

Vand som alternativt elektromagnetisk materiale i mikrobølge- og antennteknik

Samel Arslanagić, Institut for Elektroteknologi, DTU, Rasmus E. Jacobsen og Andrei V. Lavrinenko, Institut for Fotonik, DTU

Der er en stærkt stigende forskningsinteresse for såkaldte metaflader, som kan manipulere elektromagnetiske felter på vilkårlig vis. Det blev for nylig foreslået at realisere disse flader via inklusioner bestående af intet andet end vand pga. vands pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og de omfattende dynamiske egenskaber, som vand har. I nærværende artikel gennemgår vi nogle af vores nylige resultater inden for simple vandbaserede metaflader for en række vigtige anvendelser inden for mikrobølge- og antennteknik.

En ganske omfattende forskningsindsats inden for fagområdet metamaterialer (MM'er) og metaflader (MF'er) har over de seneste år ført til bemærkelsesværdig fysik med stort potentiale for at imødekomme flere videnskabelige samt teknologiske udfordringer af samfundsmæssig betydning [1]. MM'er er kunstige materialer, som kan virkeliggøre egenskaber, der ikke findes i naturligt forekommende materialer, og som dermed kan interagere med elektromagnetiske felter på vilkårlig vis. Fx er det muligt at realisere materialer med negativ dielektricitetskonstant eller permittivitet, permeabilitet og brydningsindeks. MM'er består af en samling af (ofte periodisk fordelte) elektrisk små partikler/inklusioner, hvori elektriske og/eller magnetiske dipolresonanser kan anslås effektivt. Disse resonante partikler opfører sig på samme måde, som almindelige atomer gør i naturligt forekommende materialer: de giver anledning til elektriske og magnetiske dipoler, som fører til henholdsvis dielektriske egenskaber (permittivitet) og magnetiske egenskaber (permeabilitet).

Den indledende indsats var hovedsageligt rettet mod rumlige, tredimensionelle MM'er. Det blev dog hurtigt indset, at blot et enkelt lag af disse materialer, kendt som MF'er, har lignende og ofte mere nyttige funktionaliteter. De oprindelige MF'er anvendte metalliske, resonante inklusioner [2], hvis egenskaber blev begrænset af ledningstab, navnlig ved høje frekvenser. Derfor blev blikket for nylig kastet på dielektriske materialer med høj permittivitet og lave tab [3]. Intense forskydningsstrømme og resonanser kan anslås i sådanne inklusioner med ønskede elektriske og/eller magnetiske dipoler til følge. I mikrobølgefrekvensområdet har forskningen hidtil været fokuseret på dyre, keramiske materialer med begrænsede dynamiske egenskaber. Et sandt teknologisk gennembrud kræver dog billige, enkle og miljøvenlige materialer med omfattende dynamiske egenskaber. Til dette formål blev vand for nylig foreslået til brug for de resonante inklusioner i MM'er og MF'er pga. den lave pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og vands høje og ret så temperaturjusterbare permittivitet [4].

I denne artikel opsummerer vi nogle af vores nylige aktiviteter inden for vandbaserede mikrobølge-MF'er. I modsætning til mange andre indsatser, er vores fokus rettet mod flader med enkle og let-fremstillede

inklusioner. Vi fremhæver, hvorledes MF'er bestående af simple stang-lignende vandinklusioner kan filtrere eller "switche" indfaldende elektromagnetiske bølger via en mekanisk rotation på 90° . Vi viser også, hvordan en MF bestående af en række forskellige cylindriske vandinklusioner kan reflektere en indfaldende bølge i en retning, som ikke følger den almindeligt kendte Snells refleksionslov. Dermed emulerer MF'en det, der i antenneverden kendes som et reflekt-array. Endelig viser vi, at blot en enkelt halvkugleformet vandinklusion kan danne grundlag for elektrisk små (små målt i bølgelængder) dielektriske resonator-antennes. Vi viser både numeriske og eksperimentelle resultater. Alle de numeriske resultater er udregnet i Comsol Multiphysics [5]. Artiklen er inspireret af [6–9], som læseren henvises til for yderligere diskussion og tekniske detaljer. Alle resultater er opnået for de såkaldte tidsharmoniske felter, hvor vi har benyttet tidsfaktoren $\exp(j\omega t)$, hvor ω er vinkelfrekvensen, og t er tiden. Før vi viser egne resultater, opsummeres kort den elektromagnetiske model for vandets permittivitet, som ligger til grund for dette arbejde.

