

# Metamaterijali s negativnim indeksom loma

---

**Perić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:585484>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni preddiplomski studij**

**METAMATERIJALI S NEGATIVNIM INDEKSOM  
LOMA**

**Završni rad**

**Ivan Perić**

**Osijek, 2016.**

## Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Opis zadatka.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KONCEPT METAMATERIJALA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Osnovne jednadžbe i parametri materijala.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1. Permitivnost i permeabilnost.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2. Indeks loma i impedancija.....</b>	<b>10</b>
<b>3. SINTEZA I SVOJSTVA METAMATERIJALA S NEGATIVNIM INDEKSOM LOMA.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Negativni indeks loma.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Sinteza metamaterijala s negativnim indeksom loma.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1. Negativna permitivnost.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.2. Negativna permeabilnost.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.3. Stvaranje DNG metamaterijala.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Svojstva DNG metamaterijala.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1. Pravilo lijeve ruke.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2. Valovi unazad.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.3. Pojačanje iščezavajućih valova.....</b>	<b>27</b>
<b>4. RAZVOJ I PRIMJENA METAMATERIJALA.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Savršena leća.....</b>	<b>30</b>
<b>5. SIMULACIJA.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1. Kreiranje meta struktura u HFSS-u.....</b>	<b>32</b>
<b>5.2. Rezultati .....</b>	<b>34</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>41</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>42</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>42</b>
<b>Životopis.....</b>	<b>43</b>

**Prilozi.....44**

## **1. UVOD**

Iako je njihovo postojanje teorijski pretpostavljeno i dokazano još prije 40-ak godina, sve do nedavno nije postojala tehnologija koja bi omogućila u praksi dokazivanje postojanja metamaterijala. Kako će se pokazati u ovo radu, sam pojam metamaterijali odnosi se na čitav niz novih tehnologija koja daju svojstva kakva ne postoje u prirodi. Ovaj rad će se bazirati isključivo na one metamaterijale koji pokazuju svojstvo negativnog indeksa loma, dakle samo na one s istodobno negativnim vrijednostima permitivnosti i permeabilnosti. Teorijski će biti obrađeno njihovo postojanje te, u okviru poznatih fizikalnih zakona, pojašnjeni razlozi njihovih svojstava. U računalnom programu biti će realizirane neke strukture, čiji je cilj simulacijski pokazati ponašanje EM vala u takvom sredstvu.

U 2. poglavlju će biti pojašnjen koncept metamaterijala, te za indeks loma bitna svojstva običnih materijala. U 3. poglavlju riječ će biti o svojstvima metamaterijala s negativnim indeksom loma, te što je potrebno da se dobiju takva svojstva. Također, biti će govora o nekoliko najznačajnijih svojstava metamaterijala, te uspoređena u odnosu na obične materijale. Sva svojstva biti će potvrđena fizikalnim izrazima.

U 4. poglavlju, tema je trenutno stanje razvoja i upotrebe metamaterijala, kao i potencijal koji imaju. Bit će rečeno i nešto o najzastupljenijoj primjeni metamaterijala s negativnim indeksom loma, području optike, odnosno stvaranja savršenih leća.

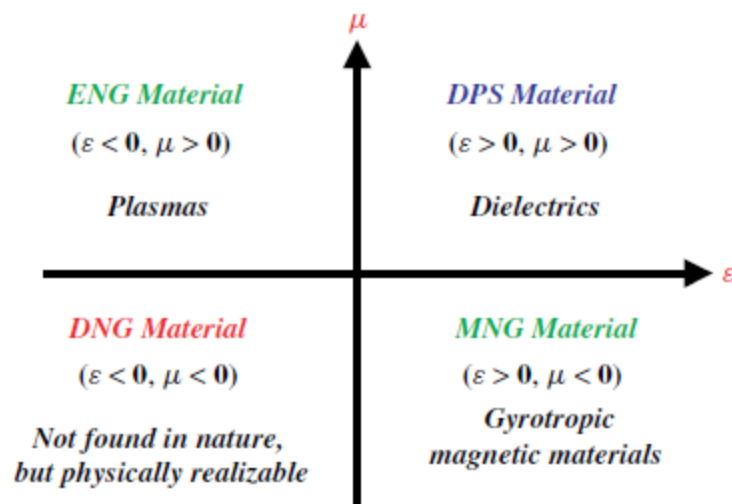
Konačno, u 5. poglavlju, detaljnije će se pojasniti nastanak jedne ćelijske strukture metamaterijala, kao i rezultati simulacije.

### **1.1. Opis zadatka**

Istražiti i obraditi teorijsku osnovu i principe funkcioniranja metamaterijalnih struktura. Istražiti područje primjene, te trenutno stanje razvoja i primjena metamaterijala. Načiniti simulacijsku analizu propagacije EM vala kroz metamaterijal s negativnim vrijednostima permeabilnosti i dielektričnosti.

## 2. Koncept metamaterijala

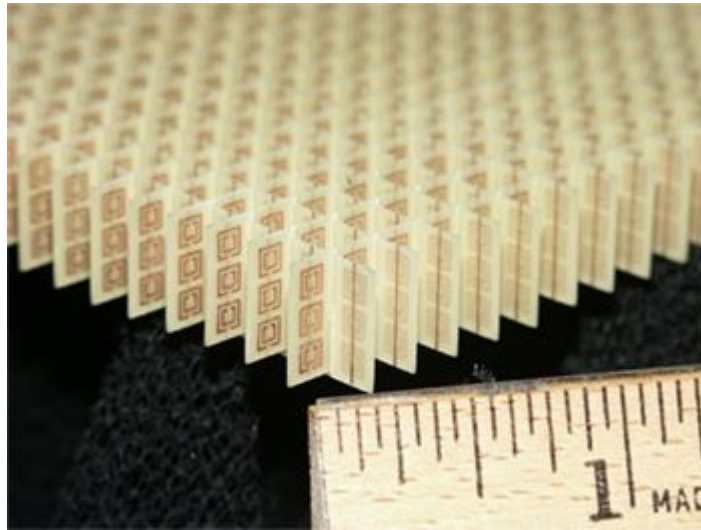
Odziv sustava na prisutnost elektromagnetskog polja, uvelike ovisi i svojstvima materijala uključenih u sustav. Zna se da seta svojstva opisuju tako što definiraju parametri - permitivnost ( $\epsilon$ ) i permeabilnost ( $\mu$ ) tih materijala. Definiranje tih parametara ujedno omogućuje i sljedeću klasifikaciju materijala (slika 2.1)



Sl.2.1 – Klasifikacija materijala prema [1].

Sredstva s pozitivnom i permitivnošću i permeabilnošću se označuju kao DPS (prema engl. Double Positive Materials - dvostruko pozitivna sredstva), i u njih se ubraja većina materijala u prirodi, tzv. dielektrici. Sredstva s permitivnosti manjom od nula i permeabilnosti većom od nula ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ) se označuju kao epsilon-negativna, ENG (prema engl. Epsilon Negative). Tu spadaju mnogi plasmanski materijali, kao i npr. zlato i srebro u infracrvenom i vidljivom spektru svjetla. Sredstva s permitivnosti većom od nula i permeabilnosti manjom od nula ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ) se označuju kao mi-negativna „MNG (prema engl. Mu Negative). Tu spadaju optički izomeri kod kojih je moguć Faradejev efekt, npr. Žirotropski magnetski materijali (engl. Gyrotropic magnet materijals [1]). Za materijale s istodobno negativnom permitivnosti i permeabilnosti, postoji više naziva i terminologija: „lijevo-orijentirani“ mediji, LHM (engl. „Left - Handed“ Media); sredstva s negativnim indeksom loma, NIM (prema engl. Negative Index Materials); sredstva s obrnutim smjerom valova (engl. backward-wave media“) i dvostruko negativni metamaterijali, DNG (prema engl. Double-Negative Metamaterials).

Ne postoji točna, opće prihvaćena, definicija koja se može dati kao odgovor na pitanje – „Što je metamaterijal?“.



**Sl. 2.2.** - *Struktura metamaterijala s negativnim indeksom loma, konstruirana od bakrenih SRR-a i žica na pločici od fiberglasa. Cijela ploča se sastoji od 3 puta 20x20 ćelijskih jedinica, i veličine je 10mm x 100mm x 100mm.*

Prvi koji je upotrijebio naziv *metamaterijal*, kao takav, bio je Roger M. Walser, (University of Texas, Austin). On je 1999. definirao metamaterijal kao „*makroskopski spoje, koji ima umjetnu, trodimenzionalnu, periodičku ćelijsku strukturu dizajniranu tako da bi dobili zadovoljavajuću kombinaciju, nepostojeću u prirodi, dvaju odziva na specifičnu pobudu*“ [1].

Ta definicija otkriva prirodu metamaterijala, ali ih ne opisuje najtočnije, jer metamaterijal se može opisati kao umjetno i s ciljem proizvedeni spoj, čija svojstva potiču iz njegove fizičke strukture, a ne iz kemijskih svojstava. Iako se svi ne slažu s tim, on sadrži svojstva koja se ne nalaze u prirodi, iako je moguće napraviti metamaterijal koji će se ponašati kao materijal iz prirode, no to nema smisla jer je lakše uzeti gotov materijal iz prirode čija svojstva se žele oponašati. Možda najvažnije, i najzanimljivije svojstvo metamaterijala je to što on ima svojstva i mogućnosti koja nemaju materijali od kojih je napravljen, npr. Materijal A sa svojstvom A, miješamo s materijalom B koji ima neko svojstvo B, i dobijemo svojstva C, D i E, koja ne sadrži ni materijal A ni materijal B.

Tako se dolazi do moguće najtočnije definicije što bi mogao biti metamaterijal – složeni materijal, namjerno stvoren da bi imao svojstva materijala koja drugačije nisu ostvariva s prirodnim materijalima. Zato je zapravo i poželjno koristiti metamaterijal, jer se željena svojstva ne mogu ostvariti nikako drugačije.

Elektromagnetske metamaterijale se dijele na dvije glavne skupine:

### **1. Rezonantni**

Metamaterijali kod kojih postoji neki titrajući (rezonantni) element, nekakva oscilirajuća struja (engl. Oscillating current) ili slično, ali čija je periodičnost premala da bi se val raspršio između susjednih elemenata. Dakle, on nije valno raspršujući fenomen, te val sam po sebi nije rezonantan. Takav metamaterijal obično u svojoj strukturi sadrži metalne elemente, i val koji prolazi kroz njega stvara oscilirajuće struje zbog kojih element zrači sekundarne valove, koji onda zbog pomaka u fazi u kombinaciji s primijenjenim valom, mijenjaju odziv na takvu pobudu. Perioda im je obično oko  $1/10$  valne duljine primijenjenog vala. Na njima će biti sva pažnja pri izradi ovog rada.

### **2. Nerezonantni**

Metamaterijali kod kojih nema struje titranja, niti odbijanja i skakanja valova, njihova svojstva jednostavno proizlaze iz same strukture. Njihova perioda je puno manja od valne duljine primijenjenog vala, može biti i do  $1/1\ 000\ 000$  dijela, ali metamaterijal će se ponašati identično kao i kad mu je valna duljina  $1/10$  valne duljine vala. Po mjerenjima vidljivim u [2], daju nerezonantna metamaterijalna svojstva čak i do  $1/4$  valne duljine, ali se kao granična frekvencija na kojoj počinju davati rezonantna svojstva uzima  $1/10$  valne duljine. Što se više povećava valna duljina metamaterijala prema valnoj duljini vala, nerezonantni metamaterijali postaju sve sličniji fotoničkim kristalima<sup>1</sup>.

## **2.1. Osnovne jednadžbe i parametri materijala**

Da bi kasnije u ovom radu bilo moguće objasniti daljnja svojstva i ponašanja metamaterijala, prvo je potrebno shvatiti kako funkcioniraju obični materijali, zašto uopće imaju dielektrični i magnetski odziv, te je potrebno upoznati se s nekim osnovama teorije valova i optike. Ako to bude razumljivo, svojstva i ponašanje metamaterijala će imati puno više smisla.

Najopćenitiju formulaciju zakona o elektricitetu i magnetizmu dao je James Clerk Maxwell (1831-1879). On je 1864. godine objedinio i upotpunio zapažanja koja su prije njega objavili Michael Faraday (1791-1836), Karl Friedrich Gauss (1777-1855) i Andre-Marie Ampere (1775-1836).

---

<sup>1</sup> Fotoničke kristale upravo zbog toga neki smatraju podvrstom metamaterijala, ali za njih vrijede neka posve drugačija fizikalna pravila, tako da o njima ovdje neće biti riječ.



**Maxwellove jednadžbe** su temeljne jednadžbe za razumijevanje svih elektromagnetskih i optičkih pojava, te vežu polja s položajem i kretanjem nabijenih čestica. Po [3], u svom diferencijalnom obliku ove jednadžbe se mogu se napisati kao:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = - \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{Faradayev zakon}) \quad (2-1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{Ampereov - Maxwellov zakon}) \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \vec{\rho}(\vec{r}, t) \quad (\text{Gaussov zakon}) \quad (2-3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (\text{Gaussov zakon}) \quad (2-4)$$

gdje su varijable ovako definirane:

$\vec{E}$  - Jakost električnog polja (volt po metru; V/m)

$\vec{H}$  - Jakost magnetskog polja (amper po metru; A/m)

$\vec{B}$  - Gustoća magnetskog toka (tesla; T)

$\vec{D}$  - Gustoća električnog toka (kulon po četvornome metru; C/m<sup>2</sup>)

$\vec{J}$  - Gustoća električne struje (amper po četvornome metru; A/m<sup>2</sup>)

$\rho$  - Volumna gustoća električnog naboja (kulon po prostornome metru; C/m<sup>3</sup>)

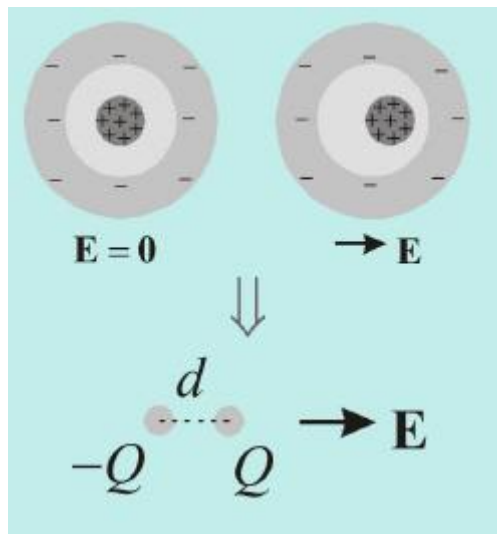
Hamilton-ov operator  $\nabla$  (nabla ili del-operator) definiran je, za Kartezijev koordinatni sustav kao:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}, \quad (2-5)$$

Gdje  $\hat{x}, \hat{y}$  i  $\hat{z}$  označavaju jedinične vektore u smjeru tri osi trodimenzionalnog pravokutnog Kartezijevog koordinatnog sustava.

