

DTU fotonik Et univers af lys



At udvælge REGRBBBBBBB farver - firebølgeblanding i optiske fibre

SØREN MICHAEL MØRK FRIIS, SIDSEL RÜBNER PETERSEN, LASSE MEJLING ANDERSEN, JESPER LÆGSGAARD OG KARSTEN ROTTWITT Fiberoptiske komponenter & ulineære effekter, DTU Fotonik.

Hvordan kan en farve blive til en anden? Og hvad har det med moderne spektroskopi og ubrydelig sikker kommunikation at gøre?

I vores forskningsgruppe undersøger vi, hvordan man kan blande lys på en særlig måde – kaldet firebølgeblanding (se fakta-boks om firebølgeblanding) – hvilket foregår i lysledere af glas, hvor fire lysfelter vekselvirker med hinanden og kan skabe nye farver. Effektiv firebølgeblanding forekommer, når lys fra en laser presses ned på et lille område, som det er tilfældet i en lysleder, der er lige så tynd som et hår, således at lysintensiteten bliver ekstrem høj. Via vekselvirkning med elektronerne i glasset gør firebølgeblanding det muligt at forstærke svage lyssignaler og generere laserlys i farver, som normalt er svært tilgængelige. Derved kan man skabe en hvilken som helst farve, altså udvælge en hvilken som helst bølgelængde, se figur 1.



Figur 1: Den synlige del af det elektromagnetiske spektrum er den del, som det menneskelige øje kan se; det ligger fra ca. 390 nm til 700 nm. Kortere bølgelængder ligger i det ultraviolette område og længere bølgelængder ligger i det infrarøde område.

Fakta-boks om firebølgeblanding

Ikke-lineære vekselvirkninger mellem lys og materialer kan opnås, når lysintensiteten bliver ekstrem høj, og de er karakteriseret ved at mere end to fotoner indgår i den samme proces. En type ikke-lineær proces, hvori fire fotoner vekselvirker med bundne elektroner i materialet, kaldes firebølgeblanding. Firebølgeblanding observeres f.eks. ved at to fotoner med hver sin energi (bølgelængde) destrueres og skaber to nye fotoner med andre energier. Energierne af de nye fotoner er bestemt af processens energibevarelse,

$$\frac{hc}{\lambda_1} + \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_3} + \frac{hc}{\lambda_4}$$

hvor h er Plancks konstant, c er lysets hastighed, og λ_{1-4} er bølgelængderne af fotonerne. Firebølgeblanding kan også være en foton, der bliver til tre, eller omvendt.

Firebølgeblanding til fluorescens mikroskopi

To spørgsmål, som har pirret forskeres nysgerrighed gennem mange år er, hvad celler består af, og hvilke kemiske processer som finder sted i levende biologisk materiale. Med en rivende teknologisk udvikling, for eksempel inden for firebølgeblanding, er vi tættere på svaret end nogensinde. Når molekyler i en biologisk prøve udsættes for lys, kan de blive exciteret til et højere energiniveau og efterfølgende udsende lys, som kan detekteres - såkaldt fluorescens spektroskopi. Bølgelængden af det udsendte lys er karakteristisk for hvert enkelt molekyle, og røber derfor hvilke molekyler, der er til stede i prøven. Da der kræves den helt rigtige bølgelængde for at excitere molekylerne, er lyskilden en essentiel del af fluorescens spektroskopi. Derudover kræver nogle afbildnings metoder to synkroniserede lyspulser, som netop kan leveres i en firebølgeblandingsproces. I samarbejde med den danske virksomhed NKT Photonics



Figur 2: Illustrationer af tværsnit af forskellige optiske fibre af glas. De små hvide cirkler er lufthuller, og de større mørkeblå cirkler er områder med højere brydningsindeks end glas. I fiberen til venstre ledes lyset i kernen med det svagt højere brydningsindeks, mens lyset i de to andre fibre ledes i området uden huller i midten af fibrene.

A/S undersøger vi skabelsen af nye farver via firebølgeblanding i en bestemt type lysleder, den optiske fiber (se faktaboks om lysledere). I figur 2 til venstre ses et tværsnit af den mest almindelige optiske fiber, som bruges til at sende lys over store afstande. I midten ses et eksempel på en såkaldt fotonisk krystalfiber, som har specielle egenskaber, der kan styres meget præcist ved hjælp af designet af hulstrukturen. Fiberen til højre er en speciel fotonisk krystalfiber, som er designet til at opfylde det særlige krav om optisk fasetilpasning i den ønskede firebølgeblandingsproces (se faktaboks om fasetilpasning).

En fotonisk krystalfiber som den til højre i figur 2 består af glas og leder lys primært i kernen, som sidder i centrum af fiberen. Området uden om kernen kaldes kappen og består af lufthuller (hvide cirkler) og af nogle Germanium-doterede områder, som giver anledning til et højere brydningsindeks end glas i disse områder (mørkeblå cirkler). Kombinationen af luft og Germanium i lyslederens kappe kan udnyttes til at styre firebølgeblandingsprocessen i fiberen. Derved kan de genererede bølgelængder styres med høj præcision.

I figur 3 ses en skematisk illustration af firebølgeblandingsprocessen i den specielle fotoniske krystalfiber. En kraftig laser puls med en bølgelængde på 1064 nanometer bliver sendt ind i lyslederen. Langs lyslederen vekselvirker



Figur 3: Skematisk illustration af forsøgsopstillingen til firebølgeblanding i den fotoniske krystal fiber. Laserpulser med bølgelængde 1064 nm er input i fiberen. På udput siden ses 1064 nm der ikke er omdannet via firebølgeblanding, samt nye optiske komponenter ved 848 nm, 995 nm, 1145 nm og 1425 nm.



Fiber længde

Figur 4: Illustration af firebølgeblandingsprocessen i en optisk fiber. Energien fra fotonen ved 1064 nm bliver konverteret til lyskvanter af andre bølgelængder. 848 nm og 1425 nm vil først dannes i fiberen, derefter vil 995 nm og 1145 nm dannes.

denne puls med glasset og nye bølgelængder bliver skabt; i de farvede rammer i figur 3 ses billeder af lyset ved udgangen af fiberen ved nye bølgelængder. I denne lysleder dannes der i alt fire nye bølgelængder svarende til to forskellige firebølgeblandingsprocesser: To fotoner ved 1064 nanometer er destrueret ved at skabe en foton ved 995 nanometer og 1145 nanometer, og to fotoner ved 1064 nanometer er destrueret ved at skabe en foton ved 848 og 1425 nanometer. Processen er illustreret i figur 4.