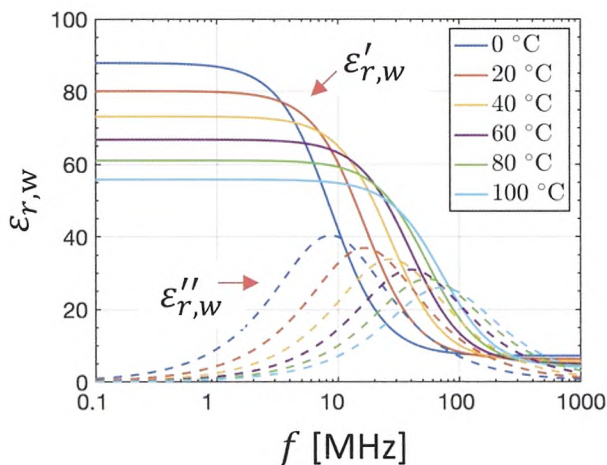
Vandmodel

Vands dielektriske egenskaber kan beskrives med den såkaldte Debye-formel [4, 10], som angiver den relative, komplekse permittivitet $\epsilon_{r,w}$ på følgende form:

$$\begin{aligned}\epsilon_{r,w} &= \epsilon'_{r,w} - j\epsilon''_{r,w} \\ &= \epsilon_\infty(T_w) + \frac{\epsilon_s(T_w) - \epsilon_\infty(T_w)}{1 - j\omega\tau(T_w)},\end{aligned}\quad (1)$$

hvor T_w er temperaturen, ϵ_∞ og ϵ_s er henholdsvis den optiske og statiske permittivitet, mens symbolet τ angiver relaksationstiden. En graf af ligning (1) som funktion af frekvens og temperatur er vist i figur 1. Den reelle del, $\epsilon'_{r,w}$, antager høje værdier i den lave del af frekvensområdet (hvilket foretrækkes for at kunne anslå de ønskede dipolresonanser), mens den aftager ved højere frekvenser, hvor tabene (angivet med $\epsilon''_{r,w}$) går op. Dette begrænser brugen af vand ved høje frekvenser, da tabene utvivlsomt vil dæmpe resonanserne. Et fald i temperaturen mindsker $\epsilon'_{r,w}$, mens en stigende temperatur omvendt mindsker tabene. Figur 1 vidner

om et materiale med omfattende dynamiske egenskaber og med moderate tab i den lave ende af det viste frekvensområde (op til ca. 2 GHz ved 20°C).



Figur 1. Relativ permittivitet af vand som funktion af frekvens, f , og temperatur, T_w .

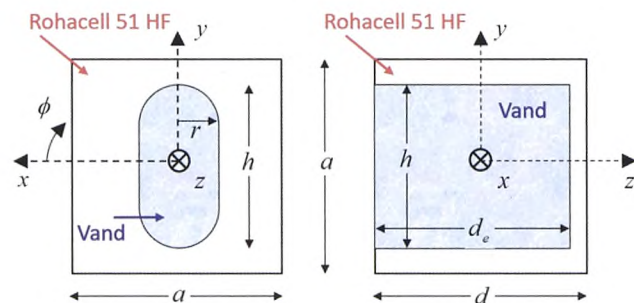
Resultater og diskussioner

Vi viser først en MF som via en simpel mekanisk rotation enten blokerer eller tillader transmission af bølger, og som dermed fungerer som et simpelt filter eller en switch. Dernæst demonstreres et MF-reflekt-

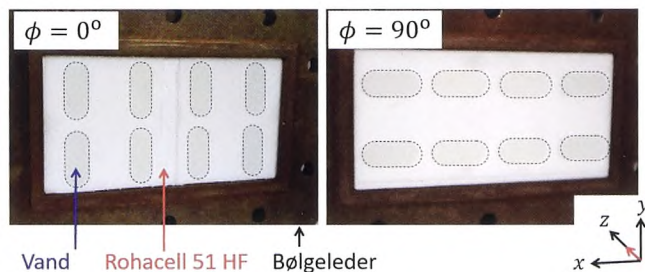
array, og endelig diskuterer vi, hvorledes en enkel vand-inklusion i form af en halvkugle, anslået med en kort monopolantenne, kan føre til elektrisk små dielektriske resonator-antenner.