Osim skalarne veličine  $\rho(\vec{r}, t)$  koja označuje volumnu gustoću električnog naboja, sve su ostale veličine vektori. U ovom radu se neće previše baviti objašnjavanjem Maxwellovih jednadžbi, za detaljniji uvid pogledati [3].

Oblak elektrona kod atoma je povezan s jezgrom preko privlačenja naboja različitog predznaka. Primjenom električnog polja na taj atom, dolazi do pomaka, elektronski oblak se rasteže i pomiče s mjesta što nazivamo polarizacijom.



Sl. 2.3. – Polarizacija dielektrika [4]

Pošto električno polje jakosti  $E$  djeluje na materijal, velik broj elektronskih oblaka je polariziran, dakle, cijeli materijal je polariziran. Kada se makne djelovanje polja električnog polja, elektronski oblak se vraća u svoje prvotno stanje, dakle može se reći da oscilira (npr. kao masa na opruzi).

Osciliranje naboja stvara sekundarni val. Taj val s primijenjenim valom, zbog razlike u fazi daje promijenjeni odziv. To se naziva dielektrični odziv materijala.

Slično tomu, postoji i magnetski odziv materijala. Ovdje je elektron vezan za jezgru tako da kruži oko nje u orbiti. Kako je poznato da kruženje stvara magnetsko polje, u sredini te orbite postoji mali magnetski dipol. Ako se na to djeluje s magnetskim poljem, dipoli više neće titrati u nekom svom nasumičnom smjeru, nego će se poredati i svi na svom mjestu titrati u istom smjeru, što rezultira pohranjivanjem magnetske energije u materijalu. To titranje također stvara male sekundarne valove, koji su izvan faze s primijenjenim valom, što daje magnetski odziv materijala.

Prema tome i [5], ukupno pomačno polje električne polarizacije, odnosno vektor električnog pomaka (vektor električne indukcije ili vektor gustoće električnog toka) iznosi:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e \quad (2-6)$$

Tako da se jednačba gibanja prema [5], može napisati kao:

$$m\ddot{r} + m\gamma\dot{r} + m\omega_0^2 r = -eE_0 e^{-i\omega t} \quad (2-7)$$

Gdje je  $r$  - vektor pomaka elektrona,  $m$  - masa elektrona,  $-e$  - naboj elektrona,  $\omega_0$  - rezonantna frekvencija, a  $\omega$  - frekvencija vala svjetlosti. Izraz  $m\gamma\dot{r}$  ovdje predstavlja gubitke zbog svih ne-elastičnih procesa.

Nadalje, prema [5], koristeći da je  $r = r_0 e^{-i\omega t}$ , dobije se izraz za pomak elektrona pri polarizaciji za jednu molekulu:

$$r_0 = \frac{-eE_0/m}{\omega_0^2 - \omega(\omega + i\gamma)} \quad (2-8)$$

### 2.1.1. Permitivnost i permeabilnost materijala

Dvije veličine, blisko vezane uz Maxwelllove jednačbe, u kojima su opisana dielektrična i magnetska svojstva materijala, te koje govore što se događa s valom dok prolazi kroz sredstvo su dielektrična permitivnost ( $\epsilon$ ) i magnetska permeabilnost ( $\mu$ ). Do izraza za te vrijednosti se dolazi uz pomoć Lorentz-ovog modela, koji prikazuje vrijednosti permitivnosti i permeabilnosti za vezane naboje koji se ponašaju oscilirajuće, i izrazi su identični.

Ukupni iznos polarizacije materijala dan je preko iznosa  $P$ , i pod pretpostavkom da postoji jedan dipol po molekuli, te da je  $N$  prosječan broj molekula po jedinici volumena, on iznosi:

$$P = \frac{Ne^2 E/m}{\omega_0^2 - \omega(\omega + i\gamma)} = \epsilon_0 \chi_e E \quad (2-9)$$

Ovdje se uvode dvije nove veličine:

***Dielektrična permitivnost vakuuma***,  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m; te

*Električna susceptibilnost*<sup>2</sup>,  $\chi_e$ , koja povezuje polarizaciju i primijenjeno polje preko izraza danog u [5]:

$$\chi_e = \frac{N\alpha}{1 - \frac{N\alpha}{3}} \quad (2-10)$$

Prateći daljnje izvode iz [3] i [5], preko izraza za vektor gustoće električnog toka, te provedenih Fourierovih transformacija, dolazi se do izraza za dielektričnu permitivnost za Lorentzov model:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \chi_e = 1 + \frac{Ne^2/m\varepsilon_0}{\omega_0^2 - \omega(\omega + i\gamma)} \quad (2-11)$$

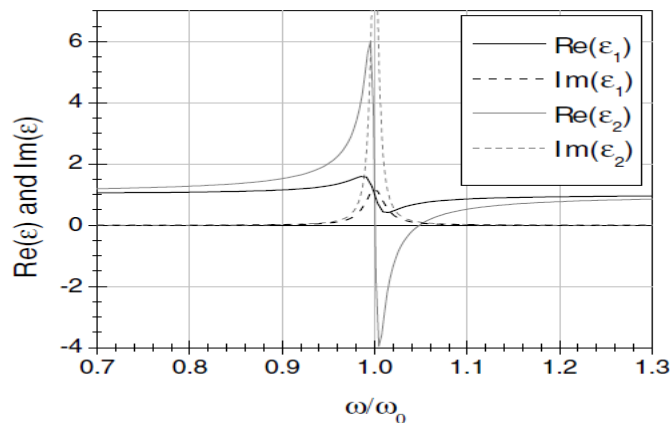
Pošto je poznato da je permitivnost  $\varepsilon(\omega)$  kompleksna veličina, moguće ju je napisati i kao:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (2-12)$$

Podrazumijeva se da je  $\text{Re}(\varepsilon)=\varepsilon'$ , i  $\text{Im}(\varepsilon)=\varepsilon''$ . Isto vrijedi i za  $\mu$ .

Rastavljanjem izraza (2-12) na realni i imaginarni dio, dobiva se:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}, \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{\varepsilon_0\omega_p^2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad (2-13)$$



**Sl. 2.4.** - Realni i imaginarni dijelovi dielektrične permitivnosti predviđeni Lorentz-ovim modelom. Parametri za  $\varepsilon_1(\omega)$  su  $f_1^2 = 0.03\omega_0^2$  i  $\gamma_1 = 0.025\omega_0$ , te za  $\varepsilon_2(\omega)$ :  $f_2^2 = 0.1\omega_0^2$  i  $\gamma_2 = 0.01\omega_0$ .

<sup>2</sup> Susceptibilnost je općenito kompleksna veličina, i njen imaginarni dio uključuje gubitke u dielektriku koji se izražavaju preko tangensa gubitaka.

Sličnu građu dielektricima imaju i materijali koji se mogu magnetizirati, jer na isti način na koji permitivnost nastaje iz električnih dipola koji reagiraju na djelujuće električno polje, permitivnost proizlazi iz magnetskih dipola koji reagiraju na magnetska polja. Kao što je već bilo rečeno, elektron koji kruži oko jezgre stvara petlje i kao rezultat stvara se magnetski dipolni moment, pa analogno tome, iz [3] i [6], se može zapisati:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{P}_m) \quad (2-14)$$

Gdje je  $\vec{P}_m$  - magnetska polarizacija ili vektor magnetizacije.

U uobičajenim materijalima taj vektor ovisi o magnetskom polju  $\vec{H}$ , pa se piše:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (2-15)$$

$\chi_m$  je ovdje kompleksna *magnetska susceptibilnost*, i ekvivalenta je električnoj susceptibilnosti, a  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m i predstavlja permeabilnost vakuuma.

Dakle, kao što smo je rečeno, prema Lorentz-ovom modelu, izrazi za analogno izrazu (2-11) za permitivnost se može zapisati izraz za permeabilnost:

$$\mu(\omega) = 1 + \chi_m = 1 + \frac{Ne^2/m\mu_0}{\omega_0^2 - \omega(\omega + i\gamma_m)} \quad (2-16)$$

gdje je:  $\gamma_m$  - magnetski ekvivalenti frekvencije plazme i iznosa prigušenja s jednadžbi za permitivnost.

Također, permeabilnost je kao i permitivnost kompleksa veličina, pa ekvivalentno (2-12) slijedi:

$$\mu(\omega) = \mu_0(1 + \chi_m) = \mu'(\omega) - i\mu''(\omega) \quad (2-17)$$

Imaginarni dio i ovdje prikazuje gubitke zbog prigušnih sila.

Nadalje, raspisivanjem po uzoru na (2-13), dobiju se sljedeći izrazi za realni i imaginarni dio permeabilnosti:

$$\mu'(\omega) = \mu_0 + \frac{\mu_0 \omega_{mp}^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma_m^2 \omega^2}, \quad \mu''(\omega) = \frac{\mu_0 \omega_{mp}^2 \omega \gamma_m}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma_m^2 \omega^2} \quad (2-18)$$

Osim Lorentz-ovog modela, postoji i Drude-ov model, koji je izvedeni oblik Lorentz-ovog modela uz uvjet da je  $\omega_0 = 0$ . On se odnosi na materijale sa slobodnim nabojima i bez oscilirajućeg titranja, a donosi samo izraz za permitivnost:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (2-19)$$

Za permeabilnost taj model treba nadopunu.

Pošto su pravi materijali pomalo od oba modela, često se koristi Drude-Lorentzov model, gdje je permitivnost dana izrazom preko Drude modela, a permeabilnost izrazom preko Lorentz modela, što će biti vidljivo u kasnijim poglavljima.

### 2.1.2. Indeks loma i impedancija

Pošto samo permitivnost i permeabilnost ne mogu točno reći što se događa s valom, tj. kakvo je njegovo ponašanje u pojedinom materijalu, koriste se još neke veličine, prvenstveno indeks loma i impedancija.

Fizikalno značenje indeksa loma medija je zapravo omjer između brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u pojedinom sredstvu, dakle govori o tome koliko je brzina svjetlosti (ili elektromagnetskog vala) veća u vakuumu, od brzine svjetlosti (ili EM vala) u nekom drugom mediju. Dugo vremena, taj broj označava optičku gustoću nekog materijala i definiran je izrazom:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2-20)$$

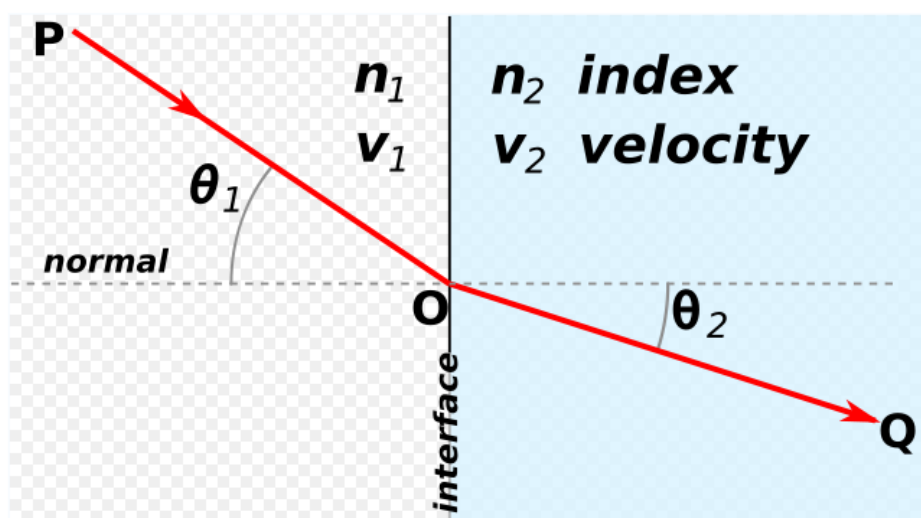
gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu, a  $v$  brzina svjetlosti u nekom sredstvu.

Lom zračenja što prelazi granicu dvaju medija je dobro poznat više od jednog tisućljeća, uz najraniji ispravan matematički opis napisan još 984.g. (Ibn Sahl).

Ovaj matematički opis, koji se sada obično naziva Snell-ov zakon<sup>3</sup>, glasi:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-21)$$

gdje je  $n_1$  i  $n_2$  odnose se na indeks loma dva sredstva, a  $\theta_1$  i  $\theta_2$  su kutovi upada i lomljena zrake na granici između ta dva medija. Svaki poznati materijal koji postoji u prirodi ima pozitivan indeks loma. To podrazumijeva da je kut loma  $\theta_2$ , kako je prikazano na slici, bez obzira koliko velik ili mal bio, na suprotnoj strana od kuta upada zrake  $\theta_1$ .



Sl. 2.5. – Indeks loma kod konvencionalnih materijala, gdje je  $n$  indeks loma, a  $v$  brzina vala.[6]

Osim preko Snell-ovog zakona, indeks loma može biti prikazan i kao poveznica između optike i elektromagnetizma putem izraza:

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad (2-22)$$

gdje  $n$  predstavlja optičku veličinu, dakle indeks loma, a  $\epsilon_r$  i  $\mu_r$  su dvije elektromagnetske veličine.

Kako je pokazano u poglavlju 2.1.1., permitivnost i permeabilnost materijala su kompleksne veličine, tako da se i indeks loma može prikazati kao kompleksna veličina izrazom:

$$\tilde{n} = n + i\kappa = \pm \sqrt{\tilde{\mu}_r \tilde{\epsilon}_r} = \pm \sqrt{(1 + \chi_m)(1 + \chi_e)}, \quad (2-23)$$

<sup>3</sup> Po Willebord Snelliusu, koji je izveo zakon više od 600 godina nakon Ibn Sahla.

gdje je  $n$  obični indeks loma, koji govori o brzini prolaska vala kroz neko sredstvo, a  $K$  je koeficijent nestajanja koji označava gubitke, i opisuje raspršenje i raspad vala kao funkcije mjesta, odnosno sredstva u kojem se nalazi.

Važno je napomenuti da na iznos običnog indeksa  $n$  iz izraza (2-19) utječu samo realni dijelovi permitivnosti i permeabilnosti, dakle  $\text{Re}(\epsilon)$  i  $\text{Re}(\mu)$ , pošto se smatra da su gubici u mediju prilično mali, tj. da vrijedi da je  $\text{Im}[\epsilon(\omega)] \sim \text{Im}[\mu(\omega)] \approx 0$ .

