

Mágneses anyagok és elektromágneses metaanyagok modellezése és mérnöki alkalmazásai

MTA Doktora Értekezés Tézisei

Szabó Zsolt

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatika Kar

Budapest, 2017

1. Bevezetés és a kutatás célkitűzései

Az elmúlt huszonöt esztendő alapvető változásokat hozott a mérnöki tevékenységekben. Egyrészt a számítástechnikai eszközök és szoftverek nagymértékű fejlődése következtében a mérnöki munka ma már elképzelhetetlen a különböző tervező programok alkalmazása nélkül. Teljes termék prototípusok készíthetők és tesztelhetők számítógépes szimulációk segítségével. Másrészt a kész termékek nagy megbízhatósággal gyárthatók a tervezést követő végső lépésben. A gyártás teljesen automatizált, emberi beavatkozást legtöbbször nem, esetleg csak felügyeletet igényel. Hasonló fejlődés ment végbe az anyagtudomány területén is, aminek következtében a mérnöki tervezés során felhasználható különböző tulajdonságú mesterséges anyagok és szerkezetek skálája nagymértékben kibővült. Új fizikai jelenségek alkalmazása áll az anyagtudományi kutatások középpontjában, hogy olyan különleges anyagtulajdonságokat is megvalósíthassunk, amelyek a természetes anyagok esetén egyáltalán nem, vagy csak korlátozott mértékben fordulnak elő. Ezért folyamatos az igény a meglévő szimulációs környezet fejlesztésére, és annak újabb anyagmodellekkel való bővítésére.

A mágnesesség nagyon régóta ismert és kutatott jelenség, azonban a kereskedelmi elektromágneses térszámító programcsomagokban még nem elterjedt a mágneses hiszterézis figyelembevétele. Ez részben a jelenséget okozó fizikai folyamatok összetettségének, másrészt a ferromágneses anyagokat tartalmazó eszközöket leíró nemlineáris parciális differenciális egyenletek numerikus megoldása során szükséges memória és számításgigáknek a következménye. Ezért első téziscsoportom olyan makroszkopikus Preisach típusú mágneses hiszterézis modellre vonatkozik, amelyik zárt alakban adja meg a mágneses indukciót és a dinamikus permeabilitást a mágneses térerősség függvényében. A zárt alakú összefüggések következtében a modell hatékonyan alkalmazható áramkör szimulációs vagy elektromágneses térszámító programcsomagokban.

A mikrohullámú tartománynál nagyobb frekvenciákon a természetben előforduló anyagoknak nincsen számottevő mágneses viselkedése. A mágnesesség klasszikus elmélete szerint az anyagot alkotó mágneses momentumok precessziós mozgást végeznek a lokális mágneses tér iránya mentén. A precesszió jellegzetes ideje nagyobb, mint a mikrohullámoknál nagyobb frekvenciájú elektromágneses terek időbeli változása. Ezért az optikai frekvenciákon a természetben előforduló anyagok relatív mágneses permeabilitása $\mu_r \approx 1$. Az utóbbi évtizedben ugrásszerűen megnőtt a különféle metaanyagoknak vagy metafelületeknek nevezett elektromágneses struktúrákat kutató csoportok száma. Ezen kutatások egyik célkitűzése a mágneses jelenségek kiterjesztése az optikai tartományokra és számottevő mágneses tulajdonságokkal rendelkező metaanyagok létrehozása. Az elektromos és mágneses tulajdonságokkal egyaránt rendelkező anyagok lehetőséget teremtenek a törésmutatónak és a hullámimpedanciának az együttes beállítására, tehát az elektromágneses hullámok terjedésének és visszaverődésének teljes és pontos mérnöki tervezésére.

Az anyagok elektromágneses hullámokkal való kölcsönhatása nagymértékben függ a kémiai összetételtől (Cullity & Graham, 2008). A strukturálás azonban még a kémiai összetételnél is jobban befolyásolhatja az elektromágneses hullámokkal való kölcsönhatást. A mikro- és nanotechnológia fejlődése lehetőséget nyit kisméretű, összetett geometriával rendelkező szerkezetek létrehozására. A metaanyagok olyan szerkezetek, amelyeknek az elektromágneses tulajdonságai a strukturálás következménye. Mivel geometriai méreteik kisebbek a működési hullámhossznál, ezért a metaanyagok homogén anyagként viselkedhetnek. A fotonikus kristályok szintén strukturált

szerkezetek, azonban geometriai méreteik összevethetők a vezetett hullámhosszal, ezért a diffrakció határozza meg az elektromágneses viselkedésüket. A kémiai összetétel módosítása és a strukturálás együttes alkalmazása sokszor egymásnak ellentmondó tulajdonságok megvalósítására ad lehetőséget. Ezekkel a mesterséges anyagokkal különleges elektromágneses tulajdonságok is létrehozhatók, például negatív vagy nulla törésmutató.