Metaflader som filtre og switches

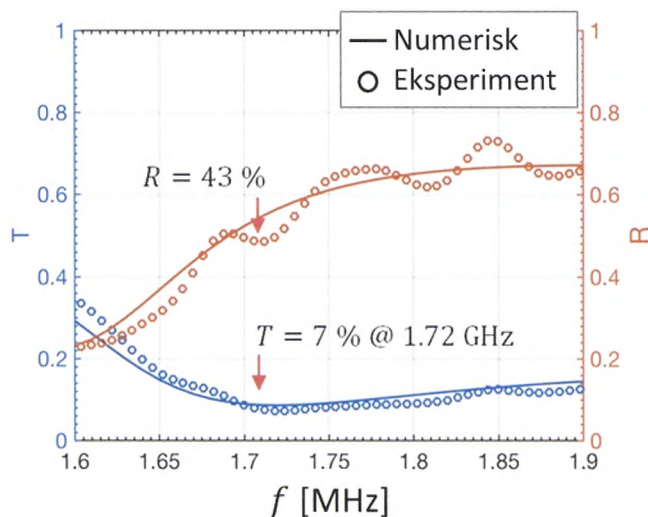
Vi betragter polarisationsfølsomme MF'er, som består af simple stang-lignende vandinklusioner indlejret i et Rohacell 51 HF-baggrundsmedium med en lav permittivitet [6, 8]. Figur 2a viser den såkaldte enhedscelle set både ovenfra (venstre) og fra siden (højre). Et rektangulært (x, y, z) -koordinatsystem er indført som vist i figuren. Perioden for fladen er angivet med a , mens ϕ angiver orienteringen af inklusioner. Enhedscellen er optimeret således, at transmissionen igennem fladen minimeres ved 1,7 GHz, når stængerne antager $\phi = 0^\circ$ -orientering, mens den maksimeres ved 90° ; de geometriske parametre har værdierne $a = 27,4$ mm, $r = 5$ mm, $h = 22,5$ mm, $d_e = 18,7$ mm og $d = 25$ mm. To flader, med hver sin orientering af vandinklusioner, blev fremstillet til dette formål jf. figur 2b, der viser fladerne i en sektion af en rektangulær L -bånds (1–2 GHz)-bølgeleder, som vi har anvendt til den eksperimentelle karakterisering. Den røde pil angiver udbredelsesretningen for den indkommende bølge, som er den grundlæggende TE_{10} -mode [11] i det frekvensområde, som har vores interesse.



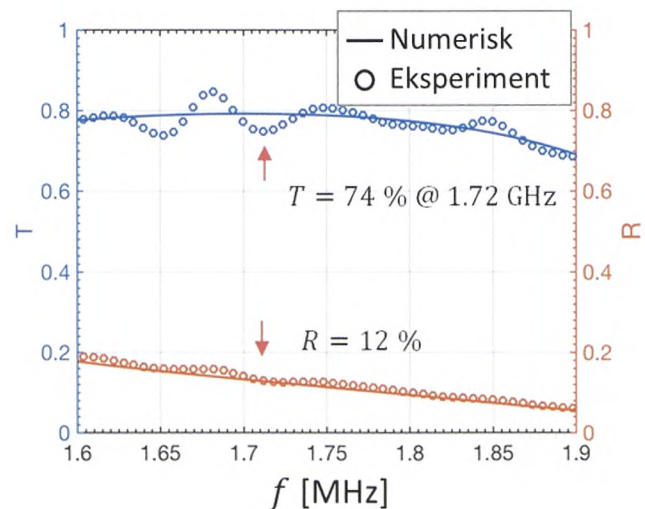
(a)



(b)



(c)



(d)

Figur 2. (a) Stang-lignende vandinklusion for filter/switch-MF'er, (b) viser de fremstillede MF'er, (c) de numeriske og eksperimentelle resultater for transmittans (T) og reflektans (R) for $\phi = 0^\circ$ -orientering, og (d) for $\phi = 90^\circ$ -orientering.