Osim kod indeksa loma, permitivnost i permeabilnost se koriste i za računanje impedancije medija ili prostora u kojem se propagira EM val, koja predstavlja odnos električnog i magnetskog polja za val koji putuje u jednom smjeru. Iz definicije i izvoda danog u [7] proizlazi izraz:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (2-24)$$

### Koeficijent transmisije i refleksije

Osim gore navedenih parametara koji opisuju ponašanje elektromagnetskih valova, u optici se često pokaže korisnim i računanje koeficijenta refleksije  $\rho$  i transmisije  $\tau$ . Prema [6] i [7], ti izrazi nazivaju se Fresnelove jednadžbe, i mogu se zapisati u sljedećim izrazima:

$$R_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad (2-25)$$

$$R_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2-26)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad (2-27)$$

$$T_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2-28)$$

U gornjim jednadžbama  $R_{\parallel}$  je koeficijent refleksije kod paralelne polarizacije, a  $R_{\perp}$  kod ortogonalne polarizacije. Isto vrijedi i za  $T$  – koeficijente transmisije.



### 3. SINTEZA I SVOJSTVA METAMATERIJALA S NEGATIVNIM INDEKSOM LOMA

Prva nagađanja da bi uopće mogao postojati materijal s negativnim indeksom loma pojavila su se početkom 20.st kao mogući odgovor na odnos grupne i fazne brzine valova.

Viktor G. Veselago je 1968 g. prvi i službeno uzeo u razmatranje sredstva s istodobno negativnim  $\epsilon$  i  $\mu$ , i zaključio da bi grupna i fazna brzina u takvim sredstvima imale suprotan smjer. Nadalje, za takvo bi se sredstvo smatralo da ima negativan indeks loma. Ujedno je razmatrao i ponašanje konveksnih i konkavnih leća napravljenih od takvih materijala, i pokazao da bi ravna ploča, napravljena od materijala indeksa  $n = -1$ , mogla sliku izvora lociranu s jedne strane ploče, prikazati na dva mjesta – jedno unutar ploče, a drugo s druge strane ploče (uz uvjet da postoji zadovoljavajuća debljina ploče).

Prva istraživanja materijala s istodobno negativnim  $\epsilon$  i  $\mu$  nisu pobudila značajniji interes, prije svega jer u to doba takvi materijali nisu bili dostupni. Za stvaranje materijala s tim svojstvima trebalo je proći više od 30 godina, da bi kroz značajniji napredak tehnologije dobili mogućnost sintetizirati takav materijal i eksperimentalno ispitati njegova svojstva (Pendry i ostali autori 1996; 1999).

#### 3.1. Negativni indeksa loma

Negativni indeks loma je često smatran osnovnim svojstvom koje opravdava takvo zanimanje za metamaterijale. Matematički, indeks loma  $n$  izražen je kao drugi korijen produkta permitivnosti i permeabilnosti, što se vidi u (2-18). Iz tog izraza nije odmah uočljivo da  $\epsilon < 0$  i  $\mu < 0$  nužno podrazumijevaju da je  $n < 0$ . Kako je čest slučaj kod elektromagnetskih materijala, potrebno je uključiti u razmatranje situaciju s gubicima, kako bi bilo moguće dobiti zaključke vezane za idealan medij bez gubitaka.

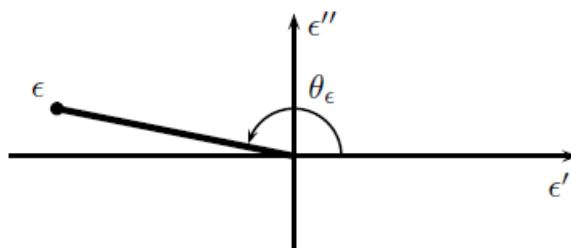
Dakle, prema [5], nakon što su uračunati gubitci, permitivnost i permeabilnost se pojavljuju napisane u sljedećem obliku:

$$\epsilon = |\epsilon|e^{i\theta_\epsilon} \quad \mu = |\mu|e^{i\theta_\mu} \quad (3-1)$$

Indeks loma tada poprima izraz:

$$n = \sqrt{|\epsilon||\mu|}e^{i\frac{1}{2}(\theta_\epsilon + \theta_\mu)} \quad (3-2)$$

Ako se uzme da je  $i^2 = -1$  da bi imaginarni broj bio obilježen, nameće se da je  $\epsilon'' > 0$  i  $\mu'' > 0$  (vidjeti izraz 2-12), tako da je  $\theta_\epsilon \in [0, \pi]$ , i  $\theta_\mu \in [0, \pi]$ .

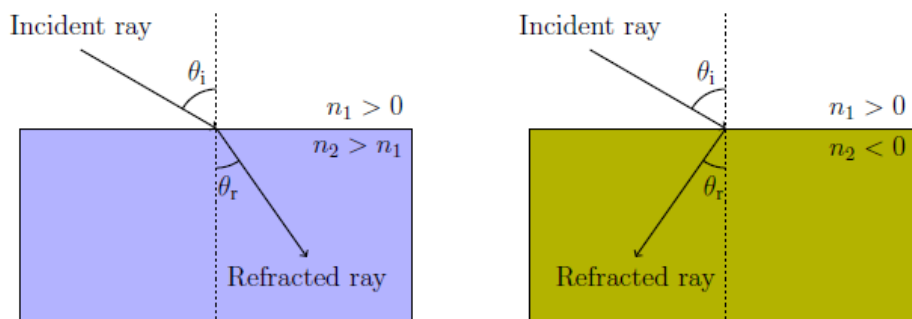


Sl. 3.1. - Prikaz permitivnosti u kompleksnoj ravnini, iz [5].

Posljedično vrijedi da je kut indeksa loma je  $(\theta_\epsilon + \theta_\mu)/2 \in [0, \pi]$ . Ovaj interval se još više smanjuje za slučaj kada je  $\epsilon' < 0$  i  $\mu' < 0$ , na  $[\pi/2, \pi]$ , tako da je realni dio indeksa loma negativan ( $n' < 0$ ). Još preciznije, za slučaj kada  $\theta_\epsilon \rightarrow \pi$  i  $\theta_\mu \rightarrow \pi$ , izraz je sljedeći:

$$n = \sqrt{|\epsilon||\mu|}e^{i\pi} = -\sqrt{|\epsilon||\mu|} \quad (3-3)$$

Pod pretpostavkom da se radi o izotropnom mediju (ograničeno mu je razlaganje na medije u kojima ima smisla pričati o indeksu loma, tj. izotropnim i homogenim sredstvima) ovaj indeks loma može se izravno uvrstiti u Snell-ov zakon i može se primijetiti da preokreće smjer loma.



Sl. 3.2. - Lom svijetlosti u sredstvu s  $n > 0$  (plavo) i  $n < 0$  (zeleno), iz [6].

## 3.2. Sinteza metamaterijala s negativnim indeksom loma

Pošto se radi o materijalima koje je nemoguće pronaći u prirodi, oni moraju biti napravljeni u laboratoriju. Trenutno stanje razvoja metamaterijala, prema [1] se oslanja na „beskonačne“ cijevi i SRR rezonatore (prema engl. Split-Ring Resonators).

Metamaterijal je zapravo složena struktura, sastoji se od velikog broja građevnih blokova čija svojstva su određena geometrijskim svojstvima, nazvanih ćelijske jedinice (engl. „unit cells“), da bi se zadržao odnos s građom normalnih materijala jer ove male građevne jedinice oponašaju molekule u prirodnim materijalima. Karakteristična veličina ćelijskih jedinica u DNG materijalu mora biti puno manja od valne duljine na kojoj materijal ima negativne vrijednosti parametara, ali još uvijek ti materijali moraju bit makroskopskih veličina, tj. veći od veličine atoma i iona materijala od kojih su građene. Također, one se ponašaju kao električke ( $\epsilon < 0$ ) ili magnetske ( $\mu < 0$ ) čestice, i često su napravljene od dielektričnog materijala s metalnim dodacima.

Baš zbog takve građe, u kojoj se metamaterijal sa željenim svojstvima dobije kao spoj mnogo manjih metamaterijalnih jedinica koje imaju ista takva svojstva, tako da se stavi na „hrpu“ određen broj meta-struktura, zna se reći da su metamaterijali i „nagomilani metamaterijali“ (engl. bulk metamaterials).

Prvi stvoreni metamaterijal je radio u mikrovalnom sustavu, ili u valnoj duljini veličine cm, elektromagnetskog spektra (oko 4,3GHz). Bio je sastavljen od SRR-a i vodljivih ravnih žica, a veličina jedne ćelijske jedinice mu je bila od 7-10mm. Te ćelijske jedinice su bile poslagane u dvodimenzionalnom ponavljajućem uzorku koji je oponašao građu kristala. I ćelijske jedinice, i razmak između njih u strukturi, je bio manji od emitirajućeg elektromagnetskog vala.

Pošto se DNG materijal postiže se tako što se kombiniraju materijali, tj. točnije je reći strukture, koji imaju negativnu permitivnost i oni s negativnom permeabilnosti na istom frekvencijskom pojasu, valja pojasniti malo pobliže o kojim se to točno strukturama radi.

### 3.2.1. Negativna permitivnost

Dakle, kao što je rečeno u poglavljima 3. i 3.2., moguće je sintetizirati umjetne medije koji uključuju istovremenu negativnu permitivnost i negativnu permeabilnost (DNG). Dizajniranje negativnih dielektričnih materijala na bilo kojoj frekvenciji mora biti započeto s razmatranjem prirodnih materijala koji imaju takva svojstva (dielektrično negativni materijali, npr. plazme električnog naboja) i tek onda nastavljeno planiranje „dizajna“ takvog materijala. Pošto se zna, bar u teoriji, da bi plazma trebala imati  $\epsilon < 0$  za frekvencije manje od frekvencije plazme pa sve do

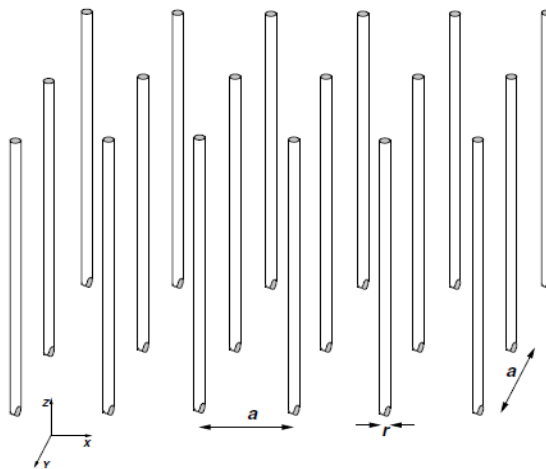
nulte frekvencije, gubici koji tada nastaju su preveliki da bi moglo biti iskorišteno to svojstvo pri dizajniranju metamaterijala.

Pendry i ostali su u svojim istraživanjima (1996 i 1999) predložili da svojstvo razrijeđenih polja metalnih žica da se ponašaju kao plazma niske frekvencije, na frekvenzijskom pojasu od nulte frekvencije, pa sve do granične frekvencije, može pridonijeti gibanju elektrona u žicama. Tada bi nisko frekvenzijski pojas doprinio negativnoj dielektričnoj permitivnosti, a granična frekvencija frekvenciji plazme.

Ako se uzme u razmatranje beskonačno duge, paralelne i iznimno tanke metalne žice promjera  $r$ , smještene periodički u kvadratnu rešetku na udaljenosti  $a$ , gdje vrijedi da je  $a \gg r$  (slika 3-3), te se na tu strukturu dovede električno polje paralelno sa žicama (duž osi  $z$ ), dobije se da je tada efektivna gustoća elektrona u žičanoj strukturi;

$$N_{eff} = \frac{\pi r^2}{a^2} N, \quad (3-4)$$

Gdje je  $N$  – stvarni broj vodljivih atoma u metalu od kojih su žice izrađene,  $r$  - polumjer metalne žice, te  $a$  – razmak na koji su žice postavljene unutar mrežne strukture (Sl.3.3.).



**Sl.3.3.** - Polje beskonačno dugih metalnih žica promjera  $r$ , na udaljenosti  $a$  se ponaša kao niskofrekventna plazma za električno polje usmjereno paralelno sa žicama. Prema [5].

Prema [5], uz uvjet za računanje da je valna duljina zračenja puno veća od razmaka između žica ( $\lambda \gg a \gg r$ ) dobije se izraz za plazma frekvenciju u iznosu

$$\omega_p = \frac{N_{eff} e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln(a/r)}, \quad (3-5)$$

Što vodi do izraza za dielektričnu permitivnost, danu preko Drude modela,

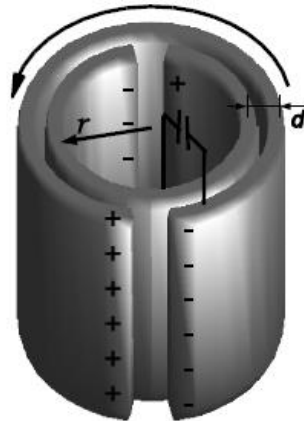
$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega \left( \omega + i \frac{\epsilon_0 a^2 \omega_p^2}{\pi r^2 \sigma} \right)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{f^2 + i \gamma_m f / 2\pi}, \quad (3-6)$$

gdje je  $\sigma$  – vodljivost materijala, a  $f = \pi r^2 / a^2$  – dio volumena popunjen česticama, tj. udio popunjenosti (engl. filling fraction).

Međutim, iako metane žice kao takve zahtijevaju malo prilagođavanja prilikom dobivanja negativne permitivnosti, u eksperimentalnom dijelu predstavljaju ozbiljno ograničenje, budući da bi trebale biti beskonačno duge da bi se ponašale kao plazmeni medij opisan Drude modelom. Također, u okolišu u kojem prolaze valovi, ograničenje je i što te žice zahtijevaju stalan dodir ploče PPW-a ( od engl. Parallel-Plate Waveguide), što se pokazalo kao iznimno teško osigurati prilikom izvođenja pokusa. Zbog svega toga, istraživači koji se bave razvojem metamaterijalnih struktura pokušavaju pronaći način kako bi izbjegli upotrebu žičanih rešetki prilikom dobivanja negativne permitivnosti.