A metaanyagokban létrejövő elektromágneses hullámterjedés leírható a Maxwell egyenletekkel. Abban az esetben, ha a szerkezetben csak elsőrendű módusok jönnek létre, a szerkezethez effektív anyagparamétereket rendelhetünk. Hasonlóan az atomi rendszerekből felépített természetes homogén anyagokhoz, a metaanyagok is jellemezhetők a szokásos elektromágneses anyagparaméterekkel, mint az elektromos és mágneses szuszceptibilitás, a permittivitás és permeabilitás vagy törésmutató és hullámimpedancia. A metaanyagok homogenizálásának célja, hogy ezeket az effektív elektromágneses paramétereket meghatározzuk, sokszor a mért vagy számított transzmissziós és reflexiós adatok segítségével. A szokásos elektromágneses anyagparamétereket meghatározó eljárásokhoz képest nehézség, hogy metaanyagok esetén egy adott frekvencián négy paramétert (pl. a törésmutató és a hullámimpedancia valós és képzetes részét) egyszerre kell meghatározni. Dolgozatomban második téziscsoportja a Kramers-Kronig összefüggésekkel kapcsolatos, amelyekre zárt alakú kifejezéseket vezetek le. A Kramers-Kronig összefüggések kapcsolatot teremtenek egy lineáris, invariáns és kauzális rendszer kimenetén kapott jel spektrumának valós és képzetes része között. Segítségükkel meghatározható egy rendszer átviteli karakterisztikájának képzetes (illetve valós) része a valós (illetve a képzetes) rész ismeretében. A Kramers-Kronig összefüggéseket alkalmazom a metaanyagok effektív törésmutatójának egyértelmű meghatározására. A harmadik téziscsoportom a metaanyagok homogenizálására és a metaanyag struktúrákhoz rendelhető ekvivalens kompozitokra vonatkozik.

A különleges tulajdonságú metaanyagoknak és metafelületeknek számos alkalmazási lehetőségük van. Mindegyik alkalmazás esetén alapkérdés, hogy milyen geometriájú és összetételű metaanyagokkal érhető el egy kívánt elektromágneses tulajdonság annak érdekében, hogy az elektromágneses teret a kívánt módon tudjuk befolyásolni.

A mikrohullámú tartományon nagyon régóta alkalmaznak különböző lencseantennákat, amelyek síkhullámmá alakítják a hengeres hullámot vagy gömbhullámot. A hagyományos lencseantennák esetében az antennafelület geometriai méretei sokkal nagyobbak az antennák által sugárzott elektromágneses hullámok hullámhosszánál. A metaanyagok lehetőséget teremtenek olyan lencseantennák létrehozására, ahol az elektromágneses hullámtér manipulálása a hullámhossznál kisebb méretekben történik, ami a szerkezetek jelentős méretcsökkenését eredményezi. Kisméretű, nagy nyereségű, minél egyszerűbb szerkezetű metalencsékkel szerelt síkfelületű antennák megvalósítása kihívást jelentő mérnöki feladat.

A metaanyag kutatás egyik ígérete a negatív törésmutatójú vékonyréteggel történő diffrakciós határ alatti képalkotás. Annak ellenére, hogy ez az alkalmazási terület is aktívan kutatott és számos előrelépés történt, az optikai tartományon még mindig nem sikerült ilyen eszközt létrehozni. Egy $n = -1$ törésmutatójú d vastagságú metaanyag réteggel egy pontszerű forrás elektromágneses tere újra fókuszálható, mi több a forrás terének eltűnő, evanescens komponensei is továbbíthatók a képsíkba, így túlléphető az Abbé-féle diffrakciós határ. Azonban számos tényező, köztük a metaanyagok strukturáltsága, a fellépő veszteségek, valamint a negatív mágneses permeabilitás

megvalósítása még mindig elvi és technológiai kihívást jelentenek és határt szabnak az elérhető felbontásnak.