Fakta-boks om fasetilpasning

Fasetilpasning er et krav for at opnå effektiv firebølgeblanding og kan forstås sådan, at hastighederne hvormed lyset udbreder sig i materialet under firebølgeblandingen, skal være bevaret. Fasetilpasning for lys kan altså forstås på samme måde som impulsbevarelse fra klassisk mekanik. Lysets udbredelseshastighed afhænger af materialets brydningsindeks, og brydningsindekset afhænger af lysets bølgelængde og dette forskelligt i forskellige typer lysledere. Da der altid indgår mindst tre forskellige bølgelængder i firebølgeblanding, er det som regel meget kompliceret at designe en lysleder, sådan at fasetilpasning opnås ved de ønskede bølgelængder. I modsætning til energibevarelse, som er et definitivt krav, er fasetilpasning en mere løs forudsætning, der kan formuleres som

$$\frac{2\pi n_3}{\lambda_3} + \frac{2\pi n_4}{\lambda_4} - \frac{2\pi n_1}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_2}{\lambda_2} \approx 0$$

Hvor n_{1-4} er brydningsindekserne ved bølgelængderne λ_{1-4} . Cirka-lig-med-tegnet betyder at firebølgeblandingen godt kan forløbe selvom resultatet ikke er et eksakt nul, men den er i så fald mindre effektiv. Fotonerne med bølgelængderne 848 og 1425 nanometer dannes først i fiberen. Efter et længere stykke fiber dannes også lys ved 995 og 1145 nanometer. Som set i figur 3, vil 995 og 1145 nanometer dannes med samme lysfordeling i kernen som 1064 nanometer laserpulsen, 848 og 1425 nanometer dannes med en anderledes lysfordeling (den samme som illustreret på figur 7(b)). Dette skyldes fasetilpasningen er opfyldt for netop disse lysfordelinger. Denne proces kan bruges til at skabe nye bølgelængder, der kan anvendes i fluorescens spektroskopi.

Firebølgeblanding til ubrydelig sikker kommunikation

En helt anden anvendelse af ulineær fiberoptik er informationsudveksling. Verdens behov for hurtig kommunikation vokser med stor hastighed og herunder også nødvendigheden af at kunne sikre sine data imod at blive opsnappet af fremmede, der lytter med på linjen. I dag gøres dette ved at kryptere sine data, sådan at der skal bruges en nøgle til at læse dem, men denne nøgle kan stjæles, og derfor er det muligt for fremmede at bryde ind i privat information, uden at ejeren har kendskab til det. En potentiel løsning på dette problem er at sende information mellem to personer ved at distribuere den hemmelige nøgle i en såkaldt kvantetilstand. Denne metode benytter kvantemekanik til at sikre, at kommunikationen af nøglen er 100 procent ubrydelig, og at ejeren tilmed vil vide besked, hvis nogen forsøger at tilgå nøglen: fuldstændig sikker kommunikation kan altså blive en realitet i fremtiden.

For at kunne benytte kvantetilstande af lys i optisk kommunikation kræves det, at man er i stand til at detektere lyset effektivt, og at man kan konvertere det til andre ønskede bølgelængdekanaler, som anvendes ved langdistancetransmission. Et problem er dog, at information skal transmitteres ved infrarøde bølgelængder, hvor optiske transmissionsfibre (figur 2 til venstre) har det laveste tab af lysintensitet, mens nutidens detektorer til at måle lys er mest effektive ved synlige bølgelængder.



Figur 5: Principskitse over transmission af en krypteringsnøgle i en kvantetilstand. Nøglen genereres ved at kvante-forbundne fotoner udsendes fra en gruppe af atomer ved fx 400 – 700 nm, hvorefter de konverteres til 1550 nm, og efter transmission konverteres de tilbage til ca 600 nm, hvor de kan detekteres effektivt.



Figur 6: Eksempler på konfigurationer af firebølgeblanding. Diagrammerne (a) og (b), som er degenererede, fordi den midterste bølge bidrager med to fotoner, giver optisk forstærkning af de små signaler. Diagrammerne (c) og (d) giver frekvenskonvertering. De grå pile angiver hvilken vej fotoner går under firebølgeblandingsprocessen.

Det vil sige, at lyssignalet, som krypteringsnøglen sendes i, skal sendes ved infrarøde bølgelængder, men når det skal detekteres, skal det være i det synlige område, se figur 5. Firebølgeblanding giver mulighed for at ændre lysets bølgelængde, såfremt man kan få fasetilpasningen til at stemme. Men jo større bølgelængdeområde, man ønsker at konvertere signaler over, desto mere kompliceret er fasetilpasningen, og sammenlignet med skift imellem bølgelængdekanaler i transmissionsvinduet ved ca. 1450 - 1600 nanometer (se figur 1) er skiftet fra disse bølgelængder til synligt lys et stort spring. Et andet problem er, at små bølgelængdeskift i transmissionsvinduet, hvori fasetilpasning ikke er noget problem, bliver forstyrret af andre ulineære effekter, for eksempel Raman spredning, som er vekselvirkning mellem lys og molekylesvingninger i fibermaterialet. Raman spredning kan bruges til at designe optiske forstærkere (og til spektroskopi), men i relation til firebølgeblanding bidrager effekten med en betydelig mængde støj.

For at overkomme disse udfordringer og muliggøre sikker kommunikation i fremtiden arbejder vi i vores forskningsgruppe dels på at analysere avancerede egenskaber ved firebølgeblanding og dels på at finde måder hvorpå fasetilpasning kan opnås over store bølgelængdeskift. Der findes forskellige konfigurationer af firebølgeblanding, som vist på figur 6; én særlig egenskab ved firebølgeblanding er, at den i konfigurationerne (c) og (d) er kvantetilstandsbevarende. Dette er yderst vigtigt for distribution af kvantenøgler, da nøglen således er bevaret

Fakta-boks om lysledere

En lysleder er en optisk komponent, som består af mindst to materialer med forskelligt brydningsindeks, hvis formål det er at begrænse lysets udbredelse rumligt. Den mest udbredte lysleder i verden er den optiske fiber, som er lavet af glas og bruges til at sende lyssignaler over små og store afstande. På figuren ses tværsnittet af en optisk fiber, hvor det mørkere blå område markerer et lidt højere brydningsindeks end i det lysere blå område. Det viser sig, at lyset begrænses til at udbrede sig i området med størst brydningsindeks, som ses på figuren til højre. Man kan forhøje brydningsindekset af glas svagt ved at dotere med Germanium.