Frekvensresponsen for de to MF'er er vist i figur 2c for $\phi = 0^\circ$ og i figur 2d for $\phi = 90^\circ$, hvor T er dens transmittans, og R er dens reflektans. Det er tydeligt, at den transmitterede effekt er særdeles undertrykt for $\phi = 0^\circ$ -orienteringen af vandinklusioner. Mere specifikt er det kun omkring 7% af den indfaldende effekt, som transmitteres ved 1,72 GHz, mens pasbåndet genoprettes efter en simpel mekanisk rotation på 90° , hvor hele 76% af den indkommende effekt går igennem. Den vandbaserede MF fungerer altså som et filter eller en switch, som ændrer fladens transmittans hele 70% gennem en simpel mekanisk rotation.

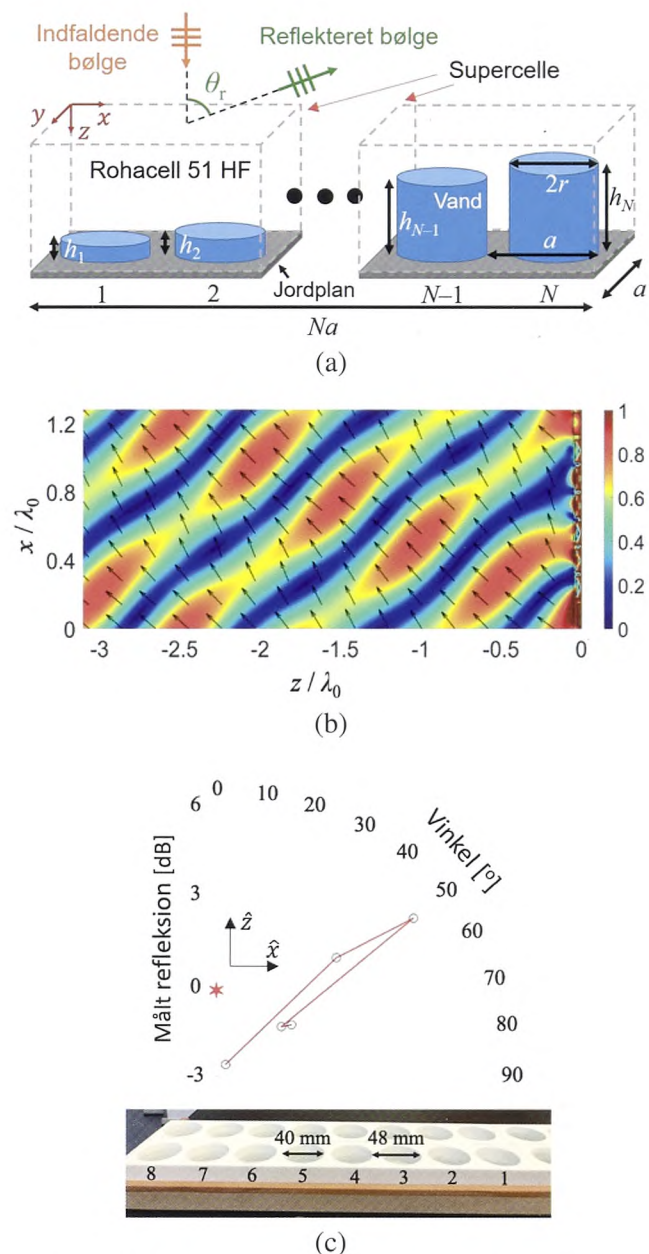
Selvom det ikke er vist eksplicit heri, bemærkes det, at den omtalte switching-funktion også kan realiseres med flader, som er i vakuum (eller luft), og som er belyst med fx plane bølger eller andre bølgetyper, som udstråles af mere lokaliserede kilder såsom dipolantenner. Desuden kan effektiviteten styrkes, hvis flere af disse MF'er stables sammen i en såkaldt MF-stak. Interessant nok kan sådan en stak på effektiv vis indfange, lede og fokusere effekten fra en nærliggende dipolantenne i retningen, hvori fladerne er stablet sammen. Dette sker naturligvis kun, hvis alle flader har $\phi = 90^\circ$ -orienteringen, mens $\phi = 0^\circ$ -orienteringen blokerer transmissionen kraftigt.