### 3.2.2. Negativna permeabilnost

U usporedbi s postizanjem negativne permitivnosti, postizanje negativne permeabilnosti je mnogo teži zadatak. Stoga, kako bi se sintetizirali izotropni mediji s negativnom permitivnosti, težimo pronaći magnetsku kopiju dobrog električnog vodiča koji se koristi za stvaranje sredstva s negativnom permitivnosti. Dobar električni vodič koji ima negativnu permitivnost ima električna polja i struje duž osi žice, pa je pretpostavka da bi se ista stvar trebala dogoditi za dobar magnetski vodič, da bi magnetsko polje i struje trebali teći uz osi pripadajućih žica. Nažalost, to je gotovo nemoguće. Razlog je u tome što su magnetski materijali koji postoje u prirodi, npr. oni s feritnim jezgrama, obično velike težine, što je nepoželjno mehaničko svojstvo, i teško mogu biti korišteni u svrhu sinteze. Zato je J. B. Pendry predložio strukturu, koja je nazvana podijeljenim prstenom (prikazano na slici 3.4), a koja bi trebala postizati negativnu efektivnu vrijednost permeabilnosti koja bi zadovoljavala Lorentzov model, i razne varijacije te strukture su do danas baza za postizanje negativne permeabilnosti.



**Sl. 3.4.** - Slika modela razdijeljenog prstena koju je predložio Pendry. Prema [5].

Struktura SRR počiva na principu da magnetsko polje elektromagnetskog zračenja kroz induktivnost pokreće LC krug, što za rezultat ima pojavu disperzivne efektivne magnetske permeabilnosti. Oblik prstena, njihov radijus, širina metalnih traka, kao i mnogi drugi faktori izravno utječu na svojstva prstena, a ujedno određuju i rezonantnu i plazma frekvenciju, kao i frekvencijski pojas u kojem dolazi do pojave negativne vrijednosti.

Kako je detaljno pokazano u [1] i [5], dode se do izraza za efektivnu magnetsku permeabilnost, koji odgovara Lorentz modelu:

$$\mu_r = 1 - \frac{\omega_m^2 - \omega_0^2}{f^2 - \omega_m^2 + i\gamma_m f / 2\pi} \quad (3-7)$$

Gdje je  $f$  – faktor popunjavanja, a frekvencije su dane izrazima:

- Frekvencija „magnetske“ plazme:

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{LC}} = c \left( \frac{2d}{(1-f)\epsilon l \pi r^2} \right)^{1/2} \quad (3-8)$$

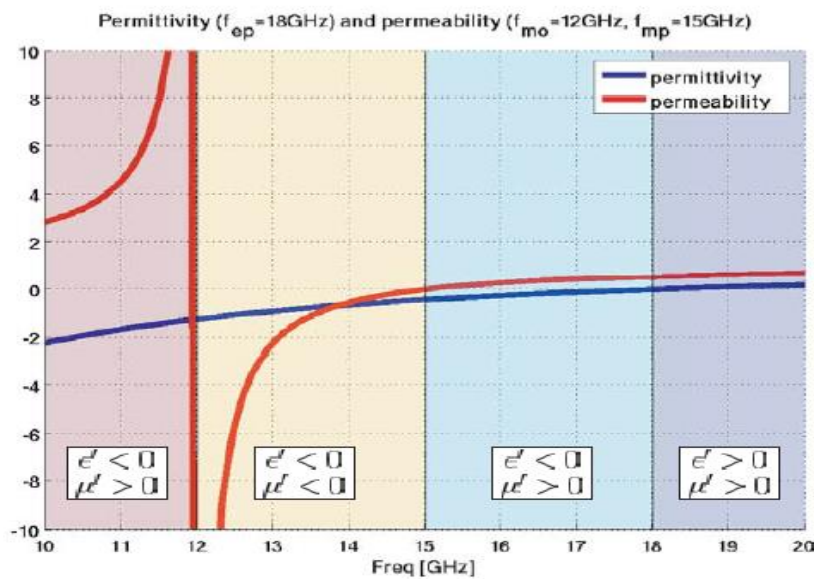
- Rezonantna frekvencija:

$$\omega_0 = c \left( \frac{2d}{\epsilon l \pi r^2} \right)^{1/2} \quad (3-9)$$

### 3.2.3. Stvaranje DNG materijala

Trenutna tehnologija stvaranja metamaterijala oslanja se na spajanje elemenata iz poglavlja 3.2.1 i 3.2.2.. Kao što je opisano u poglavlju 3.2, žičana rešetka, koja se sastoji od dipola u obliku tankih traka, može se koristiti za stvaranje negativnog dielektrične permitivnosti; a SRR rešetka koja se sastoji od rascijepljenih prstena može se koristiti za stvaranje negativno permeabilnosti. U toj rešetki, tanke trake i rascijepljeni prsteni čine jediničnu ćeliju, koja se ponaša poput atoma ili molekula u normalnim sredstvima koji postoje u prirodi. Razlika je u tome što su jedinične ćelije po milijune puta veće od atoma i molekula, a imaju nekoliko redova veličine manje plazma frekvencijama od plazma frekvencija normalnih materijala. Stoga je relativno lakše prilagoditi njihov radni frekvencijski opseg kako bi odgovarao potrebama.

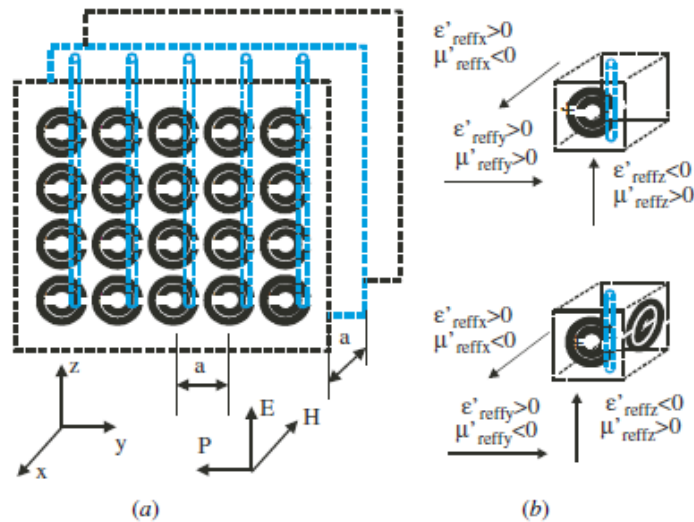
Sintezom jediničnih ćelija u kombinaciji tanke trake i podijeljenog prstena, moguće je stvoriti sredstvo s istovremeno negativnom permitivnost i negativnom permeabilnosti, odnosno DNG metamaterijal. Ovo sredstvo će imati svojstva DNG metamaterijala na određenom mikrovalnom rasponu frekvencija podešavanim unutar dimenzije jedinične ćelije, kao i razmaku između jediničnih ćelija (Sl. 3.5.).



Sl. 3.5. - Realni dio permitivnost i permeabilnost dan preko Drude i Lorentz modela.

Vidljivo da se svojstva DNG materijala pojavljuju na frekvencijskom pojasu od 12GHz do 15GHz, gdje su oba parametra materijala manja od 0. [1]

Tipična jedinična ćelija sastavljena od tanke žice i prstena je prikazana na slici 3.6., kao i na slici 1.1.



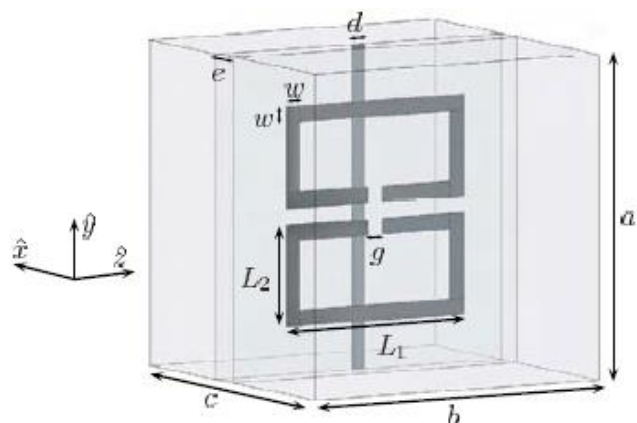
**Sl. 3.6.** - a) DNG metamaterijal baziran na modelu tankih žica i rascijepljenih prstena, b) ćelijska jedinica: gore, 1D; dolje, 2D.[1] Na slici su prikazani i smjerovi djelovanja električnog i magnetskog polja,  $E$  i  $H$ .

Kako je spomenuto u poglavlju 3.2.1., ove strukture su još uvijek predmet istraživanja, u cilju postizanja novih struktura koje će povećati frekventijski pojas u kojem se mogu pojaviti negativni parametri, koje će smanjiti gubitke, te osigurati stabilne rezultate koji će se ponavljati u mjerenjima. Kao rezultat tih istraživanja pojavljuju se mnoge varijacije rascijepljenih prstena i žica, od kojih će neke biti sada nabrojane, a ujedno će biti nešto rečeno i o njihovim parametrima i stvaranju. Za detaljniji uvid u tu problematiku, pogledati [1].

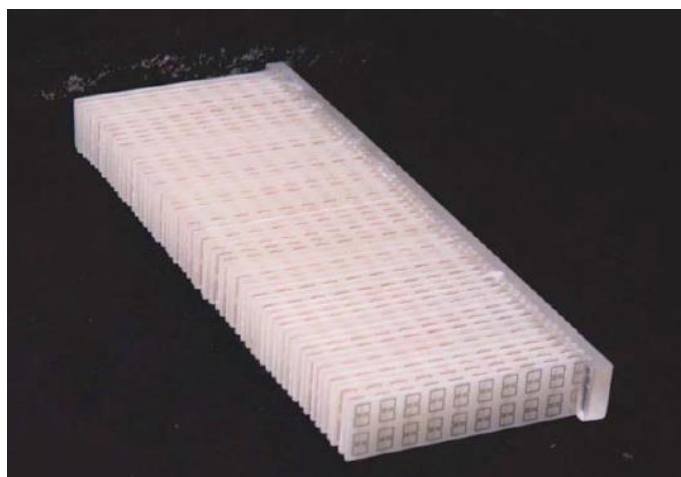
### Osno - Simetrični SRR (engl. Axially Simetric SRR)

Geometrija je prikazana na Slici 3-7., a stvarna realizacija metamaterijalne ploče na Slici 3-8. Prema [1], frekventijski raspon na kojem se pojavljuju negativni parametri je između 8GHz (rezonantna frekvencija) i 9GHz (plazma frekvencija). Takav raspon frekvencija je rezultat dizajna i dimenzija prstena koje su sljedeće:  $a = 12$  mm,  $b = 5.04$ mm,  $c = 2.5$  mm,  $d = 0.6$  mm,  $e = 1$  mm,  $w = g = 0.24$  mm,  $L_1 = 3.13$  mm,  $L_2 = 2.2$  mm,  $\epsilon_r = 4.6$ . Mjerenja na ovom prstenu obavljena su na strukturi 10 x 60 ćelijskih jedinica, a simulacija je zbog ograničenosti računalnom memorijom obavljena na strukturi 8 x 18 jedinica. Dizajn je moguće vidjeti u prilogu [P2].





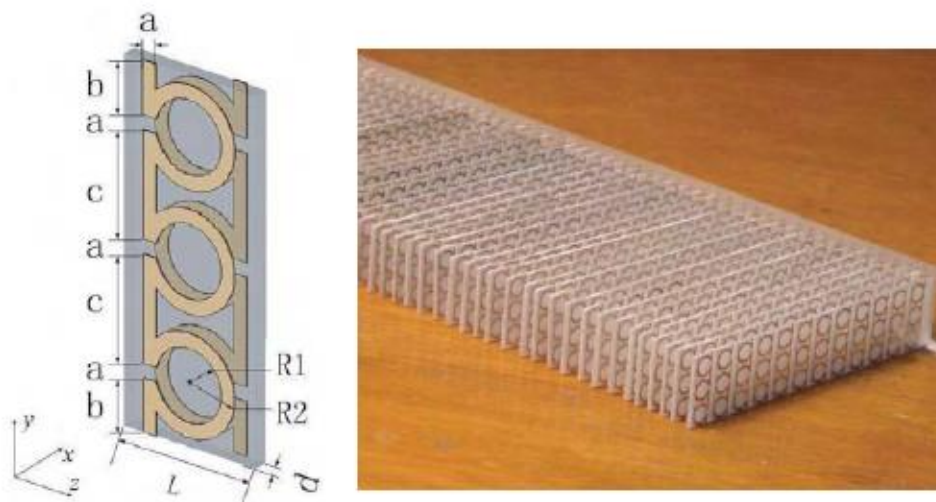
Sl. 3.7. - Čelijska jedinica osno simetričnog prstena.



Sl. 3.8. - Ploča metamaterijala realizirana od čelijskih jedinica sa slike 3.7 [1].

### Omega ( $\Omega$ ) SRR

Geometrija ovog prstena je i prije razvoja metamaterijala bila upotrijebljena, ali u drugom kontekstu. 1992 ovaj oblik je predstavljen kao mogućnost postizanja bi-anizotropije i pseudokiralnosti. Frekvencijski raspon ovog modela je između 12GHz i 13GHz, kao rezultat njegovih dimenzija (2.5 mm, 10 mm i 4 mm u smjeru x, y i z-osi.  $a = 0.4$  mm,  $b = 1.5$  mm,  $c = 2.9$  mm,  $R_1 = 1$  mm,  $R_2 = 1.4$  mm) i dizajna što je prikazano na Slici 3-9.



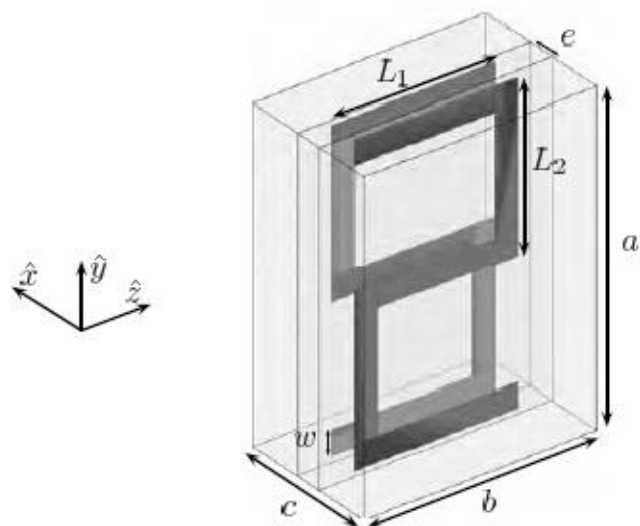
**Sl. 3.9.** - Čelijska jedinica i konačni metamaterijal baziran na omega strukturi. [1]

Kao što je moguće vidjeti na Slici 3-9., u svrhu lakše realizacije, jedna ćelijska struktura se sastoji od tri omega prstena postavljena vertikalno jedan na drugi. Supstrat na koji su printani omega krugovi je FR4, debljine 0.4 mm, da bi poništili kiralna svojstva ovog dizajna. Mjerenja i simulacija ovog metamaterijala su obavljena na metamaterijalnoj ploči dimenzija 10 x 80 ćelijskih jedinica, i 10 x 40 ćelijskih jedinica. HFSS dizajn u prilogu [P3].

