

TERAHERTZ TEKNOLOGI

– ud af laboratoriet og ind i fremtiden

Fra sporing af sprængstoffer til fremtidens 6G-netværk – så vidt spænder de potentielle anvendelser af såkaldt terahertz-teknologi. Bag navnet gemmer sig blot et område i det elektromagnetiske spektrum, det først i løbet af de seneste 30 år er blevet muligt at udforske i detaljer.



Forfatteren
Esben Skovsen er lektor på Institut for Materialer og Produktion ved Aalborg Universitet. Esben forsker i optik og spektroskopi og er blandt andet projektleder på to THz-relaterede forskningsprojekter. es@mp.aau.dk www.mp.aau.dk/researchgroups/physics/

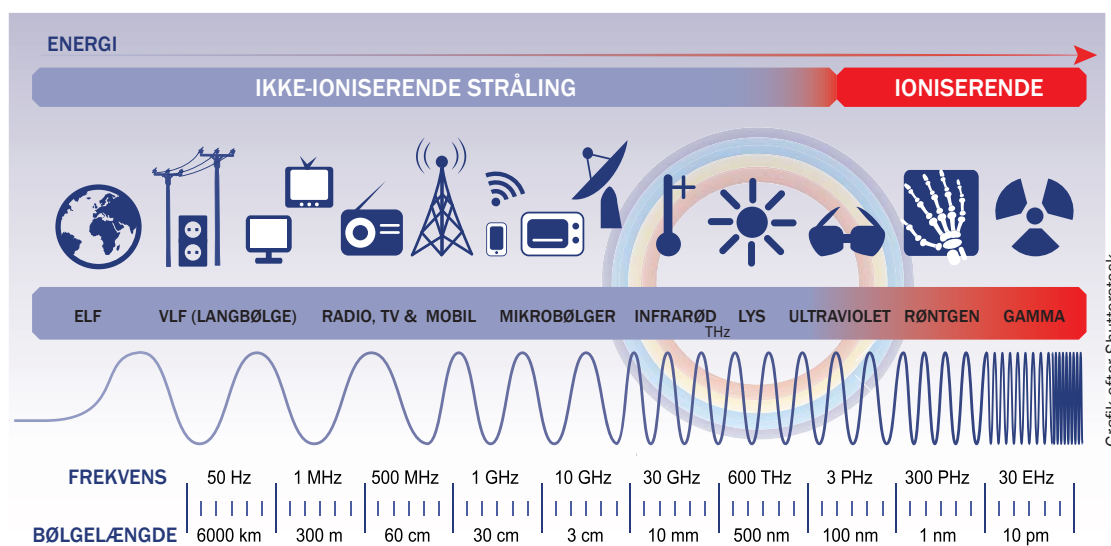
Elektromagnetiske stråling i intervallet mellem infrarødt lys og mikrobølger kaldes terahertz-stråling (THz-stråling). Indtil slutningen af 1980'erne var det svært at lave og måle THz-stråling på en praktisk måde, og der har derfor været en lang periode, hvor THz-området var den mindst udforskede del af det elektromagnetiske spektrum. Problemet var, at datidens elektriske komponenter var for langsomme til at generere stråling med så høje frekvenser (1 THz = 10^{12} Hertz), og at foton-energien af THz-stråling var for

lille til, at man kunne finde egnede materialer til at udvikle en THz-laser. Det har dog ændret sig i løbet af de seneste 30 år, hvor den nødvendige teknologi stille og roligt er blevet tilgængelig. Det er nu blevet muligt at anvende THz-stråling til alt muligt fra sporing af sprængstof og narko til diagnosticering af hudkræft og krops-skannere, der kan kigge efter skjulte våben gennem vores tøj.

Hvad var tricket?

I slutningen af 1980'erne og starten af 90'erne opdagede man, at man kunne generere og måle

frit-propagerende THz-pulser ved hjælp af såkaldte fotokontakter, som man aktiverede med en pulseret laser. Fotokontakterne fungerede med andre ord som en slags antenner, der kunne udsende og opfange THz-stråling, når de blev aktiveret af en kort laserpuls. Ved at variere tiden fra man aktiverede THz-kilden, til man aktiverede dektoren, kunne man måle, hvornår THz-pulsen nåede frem. Senere har man fundet ud af, at man også kan drive fotokontakterne med en kombination af to lasere med næsten samme frekvens. På den



Grifik efter Shutterstock.