Internettet, som vi kender det i dag, er baseret på at sende information igennem optiske fibre. Siden 1980'erne har det været muligt at sende lyspulser over flere hundrede kilometer fiber på grund af det ekstremt lave tab i glas ved bølgelængder omkring 1550 nanometer. Figur 7: (a)-(d) viser forskellige rum-

lige fordelinger af lyset i en fiber. (a)

kaldes den fundamentale tilstand,

tilstande. Den sorte ring markerer fiberens kerne. Med et mikroskop

kan man se disse tilstande (eller

kombinationer af dem) i enden af en fiber, som der sendes lys igennem.

og (b)-(d) kaldes højere ordens





Høj – Intensitet – Lav



Høj – Intensitet – Lav



Høj – Intensitet – Lav



under bølgelængdeskift. Denne egenskab betyder også at processen er fuldstændig støjfri, hvilket er noget særligt, fordi optiske processer normalt lider af tilføjelse af pumpestøj på grund af spontan emission.

Som beskrevet foroven kan man bruge et specielt fiberdesign til at påvirke fasetilpasningen i fiberen, men de fotoniske krystalfibres komplicerede struktur gør dem sværere at fremstille så fejlfri som konventionelle cirkulært symmetriske fibre. Da fejlraten i signalbehandlingen af optiske signaler er en yderst vigtig parameter i optisk kommunikation, er de fotoniske krystalfibre derfor mindre egnede. Alternativt kan man benytte at lys har forskellige tilladte rumlige tilstan de i lysledere, som det kan propagere fremad i. Dette kan forstås sådan, at lyset i en cirkulært symmetrisk fiber som udgangspunkt er stærkest i midten af kernen og faldende med stigende radius, som i figur 7 (a), men at også andre rumlige fordelinger af lyset kan forekomme. I flere forskellige forskningsprojekter, hvor vi arbejder sammen men bl.a. NKT Photonics A/S og OFS Fitel Denmark Aps., undersøger vi excitation og anvendelse af lys med forskellige rumlige fordelinger. I relation til firebølgeblanding er det specielt udbredelseshastigheden af individuelle tilstande, der er interessant. Når lyset propagerer i en af disse alternative tilstande ændres fasetilpasningen således, at selv bølgelængder, som ligger langt fra pumpen, kan indgå i firebølgeblandingen, og det er dermed i princippet muligt at konvertere kvantetilstande fra det synlige spektrum til transmissionsvinduet. Eksempler på alternative rumlige fordelinger af lys i en fiber ses i figur 7 (b)-(d).

а

b

С

d



Figur 8: Diagram over effekten af Raman spredning fra pumperne på firebølgebladning. De fuldt optrukne linjer repræsenterer stimuleret Raman spredning, som giver optisk forstærkning eller dæmpning. De stiplede linjer repræsenterer støj, som ødelægger optiske signaler. Kurverne over bøgelængdeaksen indikerer, at pumperne giver fotoner, mens kurverne under aksen indikerer, at pumperne får fotoner af signalerne.

Men selvom fasetilpasningen er helt perfekt, kan Raman spredning være et problem: i et bølgelængdeområde på ca. 130 nanometer på hver side af hver pumpe påvirker Raman spredning det optiske signal ved enten at tage eller give uønskede fotoner. Nogle af disse fotoner (de stimulerede) forstærker eller dæmper blot signalet, hvilket i nogle situationer ikke skader ret meget, mens andre fotoner (de spontane) er støj, som ultimativt ødelægger signalet. Et eksempel på Raman spredningens effekt på firebølgeblandingsprocessen ses på figur 8, hvor spektrene for både stimuleret (fuldt optrukne linjer) og spontan (stiplede linjer) Raman spredning er vist for begge pumper (blå og rød). Pumperne dæmper signalerne til venstre for dem via stimuleret Raman spredning og giver støjfotoner via spontan Raman spredning. Vi har i vores forskning bland andet vist, at det er muligt at undgå spontane fotoner ved at give pumperne en bestemt forskel i styrke og samtidig køle fiberen til 77 K med flydende nitrogen.



GRZJN TV-skærmteknologi giver god sort

SØREN FORCHHAMMER, professor MSO, Kodning og visuel kommunikation, DTU Fotonik, BEN VERBRAAK, Senior Manager, Bang & Olufsen, JESPER MELDGAARD PEDERSEN, teknologispecialist, Bang & Olufsen, SØREN BECH, Forskningschef, Bang & Olufsen

DTU Fotonik og Bang & Olufsen har skabt en optimal algoritme, så man får en god gengivelse af sorte og mørke områder i LCD-TV-skærme med LED-bagbelysning. Det giver bedre kontrast og mindre energiforbrug.



Figur 1: Udfra billededata beregnes LED værdierne for bagbelysningen og derefter indstilles LC pixel værdierne

Fladskærms-TV har I løbet af få år overtaget TV-markedet. I dag dominerer LCD (Liquid Crystal Display) skærme markedet, ofte under betegnelsen LED (Light Emitting Diode) skærme på grund af brugen af LED lyskilder i skærmens bagbelysning.

Billedpunkterne i TV billedet dannes ved at LC (Liquid Crystal) elementerne styrer den lysmængde fra LED bagbelysningen der transmitteres. Dette gøres ved brug af farvefiltre i hvert billedpunkt for farverne rød, grøn og blå, således at det resulterende udsendte lys afstemmes i forhold til det billede, der skal vises.

I de mere avancerede LED skærme opereres med et antal LED segmenter som for hvert billede kan reguleres individuelt (På engelsk kaldes teknikken 'local backlight dimming').

I to samarbejdsprojekter mellem Bang & Olufsen og DTU Fotonik er der forsket i at kontrollere og udnytte denne teknik bedst muligt til at forbedre billedkvaliteten, specielt kontrasten i billedet, og samtidig reducere energiforbruget.

Et videosignal er en sekvens af billeder

'Local backlight dimming' giver en ny repræsentation af billedsignalet bestående af to synkroniserede signaler: Et signal til styring af LC elementerne for hvert billedpunkt og et til lokal styring af LED backlight segmenterne, se figur 1. Et videosignal består af en sekvens af billeder. Ved TV broadcast med en billedrate på 25 Hz, sendes der 50 enkeltstående halvbilleder per sekund (interlacing). Disse halvbilleder bliver konverteret til 50 fulde billeder per sekund i TV'ets de-interlacer. Kilder som set-top bokse afleverer som regel 50 billeder per sekund via TV'ets HDMI snitflade.

For at opnå de bedste resultater analyseres hvert billede i videostrømmen og ud fra analysen bestemmes de to signaler. For et fuldt HD signal er der 1920x1080 billedelementer (pixels), hver bestående af en rød, grøn og blå sub-pixel, altså i alt over 300 million billedværdier per sekund.