A transzformációs optika egy általános nagyfrekvenciás tervezési eljárás térbeli elektromágneses anyagparaméter eloszlások meghatározására, amelyek úgy befolyásolják az elektromágneses hullámtér terjedését, hogy megvalósul egy adott eszköz működéséhez szükséges funkcionalitás. Ennek a módszernek a segítségével olyan metaanyag bevonatok tervezhetők, amelyek képesek elrejteni erősen szóró objektumokat. Nagyméretű objektumot elrejtő, széles frekvenciatartományban és tetszőleges megvilágítási feltételek mellett működő metaanyag alapú elrejtő eszközt még nem sikerült létrehozni.

Ezekkel az alkalmazás típusokkal kapcsolatos a negyedik téziscsoportom, amelyik antennák nyereségének és irányítottságának növelését megvalósító metafelületekre, diffrakciós határ alatti képalkotást lehetővé tevő kompozit vékonyrétegekre, valamint elektromágneses elrejtést megvalósító rétegstruktúrákra vonatkozik.

2. Tézisek

I. Téziscsoport: Mágneses anyagok hiszterézis karakterisztikájának zárt alakú leírása

A téziscsoporthoz kapcsolódó legfontosabb publikációk: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

I.1 A mágneses anyagok hiszterézisének leírására kidolgoztam egy Preisach modellen alapuló eljárást. Egy speciálisan megválasztott eloszlásfüggvény segítségével zárt alakban adtam meg az Everett integrált, tehát a mágneses indukciót, valamint a dinamikus permeabilitást a mágneses térerősség függvényében. A bevezetett zárt alakú hiszterézis modell mágneses indukciójának a kifejezése csak a négy alapműveletet, valamint valós argumentumú exponenciális és logaritmikus függvényeket tartalmaz, és a dinamikus permeabilitás is zárt alakú kifejezés. Ezért nem szükséges speciális matematikai könyvtár és a modell kellően gyors, hogy sikeresen beépíthető legyen mérnöki programcsomagokba.

A kifejlesztett zárt alakú hiszterézis modell paramétereit optimalizálással határoztam meg, koncentrikus hiszterézis görbék illesztésével. Mivel a koncentrikus görbék mentén a mágneses indukció képlettel megadható, ezért nem szükséges a lépcsősgörbe használata, és a numerikus integrálás sem, tehát a zárt alakú hiszterézis modell előnyösebben illeszthető, mint a hagyományos Preisach modell. Belső hurkoknál a számított és a mért görbék eltérhetnek, amit a Preisach modell módosított változataival, például a mozgó modellel lehet javítani. Megmutattam, hogy a zárt alakú Everett függvényt alkalmazó mozgó modell, két kiegészítő paraméter bevezetésével, jó illesztést eredményez a belső hurkokra is.

I.2 A kidolgozott zárt alakú hiszterézis modellel kétfázisú FINEMET nanokristályos anyag hőmérséklet függvényében mért hiszterézis görbéit illesztettem. Ismerve az anyag szerkezetét, a különböző hőmérsékleteknek megfelelő Preisach függvények összehasonlításával következtetni lehet a domináns kölcsönhatásra a fázisátalakulás során.

I.3 A zárt alakú hiszterézis modellt beépítettem hálózatszimulációs algoritmusokba. Meghatároztam egy tórusz alakú ferromágneses vasmagot tartalmazó tekercsben folyó áram tranziens viselkedésének időfüggését. A számításokban a zárt alakú dinamikus permeabilitást alkalmaztam, így a hiszterézisgörbe numerikus differenciálása elkerülhető, ami stabil iterációs eljárásokhoz vezet.

I.4 A zárt alakú Everett függvényt vektor hiszterézis modellbe is beépítettem, amit elektromágneses térszámításban alkalmaztam, hogy meghatározzam egy hengeres tekercs és egy ferromágneses henger között ható mágneses erőt. A mágneses erőt két különböző módon számítottam ki, amelyek nagyon jó egyezést mutatnak, bizonyítva az eljárások pontosságát.

II. Téziscsoport: Zárt alakú Kramers-Kronig és Kivonó Kramers-Kronig összefüggések

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikáció: [8].