Oversigt over det elektromagnetiske spektrum. En terahertz er 10^{12} Hz og forkortes THz. Oftest defineres THz-området til at være frekvensområdet fra 0,1 THz til 10 THz. I luft svarer det til bølgelængder fra 30 μ m til 3mm. Frekvensbåndet fra 0,3-3,0 THz kaldes THF-båndet og ligger lige over EHF-båndet, hvor fremtidens 5G-netværk kommer til at operere. THz-stråling er ikke-ioniserende og er ufarligt for mennesker ved lave intensiteter.

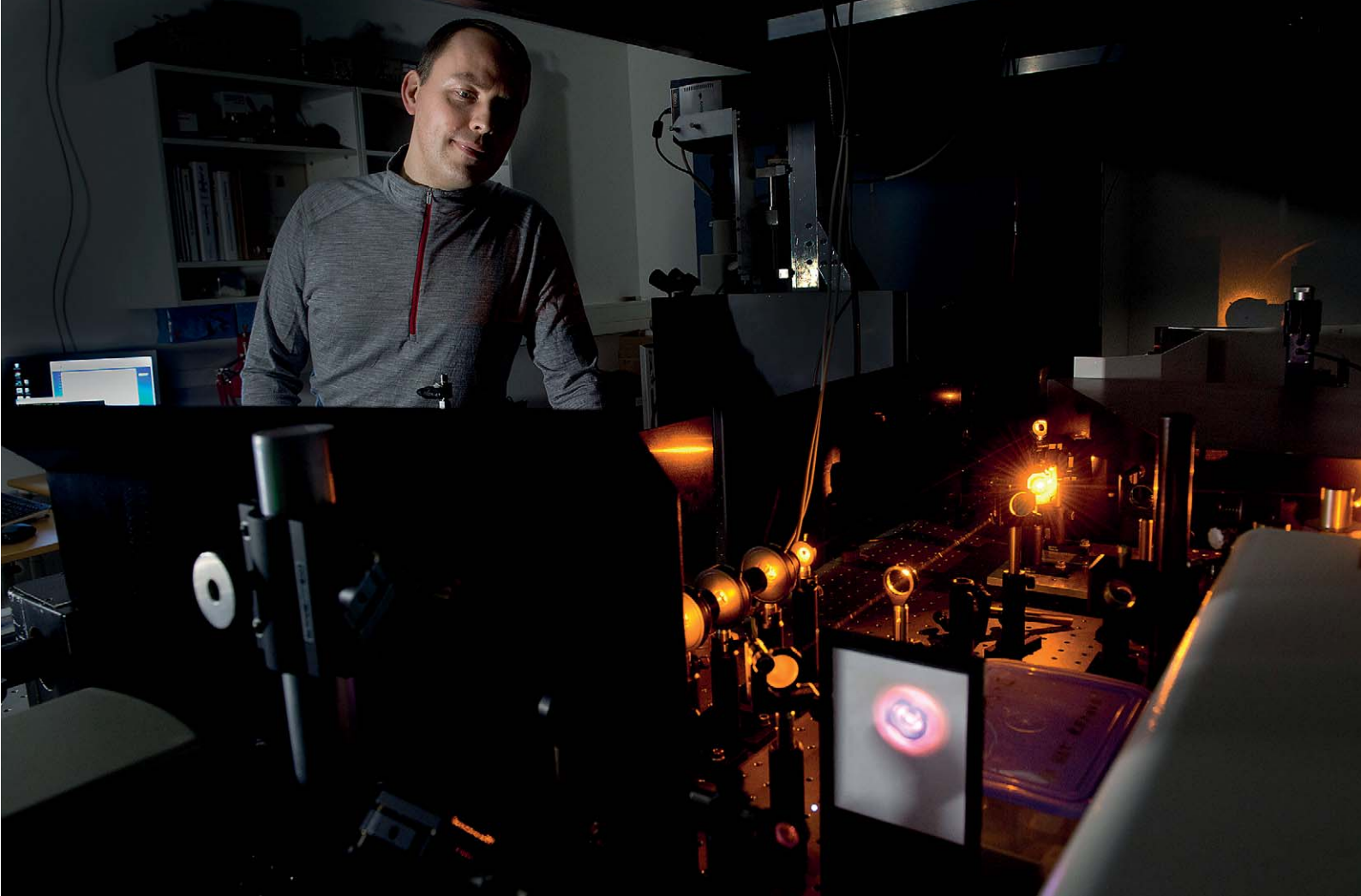


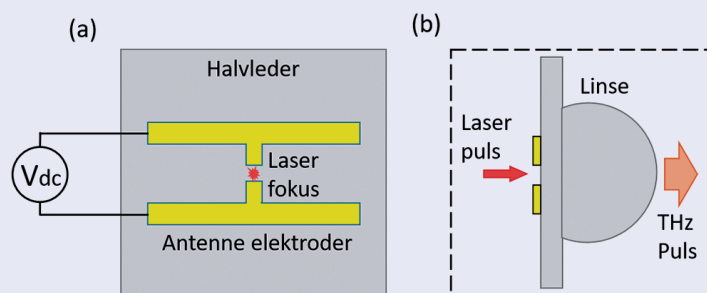
Foto: Lars Horn, "Baghuset".