Metaflader som reflekt-arrays

Når en plan bølge falder på en plan dielektrisk / metallisk overflade, vides det, at indfaldsvinklen er lig udfaldsvinklen, jf. den almindelige Snells refleksionslov. Hvis man derimod modificerer fladerne ved fx at tilføje inklusioner, som introducerer kontrollerede rumlige fasehop, kan retningen af de reflekterede bølger styres på vilkårlig vis. Dette er i grove træk grundprincippet for de såkaldte reflekt- og transmit-arrays, som længe har været kendte i antenneverden [12, 13], men som for nylig blev kædet sammen med MF'er og de såkaldte generaliserede Snells refleksions- og transmissionslove [2, 14].

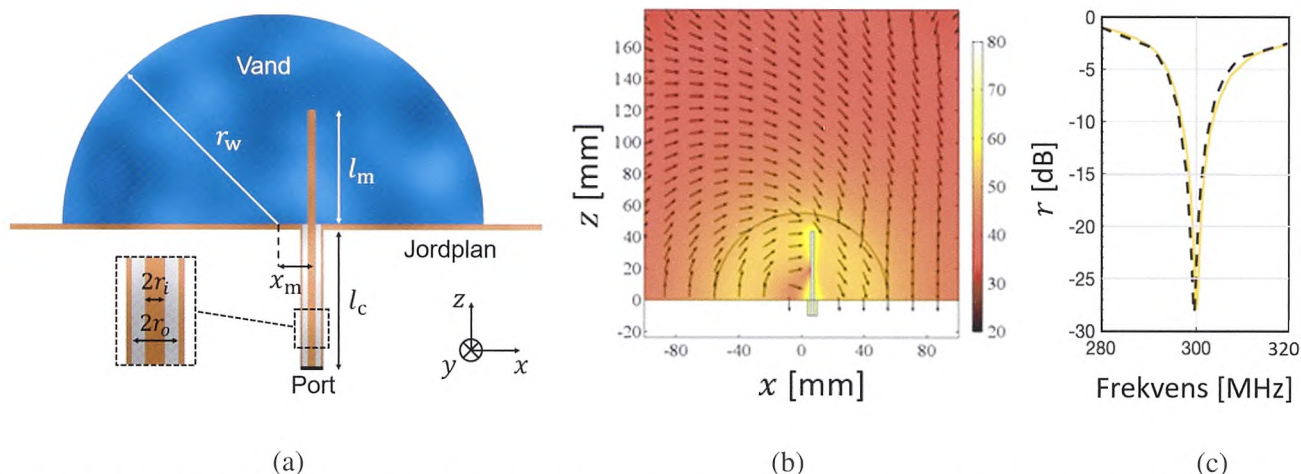
Vi har designet et reflekt-array, som består af N forskellige cylindriske vandinklusioner, igen indlejret i et Rohacell 51 HF-baggrundsmedium med et metallisk jordplan (flade) på bagsiden [8]. Den enkelte cylinder sidder inde i en enhedscelle med perioden a , mens gruppen af de N cylindre udgør supercellen (med perioden Na) for reflekt-arrayet, se figur 3a, som også viser det indførte, rektangulære (x, y, z) -koordinatsystem. Ved at variere vandniveauet i de enkelte cylindre og på den måde anslå magnetiske dipolresonanser med forskellig størrelse og fase, kan vi opnå et totalt faseskift for refleksionskoefficienten på 2π . Faseskiftet muliggør refleksionen af en normalt indfaldende bølge i en vilkårlig retning θ_r , som ikke er i overensstemmelse med den almindelige Snells refleksionslov. Vores supercelle inkluderer 8 cylindre med samme radius $r = 20$ mm, og de respektive højder h_i , $i = 1, \dots, 8$, er 6; 9,6; 10,2; 10,5; 10,7; 10,9; 11,5 og 14,7 mm, mens perioden $a = 48$ mm. Hver cylinder introducerer et faseskift på 45° , og fra den generaliserede Snells refleksionslov [2, 14] bestemmes den forventede refleksionsvinkel til at være $\theta_r \approx 51^\circ$. Fladen er belyst med en normalt indfaldende

plan bølge, hvor styrken af det elektriske felt er 1 V/m, og frekvensen er 1 GHz.



Figur 3. Reflekt-array-supercellen med N cylindriske vandinklusioner (a), størrelsen af det reflekterede elektriske felt (farve) og retning af energiudbredelsen (pile) (b), samt målt refleksion for den fremstillede MF, vist med supercelle (c).