II.1 Zárt alakú kifejezéseket vezettem le a Kramers-Kronig és a Kivonó Kramers-Kronig összefüggésekre. A zárt alakú összefüggéseket a törésmutató valós részének, annak képzetes részéből történő meghatározásával szemléltettem. Az integrálok szingularitásának elkerülése érdekében két hálót alkalmaztam. Az elsődleges háló frekvenciapontjaiban ismert a törésmutató képzetes része. A másodlagos háló frekvenciapontjaiban határozom meg a törésmutató valós részét. A két háló el van tolva egymáshoz képest úgy, hogy a másodlagos háló frekvenciapontjai az elsődleges háló frekvenciapontjai közé esnek. Az elsődleges hálónak a frekvenciapontjai között a törésmutató képzetes részének nullafokú (két frekvencia pont között állandó érték), vagy elsőfokú (két frekvencia pont között lineáris változás) közelítésével vezettem le a Kramers-Kronig és a Kivonó Kramers-Kronig összefüggések zárt alakját. A zárt alakú összefüggések csak a négy alapműveletet, valamint valós argumentumú logaritmikus függvényeket tartalmaznak. Ezért a modellek kellően gyorsak, hogy sikeresen beépíthetők legyenek mérnöki programcsomagokba.

II.2 Megmutattam, hogy a levezetett zárt alakú összefüggések negatív törésmutatójú metaanyagok esetén is alkalmazhatók. A zárt alakú Kramers-Kronig összefüggés nagyon jó közelítéssel szolgáltatja a törésmutató valós részét a képzetes rész ismeretében, ha az elég széles frekvencia tartományon ismert. Ha az adatok sávszélessége nem elég nagy, akkor a zárt alakú Kramers-Kronig összefüggés nem ad elég pontos eredményt. Ilyen esetben viszont, ha valamilyen független mérésből vagy számításból néhány frekvencián, amit horgonyfrekvenciának nevezünk, ismerjük a törésmutató értékét, a zárt alakú Kivonó Kramers-Kronig összefüggés megfelelő pontosságú eredményt szolgáltat. A referenciaként használt metaanyag negatív értékeket is felvevő törésmutatójára megmutattam, hogyan konvergál a zárt alakú Kivonó Kramers-Kronig összefüggés a horgonyfrekvenciák számának a függvényében.

III. Téziscsoport: Metaanyagok homogenizálása

A téziscsoporthoz kapcsolódó legfontosabb publikációk: [9], [8], [10], [11], [12].

III.1 Eljárást dolgoztam ki síkfelületű metaanyagok és metafelületek effektív elektromágneses anyagparamétereinek, a hullámimpedanciának és a komplex törésmutatónak az egyértelmű meghatározására transzmissziós és reflexiós adatokból. A komplex törésmutató számítása komplex függvény logaritmusát tartalmazza, amelyik többértékű függvény. A törésmutató képzetes része egyértelműen meghatározható, azonban a törésmutató valós része tartalmazza a komplex logaritmikus függvény matematikailag lehetséges ágait, amelyek közül egy adott frekvencián csak egynek van fizikai jelentése. Mivel a törésmutató képzetes része egyértelműen ismert, ezért a törésmutató valós része közelítőleg meghatározható a Kramers-Kronig összefüggés segítségével. A kidolgozott eljárás a komplex logaritmikus függvény lehetséges ágai közül azt választja, amelyikkel a törésmutató valós része a legközelebb kerül a Kramers-Kronig összefüggés által adott becsléshez.

A számítások eredményeként kapott metaanyag paramétereket csak az első diszkontinuitásig tekintem érvényesnek. A diszkontinuitás oka lehet a Kramers-Kronig integrál csonkolása következtében fellépő pontatlanság. Az S-paraméterek frekvenciatartományának növelésével, vagy a Kivonó Kramers-Kronig összefüggések alkalmazásával az ilyen típusú diszkontinuitás kiküszöbölhető. A diszkontinuitás jelezheti a homogenizálhatóság határát is. Ebben az esetben a diszkontinuitást nem lehet kiküszöbölni.