måde udsendes der stråling med en frekvens, der svarer til forskellen mellem de to lasers frekvens. Nu om dage er der mange alternative metoder til at lave og måle THz-stråling, men THz-teknologi baseret på forskellige varianter af fotokontakter er stadig den mest udbredte uden for universiteternes forskningslaboratorier.

Lange bølgelængder - og hvad så?

De lange bølgelængder, sammenlignet med synligt lys, giver både fordele og ulemper. Når bølgelængden er sammenlignelig med dimensionerne af de optiske komponenter, er man nødt til at tage højde for diffraktion. Diffraktion er en interferenseffekt, der gør, at strålingen ikke længere bare løber langs rette linjer, som man antager i den geometriske optik. Selv almindelige komponenter som spejle og linser er derfor "små nok" til at få strålingen til at "bøje om hjørner". Dette er blandt andet kendt fra diffraktionsmønsteret, der

THz-antenne baseret på en fotokontakt



Figurerne viser, hvordan en THz-antenne baseret på en såkaldt fotokontakt fungerer – set forfra (a) og fra siden (b). Fotokontakten består af et fladt stykke halvleder, typisk gallium arsenid, hvorpå der er lavet to metalliske antenneelektroder. Elektroderne forbindes til en spændingsforsyning, der kan påtrykke en spændingsforskel på omkring 5-40 Volt mellem elektroderne. Når en kort laserpuls fokuseres og sendes ind i gabet mellem de to elektroder, der udgør antennen, vil laserpulsens område inde i gabet lede i nogle få picosekunder. Derved vil der løbe en kortvarig strøm mellem elektroderne, som vil få antennen til at udsende en THz-puls. THz-pulsens vil også typisk vare nogle få picosekunder og indeholde frekvenser fra nogle få hundrede gigahertz op til nogle få terahertz.

For at få mest mulig THz-effekt koblet ud af antennen monteres der oftest en linse på bagsiden, hvor THz-strålingen kommer ud. Man kan også bruge en lignende antenne til at måle THz-stråling ved at måle strømmen mellem de to elektroder, når en indkommende THz-puls rammer antennen.

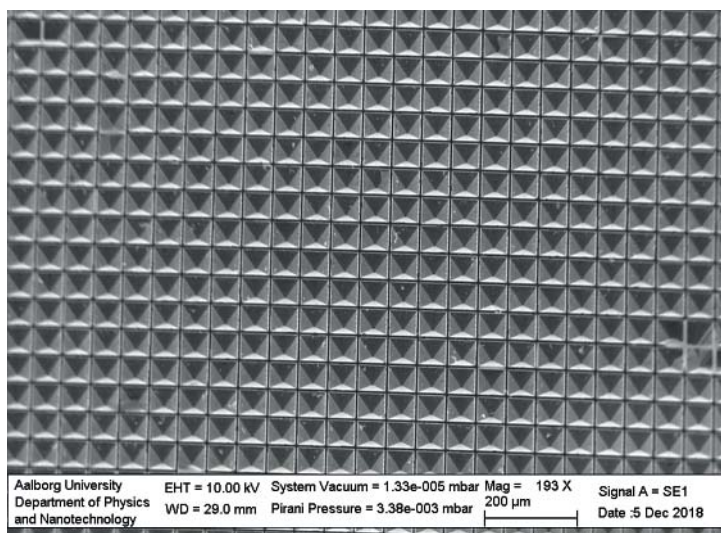
THz-forskning i Danmark

Forskning indenfor THz-optik og -spektroskopi kom til Danmark i 90'erne via en ung forsker, der på udenlandsophold i USA var blevet introduceret til emnet af en af THz-teknologiens pionerer, Professor Daniel Grischkowsky. Der blev etableret en forskningsgruppe på Kemisk Institut ved Aarhus Universitet kaldet Femtolab, som stadig eksisterer den dag i dag, og THz-forskning var en fast aktivitet i gruppen indtil omkring årtusindskiftet. Omkring samme tid startede en tidligere ph.d.-studerende fra Femtolab, Peter Uhd Jepsen, en ny THz-forskningsgruppe på DTU. Han er i dag leder af Danmarks største THz-forskningsgruppe, som nu er en del af DTU Fotonik.