De numeriske resultater er vist i figur 3b, hvor farven angiver størrelsen af det reflekterede elektriske felt, mens pilene angiver udbredelsesretningen for energien. Det reflekterede felt er tilnærmelsesvist en plan bølge, som udbreder sig i en retning, der danner en vinkel på ca. 51° med normalen (som svarer til z -aksen i den viste figur) som forventet. En prototype af reflekt-arrayet indeholdende 4 superceller blev fremstillet, og et udsnit af denne er vist i figur 3c. En specielt udviklet måleopstilling med bl.a. ETS-Lindgren-hornantenner som sender- og modtager-antenner blev brugt i den eksperimentelle karakterisering af reflekt-arrayet. Målingerne er vist i figur 3c, og de afslører klart, at størstedelen af effekten reflekteres i en retning som svarer til omkring 51° .



Figur 4. Vandbaseret dielektrisk resonator-antenne (a), det simulerede elektriske felt (b), samt den simulerede (stiplet linje) og målte refleksionskoefficient (fuldt optrukne linje) (c).

Selvom det ikke er vist i den nærværende artikel, kan en simpel omfordeling af vand imellem de enkelte celler føre til andre værdier af θ_r og dermed til rekonfigurerbare MF'er, som er af interesse for bl.a. kommunikationssystemer.

Metaflade-vandinklusion som dielektrisk resonator-antenne

Mens udvalgte og nøje fordelte vandinklusioner kan danne rammen om MF'er med helt særlige egenskaber, er det lige så interessant at bemærke, at blot en enkelt enhedscelle/vandinklusion kan danne grundlag for simple dielektriske resonator-antenners [8]. Som en illustration betragtes en elektrisk kort monopolantenne med længde l_m over en metallisk jordplan, se figur 4a.

Monopolantennen er en forlængelse af den inderste leder af et koaksialkabel RG402 med indre radius $r_i = 0,92$ mm og ydre radius $r_o = 2,99$ mm. I simuleringerne har vi i bunden af kablet placeret en port, hvorfra en effekt på 1 W sendes til antennen. Grundet den korte længde er monopolen dårligt tilpasset til fødekablet og udstråler derfor stort set ingen energi i det omgivende medium. Hvis man imidlertid beklæder monopolen med en vand-halvkugle, som vist i figur 4a, kan den tilpasses til både fødekablet og det omgivende medium. Dette skyldes resonanser, som monopolen anslår i vand-halvkuglen. Ved en temperatur på 20°C og en frekvens på 300 MHz (vakuumbølglængde $\lambda_0 = 1$ m) kan en magnetisk dipolresonans anslås i vand-halvkuglen, når $r_w = 55,18$ mm $\approx \lambda_0/18$, og når monopolen med $l_m = 43,6$ mm $\approx \lambda_0/23$ er forskudt fra halvkuglens centrum med en afstand på $x_m = 7$ mm $\approx \lambda_0/143$. Det numerisk udregnede elektriske felt er vist i xz -planen i figur 4b, hvor styrken i decibel (dB) er angivet med farverne, mens retningen er angivet med pilene. Et cirkulerende elektrisk felt, som er ækvivalent med en magnetisk dipol, ses tydeligt.

En prototype af resonator-antennen er blevet fremstillet, hvor halvkuglen blev fræset ind i en cylindrisk Rohacell 51 HF-klods, som efterfølgende blev limet til en cirkulær aluminium-jordplan med 1 m i diameter. Jordplanen havde to åbninger: en til monopolantennen og en til at fylde vandet i halvkuglen. Refleksionskoeff-

ficienten, r [dB], er vist i figur 4c; både den målte og den numerisk udregnede respons er inkluderet, og der rapporteres om god overensstemmelse. Mere specifikt haves en refleksionskoefficient på -24,1 dB ved 300 MHz, som viser fremragende tilpasning af antennen til koaksialfødekablet. Stort set al effekt, som sendes langs koaksialkablet, bliver accepteret af resonator-antennen. Det noteres ydermere, at udstrålingseffektiviteten (forholdet imellem udstrålet effekt og effekten, som accepteres af antennen) er omkring 30%. Dette skyldes tab i vandet, men også resonator-antennens rekordlille størrelse, som, elektrisk set, er 18 gange mindre end vakuumbølglængden (det kan nævnes, for god ordens skyld, at en typisk resonant antenne kræver en størrelse, som er det halve af vakuumbølglængden). Hvis kravet om størrelsen lempes, kan man realisere vandantenners med højere udstrålingseffektiviteter, som dermed gør sådanne antenner ret interessante for en række anvendelser i VHF- og UHF-frekvensbånd.