III.2 A Kivonó Kramers-Kronig összefüggés sikeresen alkalmazható az effektív törésmutató egyértelmű meghatározására olyan esetekben is, amikor a Kramers-Kronig összefüggés nem ad megfelelő eredményt. Az S-paraméterek véges frekvencia tartományon való ismeretének, következésképpen a Kramers-Kronig integrál csonkolásának a következtében fellépő pontatlanság az effektív törésmutató valós részének diszkontinuitásához vezethet. A FishNet metaanyag homogenizálásával bebizonyítottam, hogy a Kivonó Kramers-Kronig összefüggés alkalmazásával a diszkontinuitás a frekvencia tartomány növelése nélkül kiküszöbölhető. A horgonyfrekvenciáknak megfelelő törésmutató értékeket a diszkontinuitás előtti tartományból olyan frekvenciákon célszerű választani, ahol a logaritmus függvény ágai közötti távolságok számottevők, vagyis a metaanyag optikailag vékony a vezetett hullámhosszhoz viszonyítva.

III.3 Megmutattam, hogy a törésmutató diszkontinuitása az elektromágneses térszámítással meghatározott S-paraméterek pontatlanságának a következménye is lehet. A numerikus térszámítás nem elég sűrű hálójá és az időtartománybeli szimulációk esetén a nem elég hosszú szimulációs idő vezethet ilyen hibákhoz. Ezeknek a hibáknak a kiküszöbölése jelentősen megnövelheti a szimulációs időt. Ezért célravezetőbb frekvenciatartománybeli megoldóval kiegészítő szimulációkat végezni azokra a frekvenciasávokra, ahol növelni szeretnénk az S-paraméterek pontosságát. Mivel ezek a frekvenciatartományok általában nem túl szélesek, ezért a kiegészítő szimulációk nem időigényesek. A FishNet metaanyagot használva példaként megmutattam, hogy a Kivonó Kramers-Kronig összefüggés sikeresen alkalmazható a törésmutató valós részének egyértelmű meghatározására a véges frekvencia tartományon. A horgonyfrekvenciáknak megfelelő törésmutatók időtartománybeli szimulációból való közvetlen kiválasztása az S-paraméterek pontatlansága miatt nem lehetséges. Ezért az időtartománybeli szimuláció m ágindexei alapján, a frekvenciatartománybeli szimuláció S-paramétereiből határozom meg a horgonyfrekvenciáknál a törésmutató értékeit.

III.4 Megmutattam, hogy a kompozit anyagok nagyfrekvenciás keverési törvényei sikerrel alkalmazhatók rezonáns metaanyagok jellemzésére. A kifejlesztett Maxwell-Garnett alapú nagyfrekvenciás keverési törvénnyel meghatároztam vágott gyűrűkből (Split Ring Resonator, SRR) felépített mágneses metaanyag kompozit megfelelőjét. Megmutattam, hogy a mikrohullámú frekvenciatartományon működő, négyszögrácsba elrendezett szigetelő gömbökből álló kompozitnak ugyanolyan mágneses permeabilitás van, mint az SRR metaanyagnak.

IV. Téziscsoport: Metaanyagok és kompozitok mérnöki alkalmazásai

A téziscsoporthoz kapcsolódó legfontosabb publikációk: [13], [P1], [14], [15], [16], [17].

IV.1. Antennák nyereségének növelése metalencsékkel [13], [P1]

Tervező eljárást dolgoztam ki kisméretű, nagy nyereségű, metalencsékkel szerelt síkfelületű antennák megvalósítására. A tervező eljárás két fő részből áll. Első lépésként a működési frekvencián közel nulla törésmutatójú, kisveszteségű metaanyag elemi celláját terveztem meg merőleges beesésű

síkhullám gerjesztésre. A tervezés második lépéseként véges kiterjedésű metafelületet integráltam az antennával annak nyereségének növelése érdekében.

Mivel a metafelület szélén található elemi cellák esetén az antenna által gerjesztett elektromágneses tér nem merőleges beesésű síkhullám, ezért inhomogén metafelület alkalmazását javasoltam az eszköz nyereségének további javítására.

A patch antenna nyereségének javítására homogén és inhomogén (SRR és Folded Wire típusú) metafelületeket terveztem. A kialakított metaanyag réteg a hordozón négyzetes mátrix elrendezésű, és elemi cellánként egy hurokrezonátort tartalmaz. Az inhomogén szerkezetek elemi celláinak mérete ugyanakkora, mint a homogén metaanyagé, azonban megváltoztattam egyes hurokrezonátorok geometria paramétereit. Az eszköz szimmetria tulajdonságai miatt az elrendezés átlóira és oldalfelező merőlegeseire szimmetrikusan elhelyezkedő elemi cellákban a hurokrezonátorok egymással azonos méretűek.