En udfordring i forskningsprojektet har været at processere alle billedelementer kosteffektivt samtidig med, at der opnås de potentielle fordele i form af høj billedkvalitet og lavt energiforbrug. Teknikken kan også anvendes til gengivelse af HDR (High Dynamic Range) billeder med større effektiv kontrast og lysstyrke end almindelige skærme i dag kan gengive.

Dette kan være interessant i en række professionelle anvendelser. HDR teknologien vil sandsynligvis også blive introduceret i konsumentprodukter inden for de kommende år.

Billeddannelse på BeoVision Avant.

- (a) 85", 2D dimming, direkte LED belysning.Struktur: 20x12 LED segmenter.
- (b) 55", 1.5D dimming, kant LED belysning.Struktur: 8x2 segmenter.

(c) og (d):

Det resulterende lys fra LED belysningen efter optisk filtrering gennem en light guide samt flere optiske folier.

(e) og (f):

Det endelige TV billede, som er dannet ud fra den aktuelle bagbelysning samt tilhørende LC kompensering.

Figur 2: Billeddannelse på BeoVision Avant.

Styring af LED lokal bagbelysning

Den nyudviklede metode til billedafhængig styring af bagbelysningen, baseres på en matematisk model af de gengivne billeder på TV skærmen, kombineret med en beskrivelse af, hvordan det menneskelige syn opfatter billederne. Metoden kan anvendes på forskellige arkitekturer af bagbelysning, se figur 2.

De tynde LED skærme, der dominerer markedet i dag, er konstrueret med LED lyskilder på kanten af skærmen, hvis lys spredes i en 'Light Guide Plate (LGP)' kombineret med flere 'diffuser' lag bag skærmen.

I projekterne har vi arbejdet intenst med et TV med i alt 16 regulerbare LED segmenter, der danner bagbelysningen, otte i hver side af skærmen. Den type skærm betegnes som en edge-lit skærm og ved brug af lokal dæmpning betegnes denne for '1.5D dimming'.



Figur 3: Et ud af 16 LED segmenter er tændt. Billedet viser punktspredningsfunktionen for LED segmentet.



Vi har også arbejdet med en egentlig to-dimensionel struktur i LED bagbelysningen hvor LED-erne er placeret bag ved skærmen (direct-lit) og her er der tale om '2D dimming'. Den initiale matematiske model kan beskrive begge TV modeller, dvs. både 1.5D og 2D dimming. For simpelheds skyld vil vi nu beskrive 1.5D dimming med 2 x 8 LED segmenter nærmere.

LC elementer indstilles så det ønskede lysudbytte opnås Grundlaget i den fysiske model for skærmen er en punktspredningsfunktion for hvert af de otte segmenter i hver side, dvs. hvor meget lys bidrager hvert segment med i hvert billedpunkt ved en given udstyring, se figur 3.

Ved superposition af disse værdier bestemmes det samlede baggrunds lys pr. billedelement. Herefter indstilles LC elementerne i alle billedpunkterne (3 x 1920 x 1080), således at det ønskede lysudbytte opnås.

Ved at beregne det resulterende lys i hvert billedpunkt (3 x 1920 x 1080) på skærmen for hvert billede kan den bedste lysstyrke for hvert LED segment beregnes.

Gengivelse af sort er en udfordring med LCD

Billeder med høj kontrast er specielt udfordrende i denne forbindelse, hvor udfordringen er at få den bedste balance mellem en god sort i de mørke områder og tilstrækkelig lys i de lyse områder.

Grunden til at gengivelse af sort eller mørke områder er en udfordring i LCD skyldes at LC elementerne ikke lukkes helt. Dette ses fx ved at betragte en slukket skærm i sammenligning med en med mørke områder. Effekten



Figur 4: Billede med dimming. Til højre anvendes 2D lokal dimming til venstre kun global dimming. Bemærk lækage i det sorte til venstre.

betegnes lækage (leakage) og den er specielt udtalt når skærmen ikke betragtes lige forfra, men ved en vinkel.

Figur 4 illustrerer forskellen i lækage i sorte billedpartier mellem anvendelse af global dimming, hvor alle LED-erne udstyres til samme værdi, og 2D lokal dimming.

Billedet er sammensat således at venstre side af billedet viser lys-lækage på en skærm med global dimming og højre side af billedet viser lys lækagen på en skærm med 2D lokal dimming. Lækagen er størst til venstre i billedet. Det kan bemærkes at den øges mod kanten grundet en øget synsvinkel i forhold til kameraet, der er centreret i forhold til skærmen.

Lækage kan forbedres ved at reducere bagbelysningen

Lysstyrken på grund af lækage i de mørke områder kan udtrykkes ved den brøkdel af lys, **e**, der slipper igennem et lukket LC element. Ved en given bagbelysning **b** bliver det resulterende lys **be**. Selv om lækagen, **e**, er meget lille er det væsentligt at tage højde for at følsomheden af vores syn er stærkt ulineært og meget højere i mørke end i lyse områder og omgivelser.

Den resulterende lækage kan forbedres ved at reducere bagbelysningen, b, men det kan betyde, at der så er for lidt lys til de lyse områder i billedet, hvilket betegnes klipning (clipping).



Figur 5: Der skal opnås den optimale balance mellem klipning (clipping) og lækage (leakage) udfra middelkvadratfejlen (MSE – Mean Square Error).

Den bedste løsning på balancen er løst matematisk (se figur 5) samtidig med at der opnås en effektiv reduktion af energiforbruget i bagbelysningen.

Beregning af den matematisk optimale løsning med præcis beregning af bagbelysning og tilhørende LC værdier i 6 millioner farve pixels 50 gange i sekundet er meget beregningskrævende. Derfor er der udviklet hurtige løsninger, der tilnærmer sig det matematisk optimale og i praksis leverer en optimal løsning.

Lysmålingerne muliggøres med sensorer i TV'et

TV betragtes almindeligvis i rum med en belysning, der bl.a. varierer med tidspunktet på dagen. B&O har i mange år målt på det omgivende lys og været pioner inden for området med at regulere diverse billedbehandlings algoritmer som funktion af det omgivende lys, både dets intensitet og dets farve.

Lysmålingerne muliggøres ved at indbygge en eller flere lysfølsomme sensorer i TV'et.

I et EUDP projektsamarbejde blev effekten af den omgivende belysning inddraget mhp. at udbygge kontrol af LED bagbelysningen og få en bedre forståelse af samspil mellem omgivende lys og TV ved almindeligt brug. Til dette formål er modellen udvidet til at omfatte den givne kigge situation, og styringen af bagbelysningen kan inddrage dette.