Sammenfatning og konklusion

I nærværende artikel har vi opsummeret en række af vore nylige resultater inden for vandbaserede metaflader og antenner. Simple metaflader, som er i stand til at filtrere og reflektere elektromagnetiske bølger på vilkårlig vis, er blevet fremhævet. Desuden blev det vist, at selv enkelte vandinklusioner kan danne grundlag for elektrisk små dielektriske resonator-antenners. Vi har dermed demonstreret, at vand har et potentiale som et alternativt elektromagnetisk materiale til en række anvendelser inden for mikrobølge- og antennteknik. Selvom vandbaserede metaflader ikke kan konkurrere med konventionelle metaflader, når det gælder fx hastigheden, så bestyrkes potentialet og interessen for disse strukturer med vands lave pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og de omfattende dynamiske egenskaber, som vand har.

Litteratur

- [1] G. V. Eleftheriades og N. Engheta (2011) "Metamaterials: Fundamentals and Applications in the Microwave and Optical Regimes", *Proc. of the IEEE*, bind **99**, side 1618–1621.

- [2] H.-T. Chen, A. J. Taylor og N. Yu (2016) "A review of metasurfaces: physics and applications," *Rep. Prog. Phys.*, bind **79**, side 076401.
- [3] S. Jahani og J. Zubin (2016) "All-dielectric metamaterials," *Nature Nanotechn.*, bind **11**, side 23–36.
- [4] A. Andryieuski, S. M. Kuznetsova, S. V. Zhukovsky, Y. S. Kivshar og A. V. Lavrinenko (2015) "Water: promising opportunities for tunable all-dielectric electromagnetic metamaterials," *Sci. Rep.*, bind **5**, art. nr. 13535.
- [5] Comsol Multiphysics 5.3. (2017) www.comsol.com.
- [6] R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2018) "Water-based metasurfaces for effective switching of microwaves," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, bind **17**, side 571–574.
- [7] R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2019) "Electrically small water-based hemispherical dielectric resonator antenna," *Appl. Sci.*, bind **9**, nr. 22, doi:10.3390/app9224848.
- [8] J. Ø. Nielsen, R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2020) "Water-based reflect-arrays," 14th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), København.
- [9] S. Arslanagić, J. Ø. Nielsen, R. E. Jacobsen og A. V. Lavrinenko (2019) "Water-based microwave metasurfaces and electrically small antennas," 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials, Rom, Italien. Inviteret bidrag.
- [10] W. Ellison (2007) "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure over the frequency range 0 – 25 THz and the temperature range 0 – 100°C," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, bind **36**, side 1–18.
- [11] C. A. Balanis (2012) *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [12] D. M. Pozar, S. D. Targonski og H. D. Syrigos (1997) "Design of millimeter wave microstrip reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, bind **45**, nr. 2, side 287–296.
- [13] C. A. Balanis (2016) *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [14] N. Yu og F. Capasso (2014) "Flat optics with designer metasurfaces," *Nat. Mat.*, bind **13**, side 139–50.



Samel Arslanagić er lektor i anvendt elektromagnetisk feltteori ved DTU Elektro. Hans forskningsinteresser inkluderer bl.a. spredning og interaktion af elektromagnetiske bølger med komplekse materialestrukturer fra radio og op til optiske frekvenser. Han er modtager af DTUs Årets Underviserpris i 2018.



Rasmus E. Jacobsen er ph.d.-studerende ved DTU Fotonik og DTU Elektro. Hans forskningsprojekt omhandler vandbaserede elektromagnetiske systemer og materialer. Rasmus er dimittend fra DTU Elektro med speciale i trådløs kommunikation.



Andrei V. Lavrinenko er lektor og leder af Metamaterials-gruppen ved DTU Fotonik. Hans forskningsinteresser ligger inden for metamaterialer og plasmoniske/optiske materialer, fotoniske krystaller, numeriske beregningsmetoder i fotonik, samt undervisningsmetoder.

PFEIFFER VACUUM

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com