I 2014 nåede THz-forskningen til Aalborg Universitet, da denne artikels forfatter, som er tidligere specialestuderende fra Femtolab i Aarhus, startede en række studentprojekter omkring THz-optik. Disse har efterfølgende udviklet sig til flere større forskningsprojekter. Sidste år blev en tidligere ph.d.-studerende fra THz-gruppen på DTU, Pernille Klarskov Pedersen, ansat til at starte en ny THz-gruppe på Aarhus Universitet, hvor det hele startede for cirka 30 år siden.

THz-aktiviteter på Aalborg Universitet:

THz-forskningsgruppen på Aalborg Universitet arbejder for tiden primært på to THz-relaterede forskningsprojekter: Det første (CITS) handler om at udvikle mere kompakte og effektive THz-kilder, som i fremtiden vil kunne monteres på droner eller i håndholdte apparater. Dette projekt er et samarbejde mellem Aalborg-, Aarhus- og Syddansk Universitet og er betalt af Det Frie Forskningsråd. Målet for det andet projekt (DETRIS) er, at udvikle udstyr til at opdage sprængstoffer på sikker afstand vha. THz-spektroskopi. Dette projekt er støttet af Innovationsfonden og er et samarbejde mellem Aalborg Universitet og firmaet MyDefence Communications, som fremstiller teknologi til at jamme droner og vejsidebomber.



Elektronmikroskopibillede af et eksempel på en THz-antireflekterende overflade fremstillet ved at ætse pyramideformede fordybninger ned i en siliciumoverflade. Hvis strukturerne er mindre end bølgelængden af den indkommende THz-stråling, vil de elektromagnetiske bølger "se" et brydningsindeks, som varierer gradvist fra cirka 1,0 i luft til 3,5 i silicium hen over en afstand, som er sammenlignelig med bølgelængden af strålingen. Derved reduceres refleksionstabene i forhold til, hvis man havde en brat overgang mellem de to materialer.

Strukturen på billedet er lavet i 2018 af en gruppe nanoteknologistuderende som en del af deres 5.-semesters projekt på bacheloruddannelsen i Nanoteknologi ved Aalborg Universitet.

dannes, når man sender synligt lys gennem en tynd spalte.

Når bølgelængden bliver stor, bliver det til gengæld nemmere at lave strukturer, som er mindre end bølgelængden. Når man gør det, kan strålingen ikke længere "føle" strukturerne, men vil i stedet se en slags effektivt materiale med nye egenskaber, hvilket kaldes metamaterialer. Det vil sige, at man ved at mikro-strukturere materialer kan give dem nye egenskaber.

Alsidede anvendelser

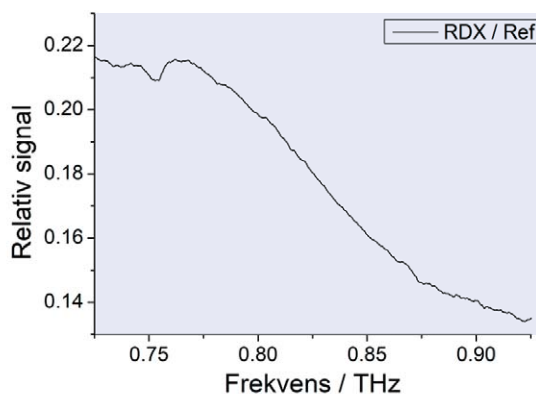
Mange ikke-elektrisk ledende materialer er gennemsigtige for THz-stråling. Blandt andet er plastik, tøj, papir, pap, træ og keramik helt- eller delvist gennemsigtigt i THz-området. Selvom indtrængningsdybden kan være begrænset, giver det mulighed for anvendelser, hvor man for eksempel kan kigge efter skjulte våben gennem tøj i sikkerhedskontrollen i en lufthavn eller kan kigge gennem indpakningen i forbindelse med kvalitetskontrol af fødevarer. Der er også eksempler på, at man med THz kan se svagheder i sprøjtestøbte plastikdele eller kan måle orienteringen af fibre i fiberforstærkede plastmaterialer.