Udvalgte algoritmer til kontrol af bagbelysning blev simuleret ved DTU Fotonik og testet hos B&O både ved test med ensartet omgivende belysning og test med forskellig lysstyrke i den omgivende belysning. Det blev demonstreret og analyseret, hvordan det omgivende lys påvirker opfattelsen af de mørke områder. Testene er blevet udført som subjektive præference forsøg med et stort antal testpersoner.

Resultatet af projektsamarbejdet og teknikkerne lokal dimming og brug af ambient light er en samtidig reduktion af energiforbrug og en signifikant forbedring af den oplevede billedkvalitet ved typisk TV kigning fx i en dagligstue.

BeoVision Avants algoritme er koblet sammen med lysmålere

I hvert TV fra Bang & Olufsen er billedkvalitet og energiforbrug vigtige elementer for kundens samlede oplevelse. Derfor er der i den seneste Ultra HD (UHD) TV familie fra Bang & Olufsen, BeoVision Avant, anvendt to forskellige backlight dimming teknologier (se figur 2).

For de store 85 og 75 tommer skærme er der anvendt 2D dimming teknologi. Disse direct-lit skærme har henholdsvis 960 og 720 LED-er fordelt over 20x12 og 18x10 segmenter med hver 4 LED-er. I BeoVision Avant 55 tommers edge-lit skærm er der tale om 160 LED-er fordelt over venstre og højre kant af skærmen, 2 x 8 segmenter med hver 10 LED-er.

Med en UHD skærmopløsning på 3840 x 2160 pixels, 4 gange flere pixels end i et Full HD TV, har det været en udfordring at implementere de avancerede dimming algoritmer.

Bang & Olufsens dimming algoritme er implementeret i en Xilinx xc7a200t Field Programmable Gate Array (FPGA), som også rummer diverse andre Bang & Olufsen billedforbedringsalgoritmer såsom digital støjreduktion, skarphedsforbedring og diverse realtids billedanalyse målere til adaptive billedbehandling.

FPGA-en består af to SW kerner, hvoraf den ene kerne er dedikeret til dimming algoritmen, samt et stort logik areal til matematiske beregninger som er konfigureret ved hjælp af VHDL programmering.

BeoVision Avants backlight dimming algoritme er koblet sammen med TV'ets to lysmålere for at sikre optimal adaptivitet i forhold til omgivelseslyset.

Energimærkning og -forbrug

Det årlige energiforbrug af TV apparater i EU blev estimeret til 60 TWh (200 PJ) i 2007. Med en stigning i årlig salg af TV fra 35 mill. stk i 2006 til 61 mill. stk. i 2011 i EU og en generel forøgelse af skærmstørrelsen er energibesparelse i TV et vigtigt område.

LED bagbelyste LCD TV er den dominerende teknologi på markedet og bagbelysningen står for det meste af energiforbruget. Derfor har energieffektive løsninger til kontrol af LED bagbelysning et stort potentiale for energibesparelse verden over.

De senere år er der både lovgivet om energiforbrug i TV apparater og indført energimærkning, som det kendes fra køleskabe. Kravene bliver skærpet med jævne mellemrum, i takt med at teknologierne skrider frem.

Den udviklede kontrol af bagbelysningen inkluderer en omkostningsfunktion på energiforbruget, således at der kan foretages en vægtning af energiforbrug og billedkvalitet på en måde, så der for et givent energiforbrug fås den bedste billedkvalitet.

Der er en fin sammenhæng mellem energiforbrug og at den bedste detalje gengivelse opnås ved lavt omgivende lys, som det også kendes fra biografen. Ved et lavt omgivende lys kan skærmens lystyrke med fordel reduceres, således at der spares energi både i stuebelysningen og TV'et.

OLED skærme vil eliminere bagbelysningen helt

Dimming teknologien har været meget interessant at arbejde med, idet det ved anvendelse af samme teknologi har været muligt både at øge billedkvaliteten og forbedre energiforbruget på samme tid.

Andre skærmteknologier som OLED og Quantum Dot står på spring. Ægte OLED skærme vil eliminere bagbelysningen helt med potentielt et meget lavere energiforbrug fordi kun de aktive pixels skal lyse op.

101010 01010

0101010101010101010

Quantum Dot derimod kan gøre LED bagbelysningen i LCD skærme mere effektiv, på grund af en mere energieffektiv konvertering til rødt og grønt lys af det blå lys LED-erne i bagbelysningen genererer.

I alle tilfælde er effektiv kontrol og nøjagtig karakterisering nødvendige for at opnå høj kvalitet. Dette muliggøres ved nye TV formater som fx UHD når det udvides med et større farverum (høj farve gamut), som blandt andet bedre kan gengive mættede farver.

En anden interessant applikation af LED bagbelysning er HDR (High Dynamic Range) billeder og video, hvor lysstyrken og kontrasten øges væsentligt.

0101010101010101010101010101010

13

0101010101010101010101010101

Sådan giver man plastic farve uden pigment

■ JEPPE SANDVIK CLAUSEN, ph.d, udviklingsingeniør, Foss, EMIL HØJLUND-NIELSEN, ph.d studerende, DTU Nanotech, ANDERS KRISTENSEN, professor, DTU Nanotech, N. ASGER MORTENSEN, professor, Strukturerede elektromagnetiske materialer, DTU Fotonik.

Forestil dig blå vandflasker, der farves uden kemiske farvestoffer og genbruges direkte som grønne flasker til sodavand. Kan man lave youghurtbægre, hvor intet af indholdet bliver siddende tilbage i emballagen eller computerskærme, der ikke reflekterer lyset?

Dette er blot nogle af de mange industrielle fordele, som udbredelsen af nanoteknologi kan åbne op for. Inspirationen til en sådan funktionalisering kan findes i naturen, hvor eksempelvis vanddråber afvises af lotusblomstens blade på grund af en særlig overfladestruktur eller hos visse sommerfuglearter, hvor farverige vingedekorationer ikke skyldes farvepigment, men vingernes overfladestrukturer.

Eksempelvis opnår flere af medlemmerne i familien af morpho-sommerfugle deres klare blå farve som følge af en kompliceret 3D-nanostruktur i vingerne (se figur 1). Inspireret af disse naturlige strukturelle farver har DTU de senere år forsket intensivt i mulighederne for at benytte lignende principper til farvning af masseproducerede plastikprodukter. Dette er foregået i projekterne NanoPlast og Plast4Future. De optiske nanostrukturer kan farve plastikken, gøre den anti-reflektiv, skabe changerende farver, glimmereffekter eller lignende. Alt sammen baseret på struktur, i stedet for kemi.