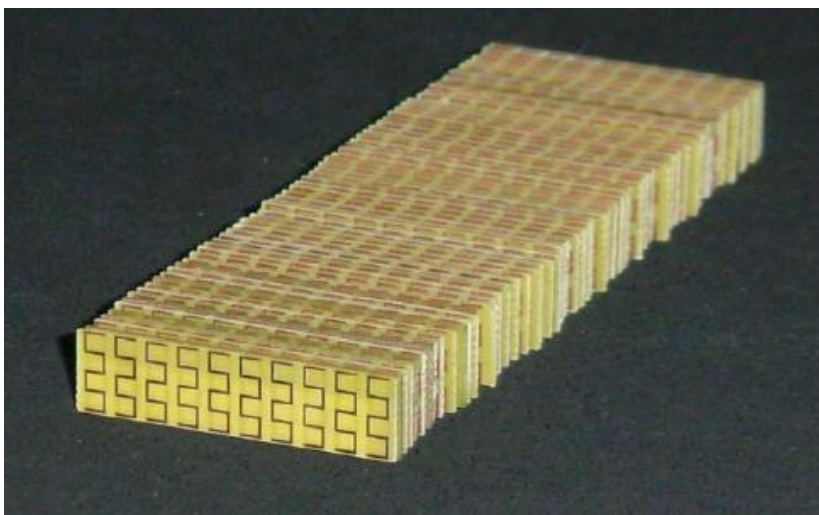
### **S Prsten (S Ring)**

Najvažnije svojstvo ovog dizajna je da mu nije potrebna mreža tankih žica da bi ostvario negativnu permitivnost na sličnim frekvenciji na kojoj ima negativnu permeabilnost. Osim što ima tu prednost da s jednom cjelinom može kontrolirati oba parametra, najvažniji je i onaj eksperimentalni što više nije potrebno osigurati električni kontakt između žičanih struktura i PPW ploče.

Frekvencijski pojas osiguran ovom strukturom je širine 2.6 GHz, između 10.9 GHz i 13.5 GHz. Dimenzije su sljedeće:  $e = 0.5$  mm,  $L_1 = L_2 = 2.8$  mm,  $w = 0.4$  mm,  $a = 5.4$  mm,  $b = 4$  mm,  $c = 2.5$  mm, a dizajn je dan u prilogu [P4].



**Sl. 3.10.** - Jedinična ćelija geometrije S prstena.



**Sl. 3.11.** - Fotografija čvrstog metamaterijala baziranog na dizajnu S prstena.[1]

Osim ovdje navedenih dizajna ćelijskih jedinica, jedna od najpoznatijih je rubno spojeni podijeljeni prsten (engl. Edge-Coupled SRR), ali o njemu će detaljnije biti riječ u poglavlju 5., pri izrađivanju modela za simulaciju.

### 3.3.Svojstva DNG metamaterijala

Osim negativnog indeksa loma, DNG materijale karakteriziraju i još neka svojstva koja se ne pojavljuju kod običnih materijala.

#### 3.3.1. Pravilo lijeve ruke

U konvencionalnom mediju, putujući ravni val se može opisati preko vektora jakosti električnog polja  $E$ , vektora jakosti magnetskog polja  $H$ , i valnog vektor  $k$ , koji čine trojku okrenutu u pravilu desne ruke, tako da se konvencionalni medij naziva desno-orijentirani medij (prema engl. Right-Handed Material - RHM). Međutim, u DNG mediju stvari izgledaju malo drugačije.

Za početak, reducirani Maxwell-ove jednadžbe za valnu jednadžbu u normalnom sredstvu iznosi:

$$\left(\nabla^2 - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \Psi = 0 \quad (3-10)$$

Budući da se indeks loma nalazi ispod kvadrata, vidljivo je da će ta jednadžba ostati zadovoljena i bez obzira na promjenu  $\epsilon$  i  $\mu$ , dakle širenje valova će ostati postojano bez obzira na parametre. Međutim, ako se eksplicitno uzmu u obzir Maxwellove diferencijalne jednadžbe prvog reda, dobije se sljedeći izraz:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (3-11)$$

$$\nabla \times H = j\omega\epsilon E \quad (3-12)$$

nakon čega postaje jasno da su sada riješenja potpuno drugačija. Zapravo, za polja ravnog vala, gornja jednadžba postaje

$$k \times E = \omega\mu H \quad (3-13)$$

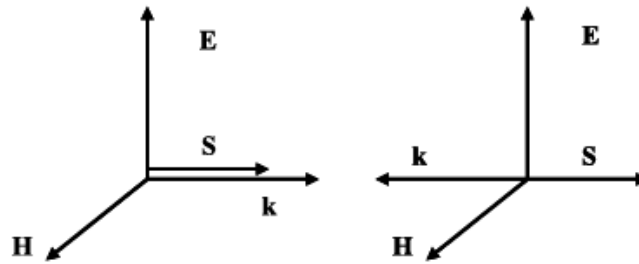
$$k \times H = -\omega\epsilon E \quad (3-14)$$

što za negativne vrijednosti  $\epsilon$  i  $\mu$  može biti napisano i kao

$$k \times E = -\omega|\mu|H \quad (3-15)$$

$$k \times H = \omega|\epsilon|E \quad (3-16)$$

pokazujući da vektori  $E$ ,  $H$  i  $k$  sada tvore lijevo-orijentiranu trojku, po pravilima lijeve ruke.



**Sl. 3.12.** – Ilustracija vektorskog sustava  $E$ ,  $H$ , valnog vektora  $k$  i Poyntingova vektora  $s^4$ , u standardnom (lijevo) i u lijevo-orijentiranom (LHM) sredstvu. [7]

---

<sup>4</sup> Vektorski umnožak čiji se smjer podudara sa smjerom širenja elektromagnetskoga vala, dok je njegov prosječni iznos jednak intenzitetu elektromagnetskoga zračenja. Njegov realni dio se definira se kao:  $S = \frac{1}{2} E \times H$ .

### 3.3.2. Valovi unatrag

Dakle, po prikazanom u prethodnom poglavlju, vektori  $E$ ,  $H$  i  $k$  kod metamaterijala s negativnim indeksom loma slijede pravilo lijeve ruke, dok je Poyntingov vektor  $s$ , koji opisuje smjer protoka energije zadržao desnu orijentaciju u odnosu na  $E$  i  $H$ , tako da je valni vektor  $k$  sada anti-paralelan s Poyntingovim vektorom  $S$ . Iz tog razloga, metamaterijal s negativnim indeksom loma se također naziva i medijem povratnog vala (engl. Backward-wave media).

Da bi to bilo dokazano, potrebno je zapisati jednadžbu nestajanja, koju zadovoljavaju valovi u svim medijima:

$$k_{i,x}^2 + k_{i,z}^2 = k_i^2 = \omega^2 \varepsilon_i \mu_i \quad (3-17)$$

Gdje je neko područje 1 ograničeno na  $z > 0$ , a područje 2 na  $z < 0$ . Granični uvjeti zahtijevaju da je broj valova koji dodiruju površinu jednak u svakom mediju, tj. da vrijedi

$k_{1,x} = k_{2,x} = k_{0,x}$ ; što konačno daje izraze za valni vektor u svakom sredstvu:

$$k_{2,DPS} = k_{0x} \hat{x} - k_{2z} \hat{z} \quad (3-18)$$

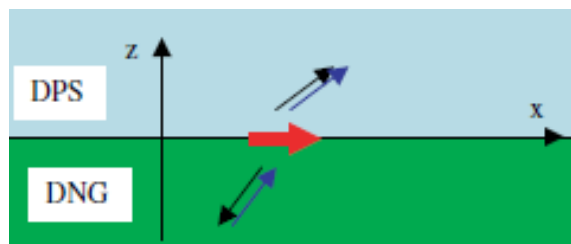
$$k_{2,DNG} = k_{0x} \hat{x} - |k_{2z}| \hat{z} \quad (3-19)$$

Istovremeno, dani su definirani izrazi za Poyntingov vektor u svakom području:

$$\langle S_{2,DPS} \rangle(x, y, z, \omega) = \frac{1}{2\omega \varepsilon_2} \left| \frac{k_{1z}}{\varepsilon_1} \frac{I_0}{k_{1z}/\varepsilon_1 + k_{2z}/\varepsilon_2} \right| (k_{0x} \hat{x} - k_{2z} \hat{z}) \quad (3-20)$$

$$\langle S_{2,DNG} \rangle(x, y, z, \omega) = \frac{1}{2\omega |\varepsilon_2|} \left| \frac{k_{1z}}{\varepsilon_1} \frac{I_0}{k_{1z}/\varepsilon_1 + |k_{2z}|/|\varepsilon_2|} \right| (-k_{0x} \hat{x} - |k_{2z}| \hat{z}) \quad (3-21)$$

Prema tome, iz (3-17) i (3-19) vidimo da je u normalnom sredstvu smjer valnog vektora i smjer Poyntingova vektora isti, dok je u DNG sredstvu smjer ta dva vektora suprotan, što se prema (3-18) i (3-20) i vidi.



**Sl. 3.13.** – Smjer vektora u normalnom (DPS) i metamaterijalnom (DNG) sredstvu. Plava strelica predstavlja valni vektor, a crna Poyntingov vektor.

Valja naglasiti da osim što su vektori  $k$  i  $S$  suprotnog smjera u odnosu na izvor, tok energije vala u DNG sredstvu je suprotan od smjera faze tog vala. To bi u fizikalnom smislu značilo, da je unutar takvog sredstva, energija elektromagnetskog vala grupnom brzinom putuje od izvora u očekivanom smjeru, a same valne oscilacije putuju faznom brzinom u suprotnom smjeru, prema izvoru vala.

### 3.3.3. Pojačanje iščezavajućih valova (engl. Amplified evanescent waves)

U običnom sredstvu, val kako prolazi kroz prostor i vrijeme polako gubi na snazi, njegova amplituda postupno slabi. Pogledajmo izraz za iščezavajuće valove:

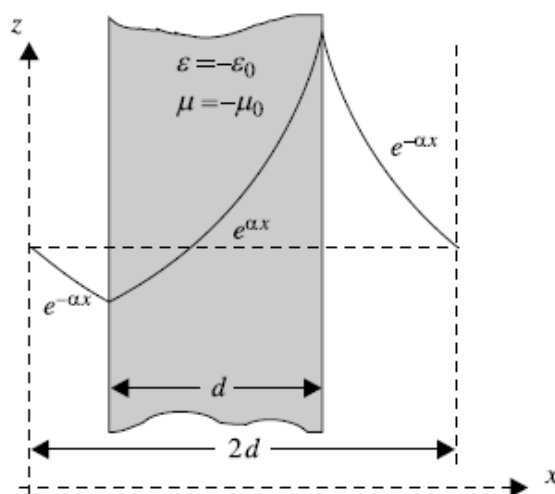
$$E(z) = E_0 \cdot e^{j(k' + jk'')nz} = E_0 \cdot e^{-k''nz} \cdot e^{jk'nz} \quad (3-22)$$

Bitno je uočiti da u ovom slučaju iščezavajući faktor ( $e^{-k''nz}$ ) ima negativan predznak, što dovodi do smanjenja amplitude i da val polako nestaje, dok je oscilirajući faktor pozitivan, i pokazuje pojačanje šuma.

Međutim, u DNG materijalu jednadžba (3-22) izgleda ovako:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{j(k' + jk'')(-n)z} = E_0 \cdot e^{k''\tilde{n}z} \cdot e^{-jk'\tilde{n}z} \quad (3-23)$$

Iz toga dolazimo do zaključka da se za vrijeme prolaska kod DNG materijal snaga vala povećava, a šum smanjuje, što je vidljivo na slici 3.14.. To saznanje može biti posebno zanimljivo na području astronomije, stvaranja savršenih slika, kao i pri proizvodnji leća.



Sl. 3.14. – Amplitudni uzorak za Fourierov iščezavajući harmonik za savršenu leću. [7]

Osim ova tri prethodno navedena svojstva, metamaterijali s negativnim parametrima imaju još cijeli niz svojstva koja se ne susreću u normalnim materijalima, cijeli niz fizikalnih djelovanja i zakona koji su detaljno opisani za standardne materijale, ali se u DNG metamaterijalima odvijaju u nekim potpuno izmijenjenom obliku. Neki od tih djelovanja su modificirani Snell-ov zakon, obrnuti Doppler-ov efekt, obrnuti Goos-Hänchenov efekt, obrnuta Čerenkova radijacija i slično.

Ova djelovanja nisu toliko bitna za ovaj rad, pa neće biti detaljno obrađivana, nego samo spomenuta. Za detaljniji uvid u tu problematiku, postoji niz razrađenih poglavlja u [5] i [7].



## 4. RAZVOJ I PRIMJENA DNG METAMATERIJALA

Vrijedi na kraju spomenuti i trenutno stanje razvoja i primjene metamaterijala.

Iako je u zadnjih 10-ak godina došlo do značajnog razvoja metamaterijalnih struktura, otkrivanje njihovog pravog potencijala još uvijek je ograničeno tehnologijom koju imamo na raspolaganju, pošto se ne mogu proizvesti dovoljno male strukture, koje će smanjiti i gubitke na prihvatljivu razinu, jer su metamaterijali strukture s izrazito velikim gubicima. Svojstvo negativnog indeksa loma, koje DNG metamaterijali imaju, krije potencijal da omogući stvaranje tzv. plašta nevidljivosti - odjeće ili materijala koji će na taj način savijati zrake svjetlosti, te omogućiti postajanje objekta potpuno nevidljivim svojoj okolini. No, to svojstvo negativnog indeksa loma koji metamaterijal ima, nosi sa sobom i jako smanjenje snage bilo kojeg vala koji prolazi kroz taj metamaterijal. Krajem 2014. godine, u časopisu Nature Communications objavljeno je da su Han Xin i suradnici sa sveučilišta Arizona, uspjeli stvoriti metamaterijal koji će imati svojstvo negativnog indeksa loma, ali istodobno neće uzrokovati gubitak snage EM vala koji prolazi kroz njega. Čak štoviše, snaga vala će se pri prolasku kroz taj metamaterijal dodatno povećati. Ukratko, to su uspjeli postići stvaranjem uređaja s dimenzijama u mikro i nanometrma (red veličine  $10^{-9}$  m), te ugradnjom u njega jednostavnih tunel-dioda napajanih baterijama (detaljnije o temi potražiti na linku u prilogu P1).