Szimulációkkal és mérésekkel igazoltam, hogy a metalencsével szerelt patch antenna nyeresége nagyobb, mint az önmagában álló patch antennáé.

A tervezett metalencsék megvalósíthatók a nyomtatott áramkörök gyártásánál használatos konvencionális technológiával, ezért alkalmasak a sorozatgyártásra.

IV.2. Diffrakciós határ alatti képalkotás meta-kompozitokkal [14], [15]

Meghatároztam a diffrakciós határ alatti felbontást lehetővé tevő negatív törésmutatójú periodikus metaanyag réteg elemi cella méretének felső határát.

Mivel 100 nm nagyságrendű felbontás eléréséhez 10-20 nm nagyságú elemi cella méretű metaanyag szükséges, és ilyen kis méretek esetén a negatív mágneses permeabilitás létrehozása még nem megoldott, ezért többrétegű szigetelő - kompozit anyagokból álló, diffrakciós határ alatti képalkotást lehetővé tevő sík lencsét terveztem.

Ennek érdekében rekurzív algoritmust dolgoztam ki dielektrikumba ágyazott tetszőleges rétegszámú bevonattal rendelkező gömbalakú szemcsékből álló kompozit effektív permittivitásának a meghatározására. Az általam kifejlesztett Transfer Matrix módszert használó programcsomag segítségével végeztem el a szükséges elektromágneses térszámítást.

Megmutattam, hogy az elérhető legjobb felbontást lehetővé tevő kompozit SiO_2 -ba ágyazott Ag nanogömbökből áll és megadtam az elrendezés paramétereinek értékét.

IV.3. Elektromágneses elrejtés metaanyagokkal [16], [17]

Megmutattam, hogy megfelelő strukturálással olyan anizotróp kompozit rétegekből felépített metaanyagokat lehet tervezni, amelyek képesek elrejtetni erősen szóró objektumokat. A kompozit szigetelő mátrixba rendezett ellipszoid alakú fémes részecskékből áll. Mivel a részecskék mérete sokkal kisebb, mint a hullámhossz, a kompozitok effektív anyagparamétereit anizotróp Maxwell-Garnett keverési törvénnyel írtam le.

Meghatároztam az infravörös tartományban működő elrejtő köpenyt megvalósító kompozit rétegek paramétereit: az ellipszoid alakú fémrészecskék méreteit, valamint a kitöltési tényezőt.

3. Kitekintés

Értekezésem két nagy tématerület köré csoportosul, az egyik a mágneses hiszterézis hatékony modellezése; a másik a nagyfrekvenciákon, ami akár az optikai tartomány is lehet, strukturálással megvalósított különleges tulajdonságú metaanyagok homogenizálása és mérnöki alkalmazásai.

A mágneses hiszterézis jelenségének figyelembevételével még hatékonyabb villamos készülékek tervezhetők. Mivel a világ energiafogyasztásának tekintélyes része a különböző eszközöket működtető villanymotorokhoz, a minden elektromos készülékben megtalálható transzformátorokhoz kapcsolódik, ezért ezen eszközök hatásfokának akár csak kismértékű javítása is hatalmas jelentőségű. A feleslegesen disszipált energia csökkentése közvetetten környezetünkre is hatással van, a meg nem termelt energia annak megóvását eredményezi. Az általam javasolt zárt alakú hiszterézis modell hozzájárulhat ennek a célkitűzésnek a megvalósításához.

A metaanyagok nagyon aktívan kutatott tématerület. Az alapkutatás eredményeként a metaanyagok az ipari alkalmazhatóság közeli fázisába kerültek, például a mikrohullámú eszközök és antennák vagy az optikai érzékelők területén. A jövőben a metaanyag alapú elektromágneses eszközök széleskörű elterjedése várható. Már megjelentek a metaanyag technológiát alkalmazó cégek. Például a 2012-ben alapított KYMETA cég metaanyag alapú műholdas kommunikációs rendszerrel jelent meg a piacon. A közeljövőben számos hasonló vállalkozás megjelenése várható.