Lys er bølger af elektromagnetisk stråling

For at kunne skabe farvet plastik uden brug af pigment må man først spørge, hvad der egentlig gør et objekt farvet? I fysisk forstand er det lyset, der forlader objektet, der efterlader os med et farveindtryk.

Figur 1: Morpho didius får den blå farve som følge af de komplicerede nanostrukturer i vingerne. Strukturerne fører til interferensfænomener der gør at blåt lys reflekteres kraftigt. Fra Kinoshita et al. 'Physics of structural colors', Rep. Prog. Phys. 71, 1 (2008).

Lys er bølger af elektromagnetisk stråling og det er lysets bølgelængde som, i samspil med øjets følsomhed og hjernens fortolkning, afgør hvilken farve vi ser. For eksempel opfattes lys med en bølgelængde omkring 450 nm som blåt af mennesker. Generelt kan vi se bølgelængder mellem 380 nm og 750 nm, og hvidt lys består af en ligelig fordeling af disse bølgelængder. Hvilket lys, der forlader objektet afhænger dels af hvilket lys der skinner ind på objektet og dels af objektets refleksionsegenskaber. Atomer og molekyler har den egenskab, at de kan optage og udsende lys ved bestemte bølgelængder. Derfor vil et objekt i udgangspunktet absorbere en mængde lys ved bestemte bølgelængder, mens lyset ved de resterende bølgelængder reflekteres og bestemmer objektets farve.

Strukturer skal være mindre

Når lyset interagerer med objekter, der er meget større end bølgelængden, har bølgeegenskaberne ingen eller meget lidt indflydelse på vores oplevelse af objektet.







Figur 3: Forskellige farver fremkommer som følge af lysets interaktion med nanostrukturer i forskellige størrelse. Søjlernes diameter varieres fra ca. 40 til 150 nm langs den lange akse mens strukturens periode varieres fra 160 til 240 nm langs den korte akse. De enkelte felter på denne demonstrator har en sidelængde på 0.8 mm.

Det gælder for eksempel lys, der passerer gennem et vindue eller reflekteres fra overfladen af et spejl. Men hvis overfladen på spejlet består af strukturer på samme længdeskala som bølgelængden, begynder bølgenaturen at dominere og lyset vil interagere med strukturerne. Uden at gå nærmere i detaljer, betyder det i praksis at strukturerne skal være mindre end 10 µm for at være interessante til changerende farver og under 500 nm for at kunne bruges til mere vinkelrobuste farveeffekter.

Forholdet mellem bølgelængde og afstand afgør reflektionen

Morpho-sommerfuglens vinger består af en horisontal lagstruktur, hvor lagtykkelsen typisk er nogle få hundrede nanometer. En sådan struktur giver anledning til bølgefænomenet konstruktiv interferens, hvor bølgerne med den optimale bølgelængde intensitet forstærkes i retning væk fra overfladen. Det er forholdet mellem lysets bølgelængde og afstanden mellem lagene, der afgør hvilke bølgelængder, der reflekteres kraftigt, og hvilke der ikke gør.

Disse principper for farveskabelse står i kontrast til den traditionelle måde at farve produkter på. De mange klare farver vi i dag ser i forskellige plastikprodukter, for eksempel i legetøj, fremkommer som følge af indfarvning af plastikken eller ved hjælp af overfladedekorationer med maling. Ved indfarvning af plastikken blandes den rene gennemsigtige plastik med et kemisk farvestof, der gør, at plastikdelen får den ønskede farve. Farven rød, blå eller noget helt tredje afhænger af det farvestof der blandes i. Derudover bruges overfladedekorationer, for eksempel til firmalogoer. Dekorationer males eller printes på overfladen med andre farvestoffer efter at plastikken er blevet formet.

Farvestofferne er kemisk bundet til plastikken

Disse mange forskellige farvestoffer i det færdige produkt gør det svært at genbruge plastik. Farvestofferne er kemisk bundet i plastikken og det er derfor ikke muligt at blande gammel indfarvet plastik for at lave en ny plastikdel med en ny farve, hvilket i praksis betyder, at plastikken må mekanisk farvesortereres før den kan genanvendes.

Derudover fremstilles råmaterialet som et biprodukt ved destillering af råolie på olieraffinaderierne og produktionen af ny ren plastik er derfor afhængig af en vedvarende olieproduktion. Der er således gode argumenter for at undersøge alternativer til den traditionelle fremstillingsmetode for plastikprodukter.

Råmaterialet kan genbruges flere gange

I den kontekst fremstår strukturel farvning af plastik som et attraktivt alternativ, da funktionaliteten er baseret på mikro- og nano-strukturer i overfladen. Man kan forestille sig et stykke rent plastik, for eksempel en vandflaske, som fremstår blå på grund af en struktur i overfladen ligesom morpho-sommerfuglene. Når det samme stykke plastik omsmeltes, kan der defineres en ny struktur i overfladen, som gør, at den nye flaske fremstår grøn. Råmaterialet kan således genbruges igen og igen, og få ændret egenskaber undervejs. Dette lyder meget tiltalende i forhold til genanvendelse, men der er stadig store teknologiske udfordringer i forhold til at nå frem til det beskrevne scenarie.

Dels skal man identificere de strukturer, der giver den ønskede funktionalitet, dels skal man finde en måde at fremstille disse strukturer i plastikken – og til sidst skal man finde en måde at beskytte strukturerne, så de ikke slides af ved berøring. Langt de fleste plastikprodukter, der produceres i betydelig mængde, fremstilles ved hjælp af sprøjtestøbning. Dette er en replikationsproces, hvor man starter med en stålform med et hulrum, formet efter den ydre geometri man ønsker plastikdelen skal have. Under højt tryk sprøjtes varm flydende plastik ind i formen, plastikken køles ned, formen åbnes og den færdige hårde plastikdel kan tages ud.

Nanostrukturerne kan ætses ind i overfladen på støbeformen

I forhold til strukturel farvning, kan små nano-strukturer med samme længdeskala som lysets bølgelængde kun defineres med dyrt, langsomt udstyr. Derfor er det i praksis for omfattende at definere strukturer på nanoskala efter støbning på hver enkelt støbte element, som man traditionelt har gjort det med dekorationsmaling. I stedet kan nano-strukturerne ætses ind i overfladen på støbeformens inderside. I sprøjtestøbeprocessen overføres nano-strukturerne så automatisk til plastikoverfladen i samme fabrikationstrin som formgivningen af elementet. Denne fabrikationsmetode sætter dog nogle begrænsninger for hvilke typer strukturer, der kan fremstilles, og derved også hvilke typer strukturelle farver man kan lave. Som allerede nævnt, fremkommer sommerfuglens farver som følge af lagdelte 3D-strukturer.