To otkriće je bitno jer je sada, po autoru, već i za njegovog životnog vijeka stvoriti potpuno funkcionalan plašt nevidljivosti, iako je i on svjestan da su potrebne još godine istraživanja da bi dobili stabilan metamaterijal, pogodan za širu upotrebu.

Osim za stvaranje plašta nevidljivosti, metamaterijali svoju primjenu nalaze u cijelom nizu struka i različitih područja. Svoju primjenu u biomedicini su već našli u stvaranju endoskopske kapsule, mikro-uređaja u obliku tablete koji pomaže u snimanju i otkrivanju bolesti i smetnji probavnog sustava. Osim toga, dodatni potencijal za primjenu u medicini postoji i u vidu proizvodnje skenera koji će u najranijoj fazi moći detektirati anomalije i oboljenje od raka, uređaja koji će usmjeravati rendgenske zrake i omogućiti još detaljniji uvid u karakteristike ozljeda i oboljenja, itd.

Pored medicine, metamaterijali se mogu koristiti u čitavom spektru najrazličitijih područja, počevši od onog u računalnoj elektronici, za stvaranje komponenti potrebnih za super brza računala, stvaranje mikrovalnih komponenti visokih performansi, poboljšanje senzorske tehnologije, pretvarače solarne energije, koji će još veći sunčeve energije pretvarati u druge oblike

energije, te tako omogućiti dobivanje čišće energije i manje zagađenje, do astronomije i gradnje teleskopa za gledanje duboko u svemir, pa sve do sektora građevinstva, gdje će omogućiti proizvodnje materijala za gradnju zgrada otpornijih na potrese.

Za sada, najbolje dokumentiranu primjenu metamaterijali su doživjeli u optici, za projektiranje savršenih i super-leća iz ravne ploče napravljene od metamaterijalnih jediničnih ćelija; te za projektiranje antena s raznim namjenama. Pošto se tehnologija koja se koristi za gradnju antena bazira većinom na teoriji elektronskih procjepa, tj. EBG tehnologiji (prema engl. Electronic Band-Gap), što je prilično različito od one obuhvaćene u ovom radu, neće biti detaljnijeg spomena (za sve detaljnije informacije o toj temi, pogledati u [1]). Ovdje će biti spomenuto samo najzanimljivije područje iz optike, u kojem su DNG metamaterijali nalazili i još nalaze široku primjenu.

#### 4.1. Savršena leća

Od saznanja o postojanju i mogućnosti stvaranja metamaterijala s negativnim indeksom loma, njihova najzanimljivija značajka je bilo postojanje mogućnosti stvaranja savršene leće. Kao što se zna, objekti su vidljivi zato što se kad se EM val, kakav je i svjetlost, na svom putu sretne s nekim objektom, dolazi do odbijanja i raspršivanja EM valova od tog objekta koje onda hvata ljudsko oko. Kako je vidljivo u poglavlju 3.3.3., svi valovi imaju iščezavajuću komponentu u sebi, tako da se dio informacija koje oni prenose gubi zbog njihove prirode eksponencijalnog smanjenja.

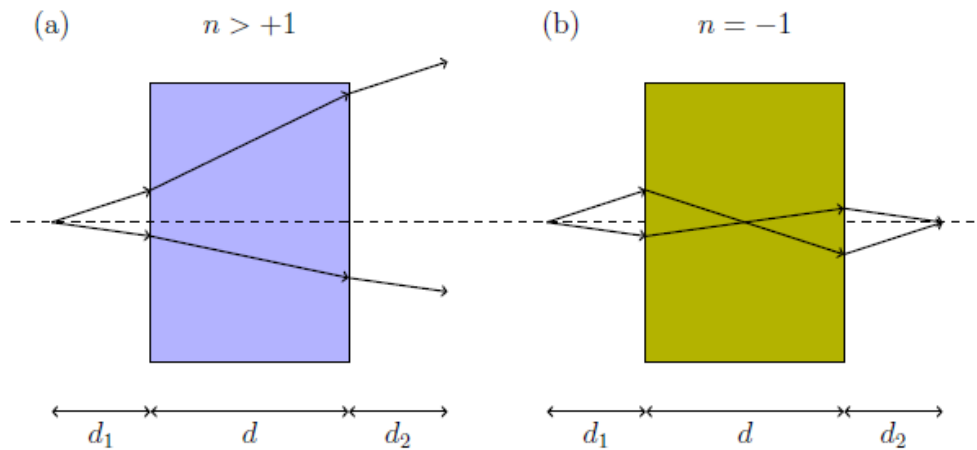
Ako se želi malo detaljnije pojasnit svojstva savršene leće, najlakši primjer bi bila leća kakvu je predložio Veselago još 1968, koja se sastoji od ravne ploče debljine  $d$ , sa  $\epsilon = -1$  i  $\mu = -1$ , okružena pozitivnim dielektrikom. Takva leća bi projicirala sliku s jedne strane ploče na dva mjesta – jedno u središtu ploče, a drugo sa strane suprotne onoj gdje je slika, kao što je vidljivo na slici 4.1.. Prilikom računanja polja na udaljenosti  $z=2d$ , na ravninu slike, s udaljenosti  $z=0$ , što odgovara ravnini u kojoj se nalazi objekt, prema [5] dobiju se sljedeći izrazi za koeficijente transmisije i refleksije:

$$\rho = e^{-ikd} \quad \tau = 0 \quad (4-1)$$

Za iščezavajuće valove, svojstvo spomenuto u poglavlju 3.3.3., također prema izvodu iz [5] daje sljedeće izraze za koeficijente transmisije i refleksije:

$$\rho = e^{+ikd} \quad \tau = 0 \quad (4-2)$$

Dakle, kako je vidljivo iz izraza (4-1) i (4-2), takva leća nema refleksije, nego provodi sve valove s kojima se nađe u interakciji, a iščezavajuća komponenta valova unutar takvog sredstva ima pozitivnu potenciju, dakle, ona obnavlja amplitude iščezavajućih valova, dovodeći i njih u fokus. Time izraz (4-2) potvrđuje sve rečeno u poglavlju 3.3.3, kao i ono na slici 3.14.



**Sl. 4.1.** – Lom svjetlosti pri prolazu kroz ravnu ploču od a) običnog materijala i b) metamaterijala s negativnim indeksom loma.

Jedino još valja napomenuti da takva leća na način prikazan na slici 4.1 b) lomi samo zrake koje pod nekim kutom dolaze u interakciju sa pločom, za razliku od valova kojima je kut upada 90 stupnjeva.

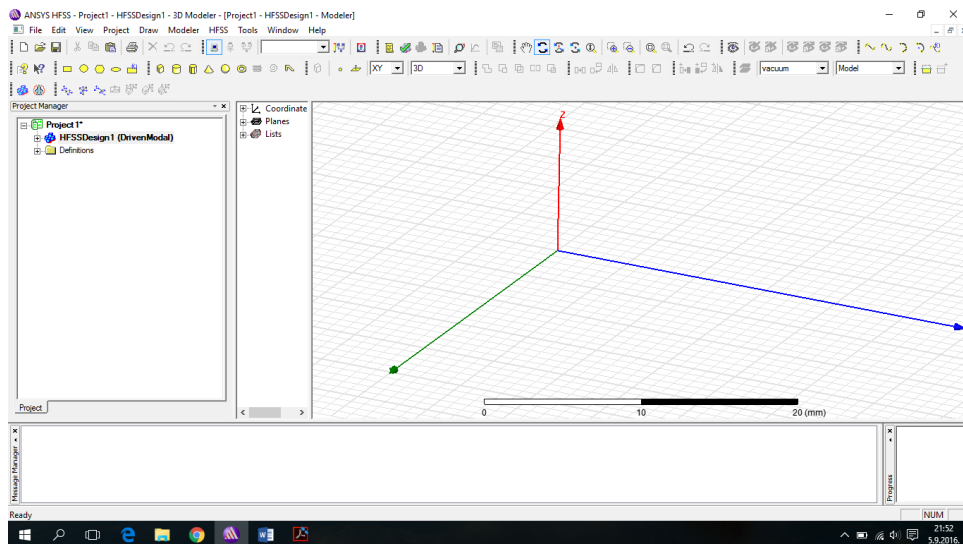
## 5. SIMULACIJA

Za simulaciju prolaska EM vala kroz sredstvo s negativnim indeksom loma, koristit će se program HFSS (High Frequency Structure Simulator) tvrtke Ansys. Simulacija se obavlja na računalu konfiguracije 8 Gb RAM-a, te 2-jezgrenim procesorom i5 tvrtke Intel.

Detaljnije će biti obrađeno stvaranje metamaterijalne ćelijske jedinice tipa rubno-upareni SRR (prema engl. Edge-Coupled Split-Ring Resonator), a na isti takav način će biti dizajnirani i svi tipovi dizajna spomenuti u poglavlju 3.2.3, te dani u prilogima P2-P4.

### 5.1. Izračun i kreiranje metamaterijalne strukture u HFSS-u

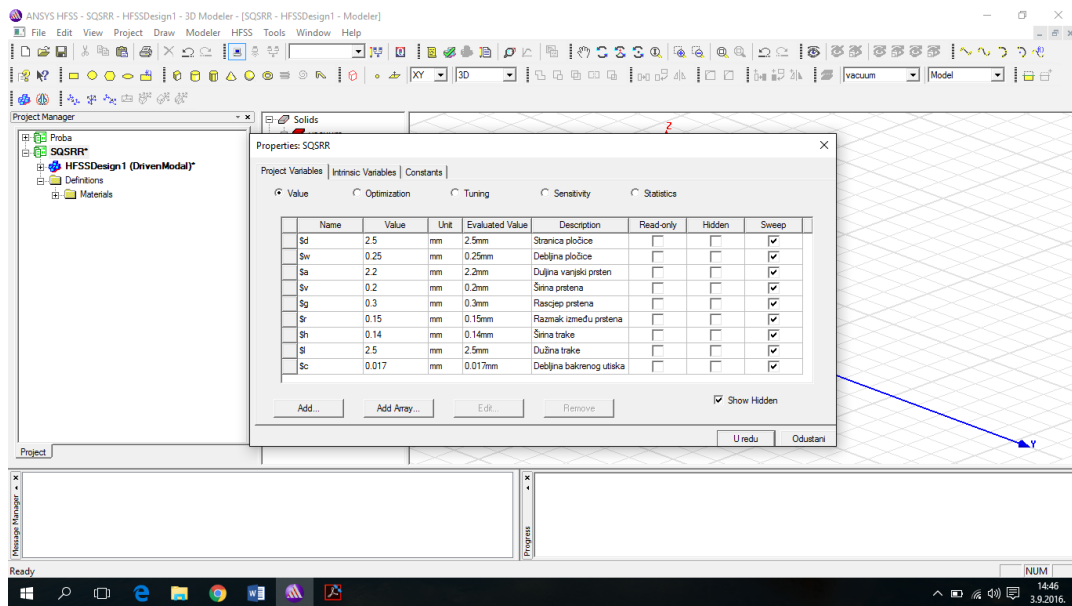
Kada se otvori stvaranje novog modela u HFSS-u, pojavi se sljedeći ekran:



Sl.5.1 – Početni zaslon programa HFSS s tri osi - x-zeleno, y-plavo, i z-crveno.

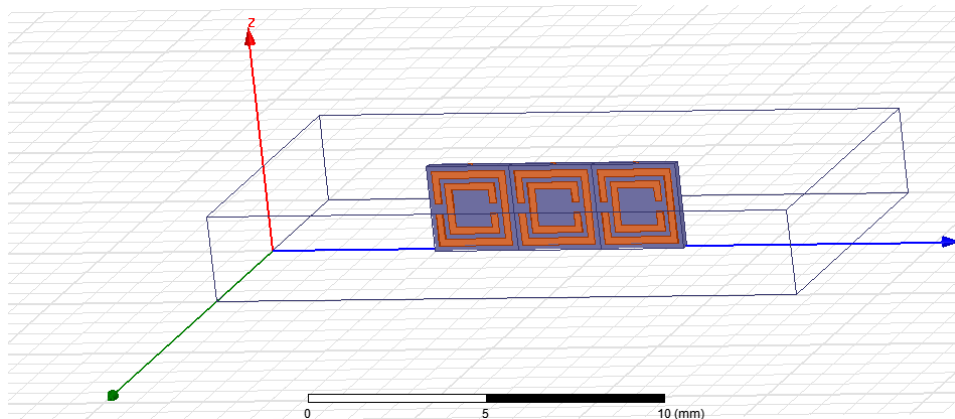
Dizajnirana metamaterijalna ćelijska jedinica je dimenzija 2.5mm x 2.5mm, debljine 0.25mm. Dimenzije vanjskog prstena su 2.2mm, a razmak između vanjskog i unutarnjeg prstena je 0.15mm, s rascjepom oba prstena od 0.3mm. Oba prstena su širine 0.2mm. Metalna traka se pruža sredinom ćelijske jedinice, dakle u dužini 2.5mm, u širini od 0.14mm. i traka i oba prstena su otiskani od tankog sloja bakra debljine 0.017mm, dok je podloga od materijala FR4 ponuđenog u bazi programa ( $\epsilon=4.4$ ).

Prvo što je potrebno je definirati zadane varijable da bi bilo lakše dizajnirati osnovnu ćelijsku jedinicu



SI.5.2. – Definirane varijable strukture SRR-a.

