente za kontrolo polarizacije. Raziskujejo se metapovršine, ki na različnih točkah na površini različno vplivajo na spremembo polarizacije, prav tako pa se razvijajo metapovršine, ki lahko neodvisno kontrolirajo fazo in polarizacijo svetlobe, s tem pa lahko z isto metapovršino dobimo kombinacijo različnih optičnih elementov, kot na primer leče in retardacijske ploščice [12].

3.3 Metapovršinski hologrami

Naraščajoč trend virtualne realnosti vodi k vedno večjim zahtevam po učinkovitih metodah 3D prikaza slik. Zato je veliko interesa v holografiji, optičnemu pristopu k snemanju in prikazu 3D slik. Tradicionalni holografska tehnika temelji na interferenci koherentnega referenčnega žarka in objektnega žarka, da ustvari amplitudni hologram, ki lahko reproducira 3D sliko objekta, če je prisoten bralni žarek. Pomanjkljivost takih hologramov je majhna svetlost, ki je posledica tega, da poleg prave slike nastane še konjugirana slika.

Te pomanjkljivosti lahko odpravimo z metapovršinskimi hologrami, ki lahko kontrolirajo fazo na nano skali in tako odstranimo konjugirano sliko. Primer metapovršinskega holograma je prikazan na sliki 8a. Prostorsko razporejene nanoantene (slika 8b) so uporabljene, da ustvarijo ustrezno fazo (0 do 2π) in amplitudo izhodnega žarka, ki ga lahko preberemo in prikažemo hologram. S kontrolo polarizacije lahko ustvarimo holograme, ki prikazujejo različni sliki za različni polarizaciji, z bolj kompliciranimi strukturami pa lahko vplivamo tudi na barve v hologramu [12]. Naslednji velik izziv je narediti holograme, ki niso statični, kar spodbuja razvoj aktivno adaptivnih metapovršin.



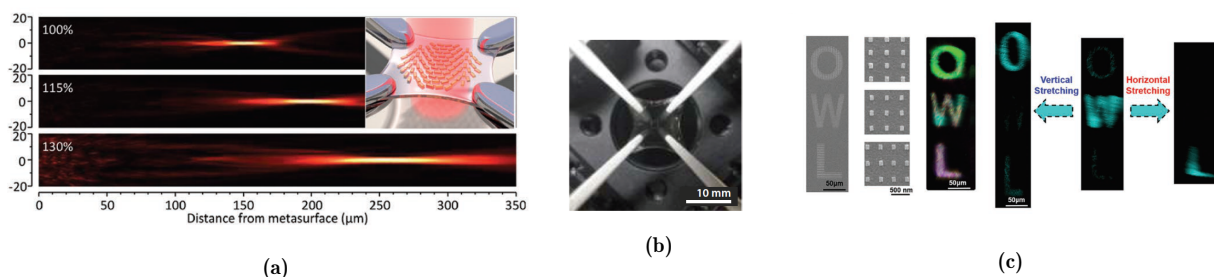
Slika 8. (a) Metapovršinski hologram, ki generirano sliko "PURDUE", ko ga osvetlimo s svetlobo z $\lambda = 676$ nm. Vir: [2] (b) SEM slika metapovršinskega holograma za črko P. Spodaj desno vidimo, da so gradniki nanoantene v obliki črke V. Vir: [2]

4. Aktivno adaptivne metapovršine

V zadnjem času je v modernih optičnih sistemih v porastu potreba po nastavljivih odzivih oz. odzivih z možnostjo preklopa vodenih z zunanjimi spremembami. Takšna potreba vodi k napravam, ki jih lahko aktivno adaptiramo in nastavljamo njihovo delovanje. Pomanjkljivost metapovršin je njihov fiksni odziv, ko so enkrat izdelane. Zaradi tega se pospešeno iščejo rešitve za aktivno adaptivne oz. nastavljive metapovršine. V različnih pristopih se uporablja materiale, katerih optične lastnosti se lahko spreminjajo z zunanjimi spremembami, kot so mehanska sila, toplota, optično, magnetno in električno polje.