Disse kan ikke skabes i en sprøjtestøbeproces, da det ikke vil være muligt at frigøre strukturerne fra formen. Derved kan man ikke blot kopiere sommerfuglen. For at kunne opskalere processen skal strukturerne kunne frigøre sig fra formen.

Farver kan kun baseres på changerende diffraktionseffekter

Denne geometriske industrielle begrænsning har vist sig at være meget problematisk i forhold til at fremstille farver, der er uafhængig af observationsvinkel i ren plastik.

Farver kan kun baseres på changende diffraktionseffekter, hvor farven ændrer sig når observationsvinklen ændrer sig, som det for eksempel ses når man holder en CD eller en DVD op i lyset. Efter intensive studier, har det vist sig særdeles udfordrende at skabe kontrastfyldte vinkelrobuste farver i ren plastik baseret på sprøjtestøbning.

Derfor har vi udviklet en metode, der muliggør vinkeluafhængige strukturelle farver i masseproducerede plastikprodukter ved hjælp af en tynd metalfilm, såkaldte plasmonfarver. Først støbes en plastikoverflade, som består af søjler arrangeret i en gitterstruktur. Derefter pådampes et ultratyndt lag aluminium (20 nm).

Når metallet pådampes på den rigtige måde, lægger der sig en lille aluminiumdisk på toppen af hver plastiksøjle. Derudover dannes der aluminum i bunden som en kontinuerlig film. Aluminiums-diskene på overfladen gør det muligt at skabe såkaldte lokaliserede overfladeplasmoner.

Man kan designe hvilke bølgelængder, der skal absorberes

Det er svingninger, der opstår, når lyset interagerer med de frie elektroner i metallet. Lysets elektromagnetiske felt og elektronerne kobles således, at der overføres energi til elektronerne, som derved sættes i bevægelse.

For en konstant diskdiameter vil nogle bølgelængder koble kraftigt til elektronerne og lyset absorberes, mens andre vil koble svagere. På den måde kan man designe hvilke bølgelængder der skal absorberes og hvilke der skal reflekteres fra overfladen. Søjlernes diameter og periode afgør overfladens farve og det er derved teoretisk muligt at lave et stort udvalg af forskellige farver.

Overfladen kan gøres robust overfor fedtede fingre

Fra et eksperimentelt perspektiv har vi siden eftervist, at det er muligt at lave søjler med diametre 50-150 nm i relevante plastikmaterialer. Den varierende diameter af



Figur 4: Strukturer med 3 forskellige diametre er brugt til at printe et DTU logo. Det er illustreret hvordan overfladen på mikro skala består af den fabrikerede struktur der er ansvarlig for farven. Elektronmikroskopibilledet til højre viser overfladen set fra 15 grader over horisonten.

søjlerne fører efter pådampning til metaldiske med tilsvarende variation, hvilket i sidste ende fører til forskellige farver af hvert område.

Man kan lave store sammenhængende områder, hvor diskene har samme størrelse for at få en konstant farve, eller man kan variere diameteren i et bestemt mønster for at dekorere overfladen. I forhold til vinkelafhængighed har vi målt og observeret at farverne i et stort vinkelinterval forbliver konstante. Derudover har vi vist, at overfladen kan gøres robust overfor fedtede fingre og slid ved at påføre en beskyttelsescoating ovenpå metallet. Ved at optimere det samlede systems optiske egenskaber, er det muligt at lave overflader som fungerer i almindelige lysmiljøer og som kan tåle dagligdagsbrug.

Det kræver stor kotrol over sprøjtestøbeprocessen

Efter flere års arbejde er således lykkedes at udvikle strukturelle farver til plastikprodukter baseret på en platform, som består af en nano-struktureret plastikoverflade, et tyndt lag af aluminium og en coating til at beskytte overfladen. Med disse tre materialer kan man lave mange forskellige farver hvor traditionel farvning kræver et nyt farvestof for hver farve. Mængden af aluminum, der skal bruges, er så lille, at det vil have ringe indflydelse på plastikkens egenskaber ved omsmeltning, og hvis man kan finde en coating, der kan genbruges sammen med den originale plastik, er man næsten i mål.

Der er dog stadig teknologiske udfordringer på vejen frem mod masseproduktion. Blandt andet kræver det stor kontrol over sprøjtestøbeprocessen for at kunne replikkere nano-strukturerne i en kvalitet der leder til den ønskede effekt. Men hvis de teknologiske udfordringer overkommes kan fremtidens plastikoverflader være farvet med plasmoniske strukturelle farver. Plasmonfarverne er klar. 10 10 10

4

NAVETOUCH

fra idé mod

Volumenmarkedet

HENRIK C. PEDERSEN, MICHAEL L. JAKOBSEN OG STEEN HANSON Optiske mikrosensorer & -materialer og Optisk sensorteknologi, DTU Fotonik

WaveTouch er navnet på en ny optisk teknologi, som har potentiale til at revolutionere markedet for touch skærme, idet produktionsomkostningerne kan bringes ned på nogle få US dollars for en iPhone størrelse. Teknologien er opfundet og udviklet af DTU i samarbejde med det danske firma OPDI Technologies.

Fra komfurer til iPads

"Kan I ikke opfinde en ny touch teknologi til mit komfur? Mit nye smarte touch komfur virker ikke, når jeg har våde hænder!". Nogenlunde sådan faldt ordene tilbage i 2006, da direktøren for OPDI Technologies, Jørgen Korsgaard, besøgte os i det, der den gang hed Risøs optikafdeling. Vi tog straks udfordringen op og kunne kort efter demonstrere en meget simpel teknik, hvor lys, der løber inde i en glasplade, kunne aktiveres ved at berøre glaspladen med en finger, uanset om fingeren var tør eller våd.

Næsten samtidigt blev iPhonen imidlertid introduceret. Det fik markedet for touch skærme til at eksplodere, og da vores optiske touch teknik viste sig at være meget billig at producere, skiftede fokus hurtigt hen imod det kolossalt store marked for håndholdte devices. Idéen til den optiske touch skærm var født og bl.a. via en innovationskonsortiebevilling fra RTI¹ blev rejsen hen imod dannelsen af firmaet O-Net WaveTouch sat i gang.

Optisk touch teknologi

Allerede i 80'erne introducerede Hewlett-Packard model HP-150, som var en optisk computer touch skærm. Her havde man placeret et gitter af lysgivere langs to af skærmens sider, som hver sendte en lysstråle tværs henover skærmen, mod hver sin lysdetektor. Når en finger berørte skærmen blev to stråler afbrudt, hvorved man kunne bestemme positionen.