Andre materialer opfører sig helt omvendt og absorberer kraftigt i THz-området, selvom de er gennemsigtige i det synlige område. Det gælder for eksempel vand og vanddamp i almindelig atmosfærisk luft. Det sidste er specielt en udfordring, når man arbejder med THz-teknologi under realistiske forhold, hvor luftfugtigheden ikke holdes kunstigt nede. På den anden side giver den kraftige absorption i vand mulighed for at måle ganske små variationer i vandkoncentration. Det kan for eksempel udnyttes til at måle vandindholdet i planter på en ikke-destruktiv måde. Forskere har også vist, at hudkræftceller har en lille forskel i vandkoncentration i forhold til raskt væv. THz-afbildninger af huden kan derfor bruges til at kortlægge udstrækning af hudkræft.

Udover vand har for eksempel sprængstoffer og narkotika også vist sig at have karakteristiske absorptionstoppe i THz-området. Det har selvfølgelig åbnet op for en række spændende anvendelser af THz-teknologi indenfor sikkerheds- og forsvarsindustrien.

Fremtidens 6G-netværk og THz-teknologi

På trods af alle de nyttige anvendelser nævnt ovenover, så ligger det største potentiale for THz-teknologi i fremtiden nok inden for trådløs kommunikation. I dag består vores trådløse mobilnetværk i Danmark af det såkaldte 4G-netværk. Næste generation af trådløs kommunikationsteknologi, 5G-netværket, er allerede på vej og fungerer ved frekvenser på helt op til 300 gigahertz (GHz), hvilket svarer til 0,3 THz. Det er derfor meget sandsynligt, at fremtidens kommunikationsnetværk (6G) vil komme til at operere i THz-området.



THz-spektrum målt i refleksion for RDX, som er det aktive stof i C4-sprængstof, målt i forhold til refleksionen fra et metalspejl (referencen). Fordi RDX har en absorptions-top omkring 0,80-0,85 THz, så varierer brydningsindekset omkring resonansen. Da den brøkdelen af strålingen, der reflekteres fra prøven, afhænger af brydningsindekset, vil det reflekterede signal også ændre sig på en karakteristisk måde i nærheden af resonansen. Det kan bruges til at identificere sprængstoffer som fx RDX.

Disse er blot nogle af de mange spændende og meget forskellige anvendelsesmuligheder af THz-teknologi, som forskerne har fundet indtil videre, og der skal nok komme flere til. Den nødvendige teknologi er netop ved at være

moden nok til at komme ud af forskningslaboratorierne på universiteterne og blive brugt til nytte for resten af vores moderne samfund. Det er en spændende tid, vi går i møde for både THz-forskning og -teknologi. ■

Tidevand fortæller om undergrunden

Når forskere ønsker at studere Jordens indre uden at skulle foretage dyre borer i undergrunden, udnytter de, at seismiske bølger kan bevæge sig gennem materialerne i undergrunden og give information om deres beskaffenhed. Seismiske bølger giver ikke kun information om strukturen af materialerne i undergrunden, men også om de kræfter, der virker på dem. Hvis der således sker deformationer i undergrunden, sådan som det sker i jordskælvszoner, kan dette ændre den hastighed, hvormed de seismiske bølger bevæger sig gennem jordlagene. Hvis man vil drage konklusioner om kræfterne i undergrunden ud fra hastigheden af de seismiske bølger kræver det imidlertid, at man har data, der viser, hvordan materialer reagerer på kræfterne under kendte forhold. Sådanne data har man hidtil kun haft fra eksperimenter i labora-



Forskeren Christoph Sens-Schönfelder i færd med at installere en midlertidig seismisk station i Atacama-ørkenen. Foto: C. Sens-Schönfelder, GFZ.

toriet, men nu er det for første gang lykkedes de to tyske forskere Christoph Sens-Schönfelder og Tom Eulenfeld at udnytte feltdata fra enkelt målestation, til at vise, hvor følsomt seismiske bølger reagerer på deformationer i de materialer, de udbreder sig i.

Konkret har forskerne målt den seismiske baggrundsstøj, der blandt andet opstår i undergrun-

den, når havets bølger brydes i brændingen. Og denne støj har de brugt til at observere den deformation, som forårsages af Månens tidevandseffekt på Jorden – et naturligt deformationseksperiment, der optræder med stor forudsigelighed. Målingerne blev foretaget på forskningsfaciliteten *Integrated Plate Boundary Observatory* i Atacama-ørkenen i det nordlige Chile.

Ved hjælp af opdateret software lykkedes det forskerne at registrere selv de mindste ændringer i de seismiske bølgers hastighed og kombinere disse ændringer med deformationen af undergrunden. Siden deformationen af jorden fra tidevandskræfterne kendes med stor præcision, er det nu muligt at karakterisere undergrunden endnu mere omfattende end tidligere.

CRK, Kilde: GFZ, Helmholtz Centre Potsdam