Pri mehanskem spreminjanju odziva metapovršine so nanoantene nanešene na prožen substrat. Pri raztezanju substrata se razmiki med nanoantunami spremenijo, primer je prikazan na sliki 9. Ker optične lastnosti metapovršine izvirajo tako iz postavitve kot tudi iz razmikov med nanoantunami, se pri takšni obremenitvi lahko spremenijo. [2]

V eksperimentalnem primeru so ustvarili metapovršino z nastavljivim faznim gradientom. Ko so raztezali substrat, so dobili nastavljiv odbojni kot, ki je variiral med 11.4° in 14.9° . Na podlagi tega so sestavili tudi ravno lečo, prikazano na slikah 9a in 9b, ki so ji lahko z raztezanjem spreminjali goriščno razdaljo. [17]



Slika 9. (a) Izmerjeni profil intenzitete svetlobe raztegljive leče, ki se ji z raztezanjem spreminja valovna dolžina. Desno zgoraj: shematski prikaz raztegljive metaleče z zlatimi nanoantunami. Vir: [17] (b) Fotografija raztegljive metaleče. Vir: [2] (c) Elastična sila omogoča dinamično spremembo slike metapovršine. Levo (tri): SEM slike in slika v beli svetlobi nanešenih vzorcev nanoanten pred deformacijo. Desno (tri): dark-field slike ko je metapovršina obremenjena z različnimi silami. Vir: [17]

Spreminjanje lastnosti materiala s spremembo zunanjega polja je zelo pogosto uporabljeno pri

grafenu, kjer z dodajanjem zunanje napetosti spremenimo gostoto nosilcev naboja in tako tudi optične lastnosti materiala. Na tem principu so ustvarili električno nastavljivi absorber, ki se lahko uporabi v optičnem modulatorju. Raziskujejo se tudi metapovršine iz drugih materialov, primer tega je ITO, ki mu lahko s spreminjanjem pritisnjene napetosti močno spremenimo permitivnost in s tem refleksijski spekter [17]. V študiji so za svetlobo pri valovni dolžini $1.48 \mu\text{m}$ dosegli spremembo reflektivnosti iz 95 % na skoraj nič [2].

5. Zaključek

Metapovršine v obliki ultra tankih površinskih plasti zagotavljajo kontrolo različnih lastnosti svetlobe, kot so faza, polarizacija in amplituda. Predstavljajo alternativo klasičnim optičnim elementom. Njihove optične lastnosti izvirajo iz prostorske razporeditve različnih nanoanten na skali, manjši od valovne dolžine svetlobe. Zaradi eksotičnih optičnih lastnosti metapovršin, ultra majhni debelini in razmeroma enostavni izdelavi, so metapovršine privlačne za aplikacije na različnih področjih, naj omenim le biomedicinsko zaznavanje in slikanje ter optične komunikacije, poleg tega pa ima velik potencial njihova uporaba v različnih napravah, kot so termični detektorji in laserji.

Poleg tega metapovršine pomagajo pri raziskovanju mnogih fizikalnih, večinoma kvantnih pojavov, ki do zdaj niso bili eksperimentalno izmerjeni. V seminarju se z njimi nisemo ukvarjali, ker so teme obsežne in zahtevne, vendar naj omenimo nekaj pojavov, ki se jih raziskuje. Izmerili so fotonski spinski Hallov efekt, pretvorbe spinske in tirne vrtilne količine fotonov, metapovršine so uporabljene pri meritvah oddaljene kvantne interference, uporabljajo se na področju raziskav kvantne komunikacije in meritvah kvantnih stanj in še bi lahko naštevali. [2]

Raziskave na področju metapovršin hitro napredujejo, zanimanje za področje raste. Nekaj izzivov na tem področju v prihodnje: raziskave novih sintetičnih materialov z zanimivimi lastnostmi, kot so grafen, ITO, VO_2 in titanov nitrid in njihova uporaba v sestavljanju metapovršin, tako da bi metapovršine dobile še nove lastnosti in funkcionalnosti. Drug izziv je ustvarjanje metapovršin, ki delujejo v širokem pasu valovnih dolžin in pa aktivno prilagodljive metapovršine. Do zdaj so se večinoma ukvarjali z eno funkcionalnostjo metapovršine in eno plastjo nanoanten, razvoj pa je zdaj usmerjen v doseganje več različnih funkcionalnosti hkrati in z večimi plastmi nanoanten.