A metaanyagok lehetőséget teremtenek az elektromágneses tér mágneses és elektromos összetevőjével is kölcsönhatásban levő funkcionális szerkezetek létrehozására. Olyan eszközök kifejlesztését ígérik, amelyek túllépnek a ma használatos technológiák határain. Integrálásuk a meglévő elektronikai, optikai stb. eszközökkel egy új technológiai forradalmat indíthat el.

4. A tézisekben szereplő hivatkozások

- [1] Zs. Szabó and G. Kádár, “Ferenc Preisach, the forgotten Martian,” in *Preisach Memorial Book*, A. Iványi, Ed. Akadémiai Kiadó Budapest, 2005, pp. 1–4.
- [2] Zs. Szabó, “A Preisach hiszterézis modell,” *Hiradástechika*, vol. LVIII, no. 3, pp. 47–56, 2003.
- [3] Zs. Szabó, I. Tugyi, G. Kádár, and J. Füzi, “Identification procedures for scalar Preisach model,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 343, no. 1, pp. 142–147, 2004.
- [4] Zs. Szabó, “Preisach functions leading to closed form permeability,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 372, no. 1, pp. 61–67, 2006.
- [5] A. Kákay, Zs. Szabó, G. Kovács, and L. K. Varga, “Temperature dependence of the Preisach function for ultrasoft nanocrystalline alloys,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 372, no. 1, pp. 401–405, 2006.
- [6] Zs. Szabó and J. Füzi, “Implementation and identification of Preisach type hysteresis models with Everett Function in closed form,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 406, pp. 251–258, 2016.
- [7] Zs. Szabó, J. Füzi, and A. Iványi, “Magnetic force computation with hysteresis,” *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 1013–1022, 2005.
- [8] Zs. Szabó, “Closed Form Kramers-Kronig Relations to Extract the Refractive Index of Metamaterials,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 4, pp. 1150–1159, 2017.

- [9] Zs. Szabó, G.-H. Park, R. Hedge, and E.-P. Li, "A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers–Kronig relationship," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 10, pp. 2646–2653, 2010.
- [10] Zs. Szabó and J. Füzi, "Equivalence of Magnetic Metamaterials and Composites in the View of Effective Medium Theories," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 50, no. 4, pp. 1–4, 2014.
- [11] A. Kalvach and Zs. Szabó, "Calculation of the image of extended objects placed behind metamaterial slabs," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 47, pp. 111–120, 2016.
- [12] Zs. Szabó and E.-P. Li, "Effective material parameters of Fishnet Type Metamaterials," *Pollack Periodica*, vol. B, pp. 231–243, 2010.
- [13] D. Li, Zs. Szabó, X. Qing, E.-P. Li, and Z. N. Chen, "A high gain antenna with an optimized metamaterial inspired superstrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 12, pp. 6018–6023, 2012.
- [14] Zs. Szabó, Y. Kiasat, and E.-P. Li, "Sub-wavelength Imaging with Composite Metamaterials," *Journal of the Optical Society of America B - Optical Physics*, vol. 31, no. 3, pp. 648–655, 2014.
- [15] Y. Kiasat, Zs. Szabó, X. Chen, and E.-P. Li, "Light interaction with multilayer arbitrary anisotropic structure: an explicit analytical solution and application for subwavelength imaging," *Journal of the Optical Society of America B - Optical Physics*, vol. 31, no. 3, pp. 648–655, 2014.
- [16] K. Körmöczi and Zs. Szabó, "Near-Infrared Invisibility Cloak Engineered With Two-Phase Metal-Dielectric Composites," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 50, no. 2, pp. 209–212, 2014.
- [17] K. Körmöczi and Zs. Szabó, "Simulation of transformation optics designed metamaterial for electromagnetic cloaking," *Period. Polytech. Elec. Eng. Comp. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 63–69, 2012.

Szabadalom

- [P1] Zs. Szabó, Eszköz elektromágneses hullám terjedési karakterisztikájának befolyásolására és azzal megvalósított antenna elrendezés, Magyar szabadalom, P1500187, 2016.