Slijedi potom stvaranje elementa pomoću naredbi „Create Box“, „Subtract“, „Move“, kao i koordinata pojedinih točaka u x,y,z –koordinatnom sustavu. Da bi se odredili parametri funkcioniranja metamaterijalne plohe, potrebno je prvo analizirati samo jednu jediničnu ćeliju koja čini tu metamaterijalnu ploču. Jedinična ćelija ima više rezonantnih frekvencija, dakle i frekvencijskih pojasa na kojima se pojavljuju DNG svojstva, a do kojih je moguće doći preko izraza (3-8) i (3-9), ili prema [7], analizom S parametara jedne ćelijske jedinice. Nakon toga, jedan element je kopiran uzduž osi pomoću naredbe „Copy Along Axis“, te je dobivena sljedeća struktura:

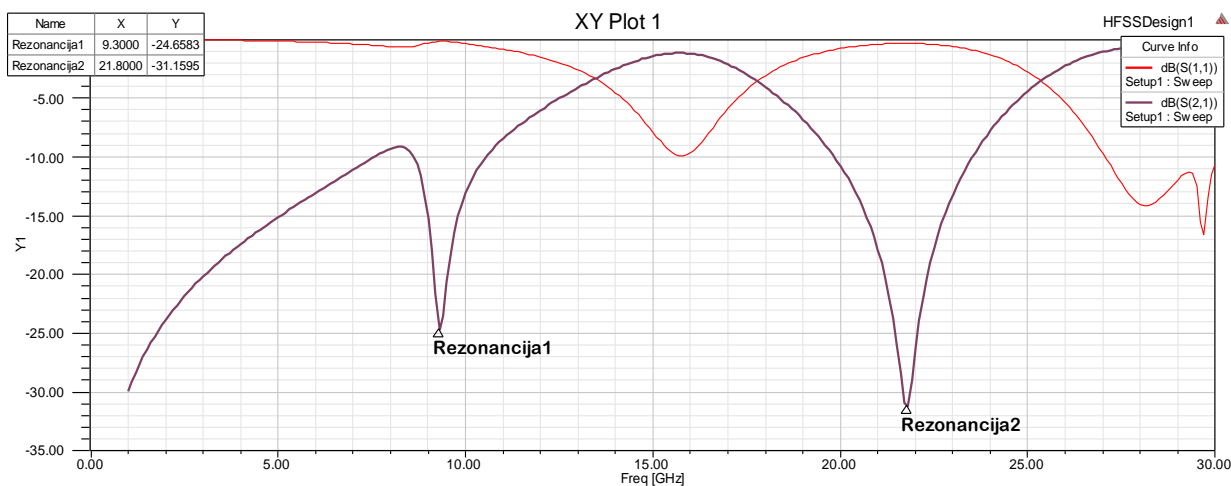


SI.5.3. – Struktura na kojoj se izvodi simulacija.

Kako je vidljivo na slici (5-3), cjelovita struktura na kojoj provodimo simulaciju se sastoji od tri osnovne jedinične ćelije smještene jedna uz drugu u smjeru osi Y, počevši na koordinatama 0mm, 5mm, 0mm za osi, redom, X, Y i Z. Pobudu je izvedena pomoću valnih portova 1 i 2 (engl. Wave Port 1, Wave Port 2), postavljenih u smjeru osi Y, počevši od vrijednosti  $Y = 0$ . Valni port 1 emitira ravni val frekvencija 5 GHz, 15 GHz i 28GHz s polaskom u ishodištu koordinatnog sustava i kreće se u smjeru osi Y. Očekivao je da se širenje vala frekvencije gdje se struktura ponaša kao normalno sredstvo dogodi slabljenje amplitude kako se val udaljava od ishodišta, te da se dolaskom vala frekvencije na kojoj je iz parametara  $S_{1,1}$  i  $S_{2,1}$  vidljivo metamaterijalno ponašanje strukture dođe do pojave stvaranja sekundarnih valova titranja oko metala, koje će uvjetovati pojačanje faze prilikom prolaska vala, kao i naizgled jednako širenje u oba smjera oko metamaterijala.

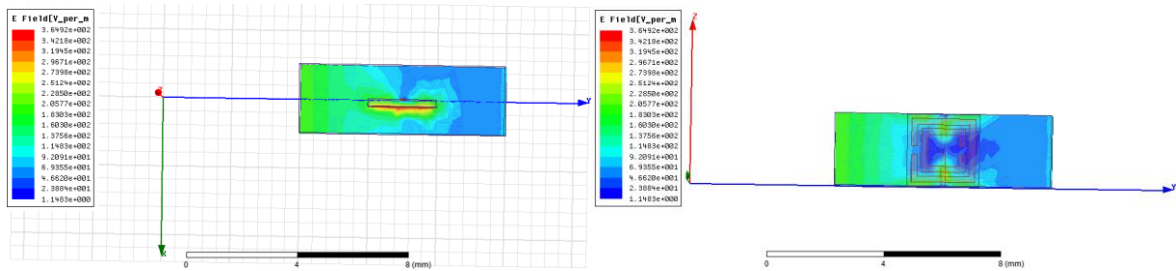
## 5.2. Rezultati

Prvi dobiveni rezultati su parametri  $S_{1,1}$  i  $S_{1,2}$  jedne jedinične ćelije, pomoću kojih se određuju rezonantne frekvencije prvog i drugog prstena, što se vidi na slici (5-4).



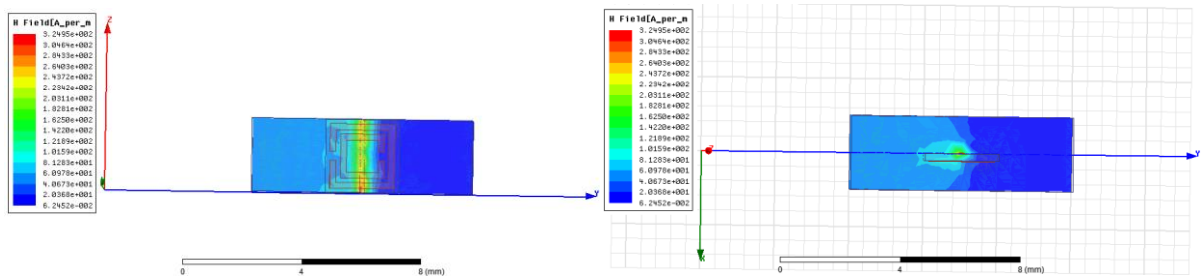
**SI.5.4** – *Rezultat analize jedne ćelijske strukture s rezonantnim frekvencijama.  $S_{1,1}$  je koeficijent refleksije, a  $S_{2,1}$  koeficijent transmisije u dB.*

Snimanjem prolaska vala kroz sredstvo dobijemo vrijednosti za električno i magnetsko polje kao na slikama 5.5. i 5.6..



**SI.5.5 – Električno polje jedinične ćelije.**

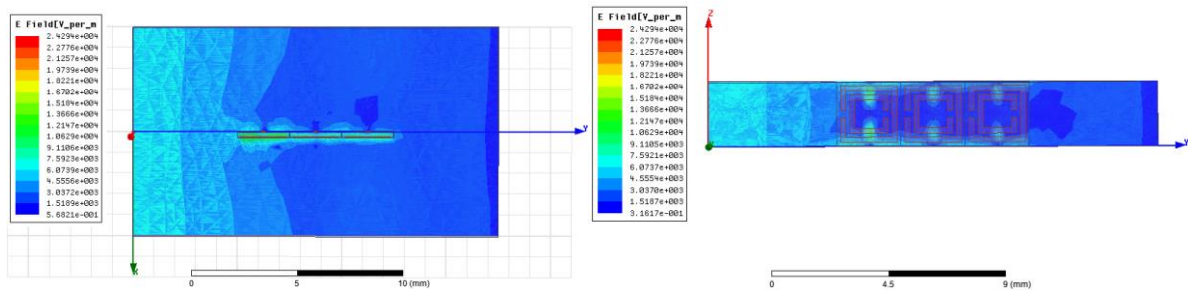
Vidljivo je da je amplituda dolaznog vala na jednu ćeliju reda veličine  $2.055 \times 10^2$  V/m, u maloj udaljenosti oko metalnih prstena se stvara polje valova titranja, amplitude oko  $3.5 \times 10^2$  V/m, te se po povećanju amplitude vidi širenje vala u smjeru suprotnom osi – Y. Nakon toga, val nastavlja širenje u smjeru Y-osi, uz smanjenu amplitudu na 50 V/m, što predstavlja slabljenje ali ne onoliko kakvo bi imali da se radi o širenju vala slobodnim prostorom.



**SI.5.6 – Magnetsko polje jedinične ćelije.**

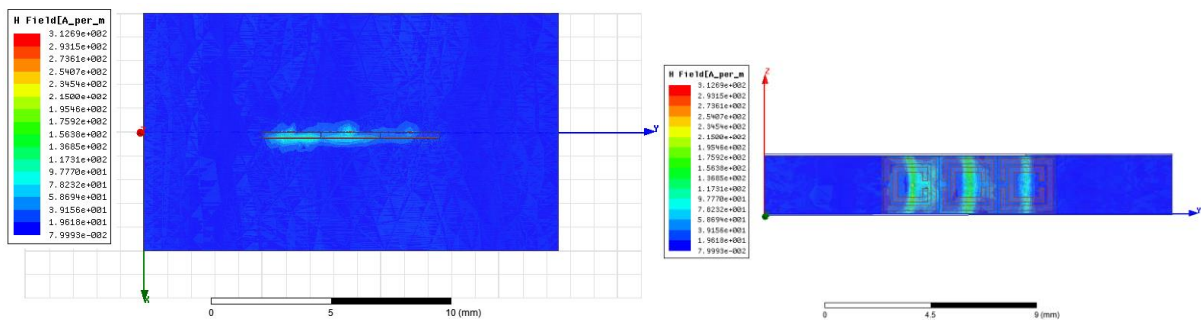
Kao i na prethodnoj slici, možemo primijetiti smanjenje vrijednosti amplitude vala, te najveću amplitudu sekundarnih valova uz bakrenu traku na prvom elementu u nizu. Početna amplituda vala je oko 80 V/m, izlazna amplituda je oko  $6 \times 10^{-2}$  V/m. Na desnoj strani slike, tj. prikazu u XY-ravnini, vidi se povećanje amplitude suprotno smjeru širenja vala.

Dobivene slike govore o smanjenju iznosa amplitude polja što odgovara metamaterijalnoj strukturi, u smislu smanjenja snage zbog gubitaka, ali i inverznog smjera širenja vala.



**SI.5.7** – Električno E-polje za frekvenciju 5 GHz.

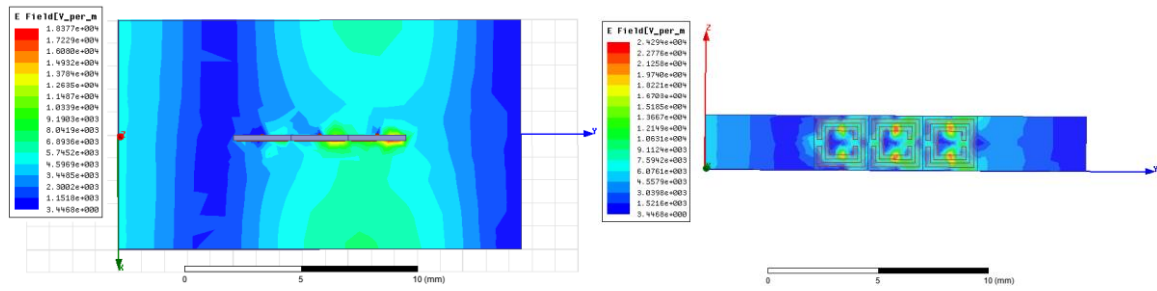
Može se primijetiti da amplituda slabi kako se val udaljuje od ishodišta, od početnih  $7.5 \times 10^3$ , do krajnjih  $5.6 \times 10^{-1}$ . Najveća amplituda sekundarnih valova se nalazi u prvom od tri u nizu elementa, oko  $2 \times 10^4$  V/m, što se najbolje vidi na slici desno, dok je na zadnjem elementu najmanja, što u potpunosti odgovara pretpostavci da se na toj frekvenciji naš element ponaša kao običan materijal jer je amplituda vala najmanja na zadnjem elementu, te tako uzrokuje najslabije sekundarne valove.



**SI.5.8** – Magnetsko H-polje za frekvenciju 5 GHz.

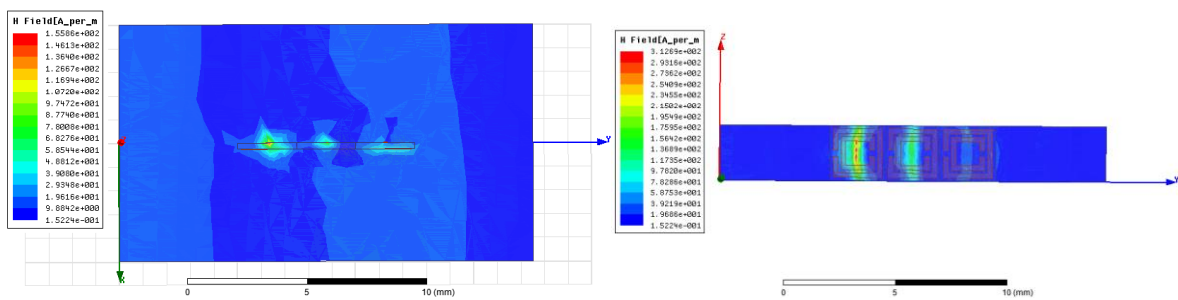
Sve rečeno za električno polje na ovoj frekvenciji vrijedi i za ovu sliku. Iako se amplituda vala pobude ne mijenja značajno, cijelo vrijeme ostaje oko  $2 \times 10^1$  V/m, lijepo se vidi na desnom prikazu smjer širenja vala, odnosno u smjeru Y-osi, kao i najjača amplituda zbog sekundarnih valova na prvom elementu u nizu.





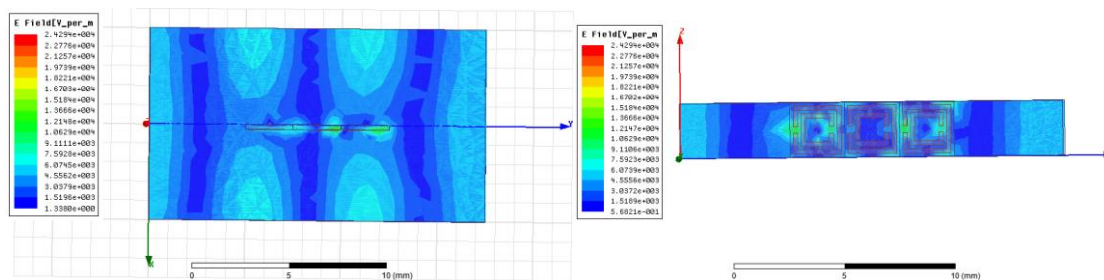
**SI.5.9** – Električno  $E$ -polje za frekvenciju 15 GHz.

Vidimo da amplituda nakon dolaska na metamaterijalnu strukturu zadržava iste vrijednosti kao i prije meta strukture, od  $3.4 \times 10^3 \text{ V/m}$  do  $3.4 \text{ V/m}$ . na samoj metamaterijalnoj strukturi jasno je vidljivo da su sekundarni valovi najjači, oko  $1.5 \times 10^4 \text{ V/m}$ , na posljednjem u nizu od tri elementa, što je suprotno rezultatima za vrijednost frekvencije 5GHz, što nam pokazuje potvrdu očekivanog postojanja metamaterijalnih svojstava.