Čeprav je malo verjetno, da bodo optične metapovršine v celoti zamenjale klasične optične elemente, pa so pomemben korak v zdajšnji fazi razvoja tudi raziskave možnosti integracij metapovršin v že obstoječe sisteme in industrijska izdelava le teh.

LITERATURA

- [1] A. V. Kildishev, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, *Planar Photonics with Metasurfaces*. Science **339**, 1232009 (2013), doi: 10.1126/science.1232009.
- [2] S. Chang, X. Guo in X. Ni, *Optical Metasurfaces: Progress and Applications*. Annu. Rev. Mater. Res. **48**, 7.1 (2018), doi: 10.1146/annurev-matsci-070616-124220.
- [3] R. Podgornik in A. Vilfan, *Elektromagnetno polje*, Matematika - fizika : zbirka univerzitetnih učbenikov in monografij št. 51 (DMFA - založništvo, Ljubljana, 2014).
- [4] P. Hertel, *Continuum Physics*. (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012).
- [5] *Surface plasmon polariton* (2021), spletna stran: https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_plasmon_polariton [ogled: 10.3.2021].
- [6] A. V. Zayats in dr., *Nano-optics of surface plasmon polaritons*. Phys. Rep. **108**, 131 (2005). doi: 10.1016/j.physrep.2004.11.001.
- [7] N. Meinzer, W. L. Barnes in I. R. Hooper, *Plasmonic meta-atoms and metasurfaces*. Nature Photonics **8**, 889 (2014), doi: 10.1038/nphoton.2010.247.
- [8] Yu N, Genevet P, Kats MA, Aieta F, Tietienne J-P in dr., *Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction*. Science **334**, 333 (2011). doi: 10.1126/science.1210713.
- [9] F. Monticone, N. Mohammadi Estakhri, A. Alu, *Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen*. Physical Review Letters. **110**, 203903 (2013). doi: 10.1103/PhysRevLett.110.203903.

- [10] H. Chen in dr., *A review of metasurfaces: physics and applications*. Rep. Prog. Phys. **79**, 076401 (2016), doi: 10.1088/0034-4885/79/7/076401.
- [11] A. Pors, S. I. Bozhevolnyi, *Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection*. Opt. Express **21**, 27438 (2013). doi: 10.1364/OE.21.027438.
- [12] S. M. Kamali in dr., *A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control*. Nanophotonics **7**, 1041 (2018), doi:10.1515/nanoph-2017-0129.
- [13] Q. Zhao in dr., *Mie resonance-based dielectric metamaterials*. Materials Today **12**, 60 (2009), doi: 10.1016/S1369-7021(09)70318-9.
- [14] A. C. Overvig, S. Shrestha, S.C. Malek in dr., *Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase*. Light Sci Appl **8**, 92 (2019). doi: 10.1038/s41377-019-0201-7.
- [15] I. Drevenšek in M. Vilfan. *Optika: Učno gradivo za študente Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, Delovna verzija*. (2021).
- [16] Y. Zhao in dr., *Recent advances on optical metasurfaces*. J. Opt. **16**, 123001 (2014), doi: 10.1088/2040-8978/16/12/123001.
- [17] L. Kang in dr., *Recent Progress in Active Optical Metasurfaces*. Adv. Optical Mater. **7**, 1801813 (2019). doi: 10.1002/adom.201801813.
- [18] *Mie scattering* (2021), spletna stran: https://en.wikipedia.org/wiki/Mie_scattering [ogled: 14.3.2021].
- [19] *Plasmon* (2021), spletna stran: <https://en.wikipedia.org/wiki/Plasmon> [ogled: 10.3.2021].
- [20] *Localized surface plasmon* (2021), spletna stran: https://en.wikipedia.org/wiki/Localized_surface_plasmon [ogled: 13.3.2021].
- [21] *Fundamentals and Applications of Nano Silicon in Plasmonics and Fullerines*. Elsevier, 2018. ISBN: 978-0-323-48057-4.
- [22] D. Neshev in I. Aharovich, *Optical metasurfaces: new generation building blocks for multi-functional optics*. Light Sci Appl **7**, 58 (2018). doi: 10.1038/s41377-018-0058-1.
- [23] X. Ni in dr., *An ultrathin invisibility skin cloak for visible light*. Science. **349**, 1310 (2015). doi: 10.1126/science.aac9411.