Az értekezés tárgyköréhez szorosan kapcsolódó egyéb publikációk

1. Y. L. Hor, Zs. Szabó, H. C. Lim, J. F. Federici and E.-P. Li, "Terahertz response of microfluidic-jetted three-dimensional flexible metamaterials," *Applied Optics*, vol. 49, no. 8, pp. 1179–1184, 2010.
2. Zs. Szabó, G. Kádár and J. Volk, "Band gaps in photonic crystals with dispersion," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 521–533, 2005.
3. Zs. Szabó, G. Kádár and J. Balázs, "Simulation of photonic crystal waveguides with dispersion," *Current Applied Physics*, vol. 6, no. 2, pp. 149–153, 2006.
4. Zs. Szabó and G. Kádár, "Optikai tiltott energiasávok - Fényhullámok terjedése mesterséges, periodikus szerkezetű anyagokban," *Hiradástechnika*, vol. 60, no. 2, pp. 4–7, 2005.
5. R. Hegde, Zs. Szabó, Y. L. Hor, Y. Kiasat, E.-P. Li and W. J. R. Hoefer, "The Dynamics of Nanoscale Superresolution Imaging With the Superlens," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 10, pp. 2612–2623, 2011.
6. M. Stepanova, T. Fito, Zs. Szabó, K. Alti, A. P. Adeyenuwo, K. Koshelev, M. Aktary and S. K. Dew, "Simulation of electron beam lithography of nanostructures," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 28, no. 6, pp. C6C48–C6C57, 2010.

Az értekezésben szereplő konferencia előadások és kiadványok

- [K1] Zs. Szabó, J. Füzi and A. Iványi, “Preisach Model with Analytical Derivative in Circuit Analysis,” in Proceedings of the 16. Conference on Soft Magnetic Materials: SMM2003, Düsseldorf, Németország, 2003, pp. 853–855.
- [K2] Zs. Szabó and E.-P. Li, “Extraction of effective material parameters for single and multilayer metamaterial structures,” in Proceedings of the Metamaterials 2010 Congress, Karlsruhe, Németország, 2010, pp. 36–38.
- [K3] Zs. Szabó, Y. L. Hor, E.-P. Li and W. J. R. Hoefer, “Effective Parameters of Terahertz Metamaterials Fabricated with Microfluidic-Jet Technique,” presented at the MRS Spring Meeting & Exhibition 2010, San Francisco, Amerikai Egyesült Államok, 2010, pp. 1–6.
- [K4] A. Kalvach and Zs. Szabó, “Calculation of Imaging Properties of Metamaterials,” presented at the 20th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Montreal, Kanada, 2015, pp. 1–2.
- [K5] Zs. Szabó and A. Kalvach, “Parallel Finite Difference Time Domain Codes for Electromagnetic Metamaterial Calculations,” presented at the 19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Budapest, Magyarország, 2013, paper PB4–17, 2 p.
- [K6] D. Li, Zs. Szabó and E.-P. Li, “Design of Zero-Index Metamaterial Superstrates for Antenna Gain Enhancement Using Effective Medium Theory,” presented at the 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Spokane, Amerikai Egyesült Államok, 2011, paper 1525, 2 p.
- [K7] Zs. Szabó and F. Lénárt, “Inhomogeneous Split Ring Resonator Metasurface to Enhance the Gain of Patch Antennas,” in Abstract Book, Pécs, Magyarország, 2015, paper 112, 1 p.
- [K8] Zs. Szabó, Y. Kiasat and E.-P. Li, “Composite materials for subwavelength imaging,” presented at the MRS Spring Meeting & Exhibition 2011: Recent Progress in Metamaterials and Plasmonics, San Francisco, Amerikai Egyesült Államok, 2011, paper W2.2, 2 p.
- [K9] Y. Kiasat, Zs. Szabó and E.-P. Li, “Advances in Subwavelength Imaging with Composite-Dielectric Multilayer Structures,” presented at the International Conference on Materials for Advanced Technologies, Szingapúr, 2011, paper ICMAT11–A–4471, 1 p.
- [K10] Zs. Szabó, Y. Kiasat and E.-P. Li, “Isotropic Metal-Dielectric Composites for Subwavelength Imaging,” presented at the META’12 the 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Párizs, Franciaország, 2012, p. 37.
- [K11] Zs. Szabó, J. M. Lee, M. A. Mohammad, K. van Daltsen, M. Aktary, M. Stepanova and S. K. Dew, “High Density Nanostructure Fabrication with Electron Beam Lithography,” in Proceeding of the 52nd International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN), Portland, Amerikai Egyesült Államok, 2008, paper P-3C-08, 2 p.