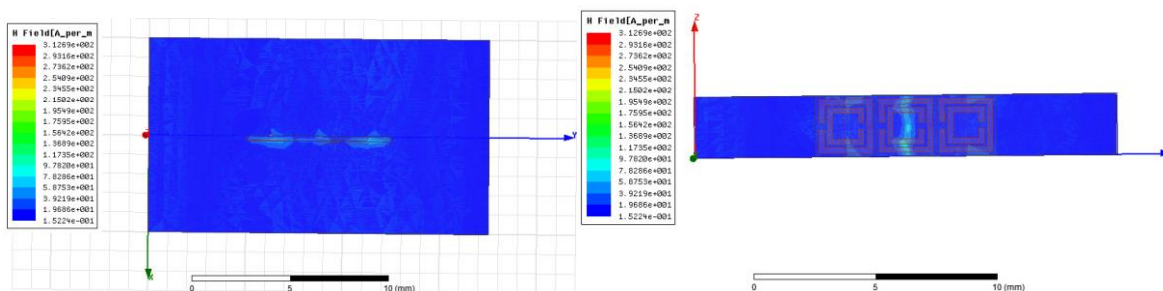
**SI.5.10.** – Magnetsko  $H$  - polje za frekvenciju 15 GHz.

Ovdje slučaj nije kao na slici 5.9, iako je bilo očekivano za ovu frekvenciju, ovdje ipak nije najbolje vidljivo metamaterijalno ponašanje strukture. Mogući razlog tomu leži u činjenici da u našoj strukturi ne postoji struktura žičane mreže, pa se ni ne mogu stvoriti najbolji uvjeti za stvaranje negativnih vrijednosti svih komponenata vala. Postoji zadržavanje iste vrijednosti amplitude i prije i nakon prolaska vala preko metamaterijalne strukture, ali su sekundarni valovi najjači na prvom elementu u nizu, dok ih na trećem gotovo i nema.



**Sl.5.11** – Električno  $E$ - polje za frekvenciju 28 GHz.

Kao i za sliku 5.9, i na ovoj frekvenciji je pretpostavljeno postojanje metamaterijalnih svojstava. Na oba prikaza se vidi zadržavanje amplitude prije i nakon prolaska vala preko metamaterijalne strukture na razini vrijednosti od 1.33 V/m do  $6 \times 10^3$  V/m. Na presjeku u YZ-ravnini se lijepo vidi zadržavanje najveće vrijednosti amplitude sekundarnih valova na razinu  $1.5 \times 10^4$  V/m na sve tri elementa metamaterijalne strukture, bez obzira na kojoj udaljenosti se nalaze od ishodišta vala, čime su potvrđena pretpostavljena metamaterijalna svojstva strukture na ovoj frekvenciji.



**Sl.5.12** – Magnetsko  $H$ -polje za frekvenciju 28 GHz.

Ovdje se dobije isti slučaj kao na slici 5.10, samo uz najveće pojačanje na srednjem elementu same metamaterijalne strukture. I ovdje vrijedi isto pojašnjenje kao na slici 5.10, jedina je razlika u frekvenciji i valnoj duljini vala, odnosno, na udaljenosti gdje će se pojaviti najjača amplituda i izazvati najjače sekundarne valove.

Dakle, iz rezultata je vidljivo da se na 5 GHz materijal ponaša kao običan materijal, tj. nema metamaterijalna svojstva. Kako se val udaljava od ishodišta, tako njegova amplituda slabi.

Pri frekvencijama 15 GHz i 28 GHz, amplituda prolaskom kroz val ne slabi, a uočava se i jačanje amplitude na središnjem dijelu meta-strukture, što odgovara metamaterijalnim svojstvima obrnutog širenja vala i kratkotrajnog pojačanja amplitude.

Kao prepreka pri postizanju boljih i preciznijih, a samim time i točnijih rezultata, pokazala se nemogućnost korištenja više jediničnih ćelija, odnosno da ćelije nisu bile posložene u jedan red, nego bar u matricu 3x3 (3 reda s po 3 ćelijske jedinice u svakom retku). Razlog tomu je konfiguracija računala, odnosno činjenica da sam program HFSS za neke kompleksnije strukture zahtjeva izrazito puno radne memorije, pa dostupnih 8 Gb nije bilo dovoljno, te je postavljeno ograničenje na jedan element stvoren od samo 3 ćelijske jedinice u nizu, kako bi se spriječilo eventualno preopterećenje računala i trajni gubitak istog.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu bilo je potrebno obraditi teorijsku strukturu i osnovu metamaterijalnih struktura s negativnim indeksom loma, kao i simulirati prolazak EM vala kroz takvu strukturu, da bi se i tako potvrdilo postojanje nekih svojstava koja ne postoje u prirodi. To je učinjeno preko fizikalnih zakona i veličina koji su utvrđeni za normalne materijale, tako da svi izvedeni izrazi imaju začetak i potvrdu u nekom od poznatih fizikalnih zakona.

Simulacija je odrađena u programu HFSS, pomoću nekoliko različito dizajniranih struktura koje postižu negativne parametra, tako što se izvedba bazirala na strukturu četvrtastog uparenog rasječenog prstena, dok su ostale strukture samo teorijski obrađene i stvorene u programu HFSS, ali na njima nisu provedena mjerenja i simulacija.

Neočekivano ograničenje se pokazala zahtjevnost programa HFSS za viskom konfiguracijom računala, što je spriječilo dobivanje točnijih rezultata i prikaza simulacije propagacije EM vala. Nemogućnost korištenja više od 3 ćelijske jedinice, spriječila je stvaranje mrežastog uzorka metalne žice, što bi dalo puno konkretniji i kvalitetniji odziv metamaterijala na pobudu valom određene frekvencije. No, iako su postojala ograničenja, čak i za ovako nepotpunu strukturu metamaterijala, dokazano je postojanje nekih metamaterijalnih svojstava pretpostavljenih u teorijskom dijelu rada.

Zato se ovaj rad može smatrati kao dobar uvod u problematiku metamaterijalnih struktura, gdje je prikazano teorijsko porijeklo njihovih svojstava. Također, teorijska osnova i strukture dizajnirane u ovom radu, mogu poslužiti kao baza daljnjem istraživanju, u uvjetima koji će omogućiti slaganje preciznije metamaterijalne strukture, koja će dati još bolji i precizniji prikaz svojstava kao što su putovanje vala unazad, povećanje amplitude i slično.

## Literatura

- [1] N. Engheta, R.W. Ziolkowski; *Metamaterials Physics and Engineering Explorations*; IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc; Hoboken, New Jersey, USA, 2006.
- [2] T. J. Cui, D. R. Smith, R. Liu; *Metamaterials Theory, Design, and Applications*; Springer; New York, USA; 2010.
- [3] J. Bartolić; *Mikrovalna elektronika*; Graphis; Zagreb; 2009.
- [4] X. Wang; *Simulation of Simultaneously Negative Medium Metamaterials*; Virginia Polytechnic Institute and State University; Falls Church, Virginia; 2009.
- [5] S. A. Ramakrishna, T. M. Grzegorzcyk; *Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials*; Spie Press, CRC Group, USA, 2009.
- [6] I. Mohamad; *The Application of Negative Refractive Index Metamaterials to mm and Sub-mm Wavelength Instrumentation*; The University of Manchester; 2013.
- [7] R. Marqués, F. Martin, M. Sorolla; *Metamaterials with Negative Parameters - Theory, Design, and Microwave Application*; John Wiley & Sons, Inc.; Hoboken, New Jersey, USA, 2008.

## **Sažetak**

U ovom radu govori se o metamaterijalnim strukturama s negativnim indeksom loma, odnosno dvostruko negativnim metamaterijalima. Govori se o njihovom postanku, klasifikaciji, razvoju i primjeni. Građu metamaterijala čine jedinične ćelije u rasporedu pomoću kojeg postizemo negativnu permitivnost i negativnu permeabilnost. Negativne vrijednosti permitivnosti dobivene su pomoću strukture rešetke, a negativna permeabilnost je ostvarena uz pomoć struktura koje se nazivaju rezonatori u obliku podijeljenog prstena. Izvedena je i simulacija propagacije EM vala kroz metamaterijal koji čine tri jedinične ćelijske strukture oblika podijeljenog prstena. Također su obrađene i tri dodatne vrste ćelijskih struktura. Sva svojstva metamaterijala su potvrđena s fizikalnim izvodima formula preko poznatih zakona fizike.

**KLJUČNE RIJEČI:** metamaterijali, negativni, indeks, loma, lijevo-orijentirani materijali, dvostruko negativni materijali, odziv, električnog polja, rezonator, jedinična ćelija, podijeljeni prsten.

## **NEGATIVE REFRACTIVE INDEKS METAMATERIALS**

### **Abstract**

This paper discusses the metamaterial structures with a negative index of refraction, or double negative metamaterials. It talks about their origin, classification, development and application. The material consists of metamaterial unit cell in the schedule by which we achieve a negative permittivity and negative permeability. The negative permittivity values were obtained using a lattice structure, a negative permeability is achieved by means of structures which are referred to as resonators in the form of a split ring. Performed the simulation and EM wave propagation through the metamaterial, which consists of three unit cell structure in form of a split ring. They also analyzed three additional types of cell structures. All properties of metamaterials are confirmed by physical derivations of formulas the known laws of physics.

**KEY WORDS:** metamaterials, negative, refractive, index, left-handed materials, LHM, double-negative, DNG, response, electric field, resonator, unit cell, SRR

## **Životopis**

Ivan Perić rođen je u Osijeku, 4.9.1985. godine. 2000. godine završava osnovnu školu „Josip Kozarac“ u Josipovcu, te upisuje I. Gimnaziju u Osijeku, koju završava 2004. godine. Iste godine kao redovan student upisuje „Elektrotehnički fakultet“ u Osijeku, sveučilišni studij, smjer računarstvo i komunikacije. U naredne četiri godine dolazi do statusa absolventa, no prekida studiranje. Akademske 2014./15. ponovno upisuje Elektrotehnički fakultet, preddiplomski studij, smjer računarstvo, ovaj puta u statusu izvanrednog studenta.

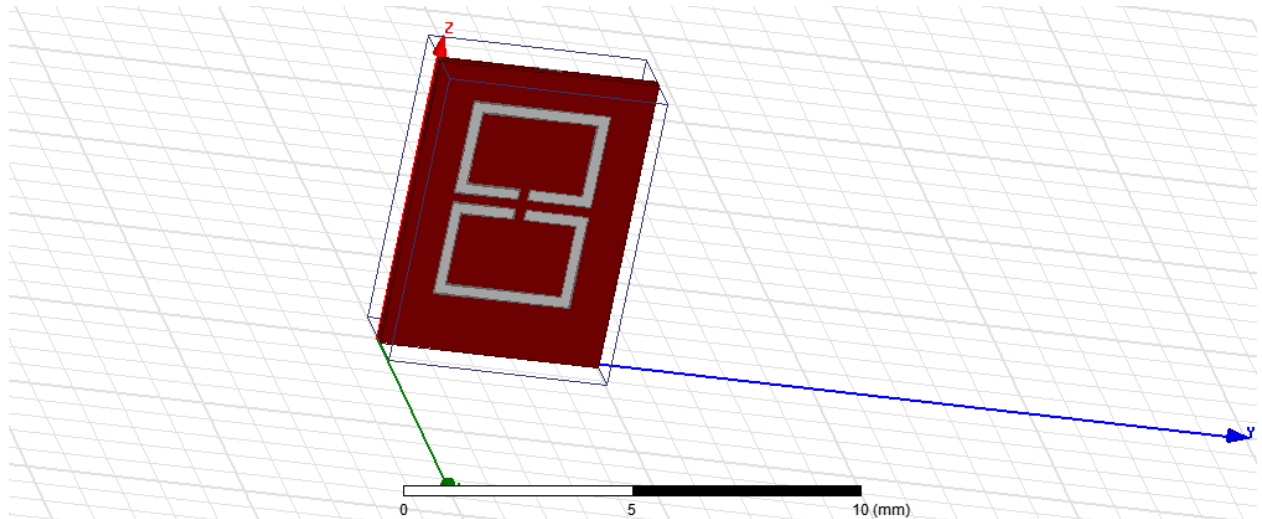
---

Potpis

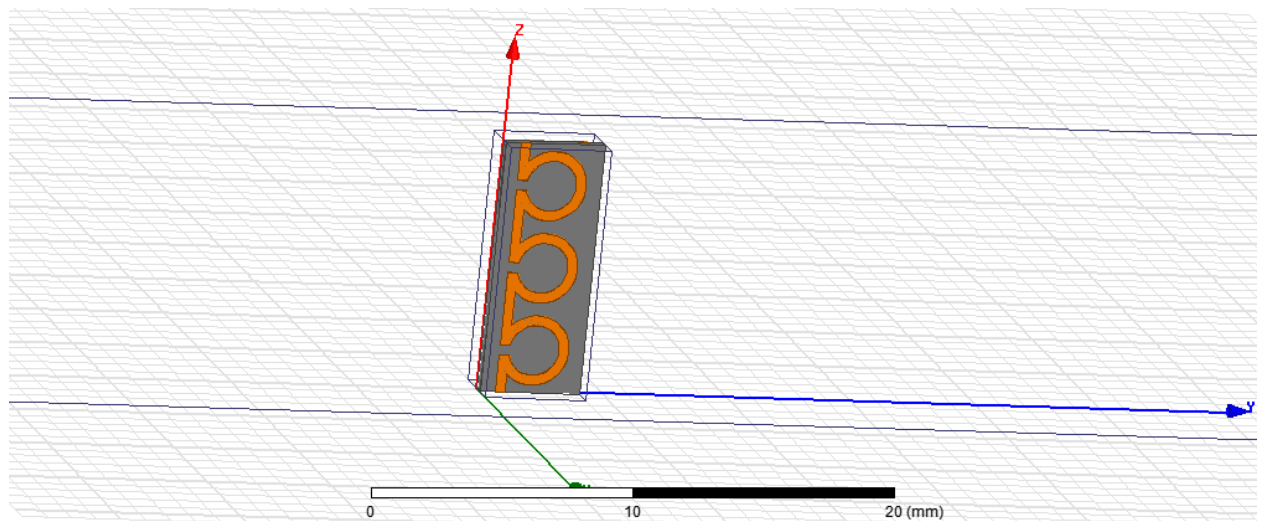
## Prilozi

[P1] <http://www.nature.com/articles/ncomms6841>

[P2] Osno-simetrični SRR u HFSS-u



[P3] Omega Prsten





[P4] S –Prsten