"Over-the-surface" teknikken kræver i sagens natur en ramme omkring skærmen, som hæver sig over skærmens overflade. I de fleste tilfælde ønsker designerne sig dog et såkaldt *flush* design, hvor der ikke er nogen kant. Derfor fokuserede vi fra starten på at udvikle en teknologi, som ikke kræver nogen hævet ramme.

I Centre for Industrial Nano-Optics, grant #75823 (2007-2010).



Figur 1: Tidlig optisk touch skærm, hvor man benyttede et "overthe-surface" lys-gitter.



Figur 2: Optisk computer touch skærm fra Hewlett Packard, (1983).



Figur 3: Nyere "over-the-surface" optisk touch skærm fra svenske NeoNode (2007).



Figur 4: Grundprincippet i WaveTouch. Lysstråler ledes fra den ene side til den anden i skærmens topplade. En finger, som berører overfladen, kobler lyset ud af skærmen.



Figur 5: "Imaging edges" princippet, hvor toppladen af skærmen er vist oven fra. Pladen er sprøjtestøbt i acryl og er ca. 1 mm tyk. En laser V belyser nederste højre hjørne af pladen, hvori der er indstøbt en konkav spredelinse, som fordeler lyset jævnt i hele pladens plan. Lyset rammer herefter de to modstående kanter, her kaldet C_x og C_y der er udformet som facetterede, parabolske spejle. Disse har til formål at kollimere lyset, således at det bevæger sig parallelt med hhv. x- og y-aksen. Lyset rammer herefter siderne F_x og $F_{v'}$ der ligeledes er formet som facetterede paraboler og som dermed fokuserer lyset igen mod øverste venstre hjørne. Her kobles lyset ud via en konveks linse og rammer endelig et detektor array, her kaldet D.A. Hvis en finger berører toppladen vil de to pågældende lysstråler kobles ud, hvilket resulterer i to mørke pletter på detektor arrayet. Positionen af disse pletter giver os fingerpositionen. De reflekterende kanter er metalliserede.

WaveTouch

Løsningen blev at benytte selve skærmen som lysleder. Hvis man således vælger at sende lyset ind i skærmens topplade vil lyset transporteres inde i skærmen, så længe der ikke er noget objekt, der berører skærmen. Men, hvis et objekt med det rigtige brydningsindeks berører skærmen, vil lyset blive ledt op i objektet, hvorved detektoren vil registrere tab af lys. Lysets refleksionsvinkel inde i skærmen bestemmer hvilke typer af objekter, der vil give berøringsfølsomhed. Man kan således undgå vandfølsomhed men bevare fingerfølsomhed p.g.a. forskel i brydningsindeks.

Med lyslederudgaven, havde vi opnået *flush* designet, men der var et andet, langt værre problem, som skulle løses. Nemlig det faktum, at det store antal af lyskilder og detektorer ville give en alt for høj produktionspris.

For at løse dette opfandt vi "*imaging edges*", hvilket er specielt udformede kanter i toppladen. Via disse kan vi med én enkelt lyskilde (såkaldt VCSEL laser, som kan erhverves for under 1 USD pr stk) gennemlyse hele skærmen og samtidig opsamle lyset igen på et meget lille detektorareal, typisk 0,1 X 3 mm.

Den lille genialitet

Den skarpe læser vil måske nu tænke, "hvad med de diagonale stråler, altså dem, som går fra nederste højre hjørne og op mod C_x og C_y , vil de ikke også være berøringsfølsomme?" Jo, og det ville give et værre rod af mørke pletter på detektoren, som ville være svære at afkode! Hvis det da ikke lige var på grund af endnu en smart kant-feature, der forhindrer dette. For, udover at være parabolsk krumme, er kanterne C_x og C_y skrå på den anden led. Dette bevirker at de kollimerede stråler vinkles ud af planet under deres passage fra hhv. C_x til F_x og C_y til F_y . Vinklingen er således beregnet til at gøre de kollimerede stråler berøringsfølsomme. De fokuserende kanter F_x og F_y er modsat vinklede, således at de fokuserede stråler igen er ufølsomme over for berøring. Dermed opnår vi altså kun to mørke og entydige pletter på detektor arrayet.



Figur 6: (a) Kanten C_x står ikke vinkelret på overfladen, men er vippet 9 grader. Dette bevirker, at det reflekterede lys bliver vinklet ud af planet og dermed zig-zagger undervejs fra C_x mod F_x . Vinklingen gør lyset berøringsfølsomt. Derimod er det ikkevinklede lys, der løber fra hjørnet ved V mod C_x ikke berøringsfølsomt. Fotoet (b) viser toppladen, hvori en stråle forvandles fra ikke-vinklet, diagonalstråle til vinklet zig-zag stråle.



Figur 7: (a) Første demo realiseret I sprøjtestøbt acryl. Bemærk det udkoblede lys omkring fingerspidsen. (b) De to mørke pletter på detektor arrayet, her repræsenteret ved to dyk i den røde kurve.

Den første demo og vejen frem mod O-Net WaveTouch

Det var egentlig relativt simpelt at beregne toppladens udformning, så vi opnåede den ønskede funktion. Til gengæld var det uhyre vanskeligt og bekosteligt at få fremstillet den. Flere "diamond turnere" har gennem tiden påstået, at de kunne fræse emnet direkte ud af en acryl plade. Med kanter i optisk kvalitet. Det ved vi nu, at det kan de ikke. Det har kostet ekstremt dyre lærepenge at nå til denne erkendelse, så vi har måttet bide i det meget sure æble, og har fået fremstillet meget dyre støbeværktøjer, selv til de indledende demoer! Til gengæld virkede demoerne fint og Jørgen Korsgaard fra OPDI var meget ivrig efter på et meget tidligt stadie at starte salgsprocessen. Vi tog derfor på rundtur til USA's største elektronik koncerner (bl.a. Apple, Motorola og Qualcomm) helt uden demo, idet denne stadig skulle være fastspændt til et optisk bord og være tilsluttet vakuumpumpe for at virke! Besøgene var ekstremt lærerige og de resulterede også i et par amerikanske besøg med den hensigt at købe teknologien. Det blev dog kinesiske O-Net Communications, der i sidste ende blev valgt som partner. OPDI Technologies og O-Net Communications har således dannet et Joint Venture, kaldet O-Net WaveTouch, hvor O-Net har investeret 3 mio USD for opnå 40% ejerandel. DTU Fotonik har udover kontant betaling også opnået en ejerandel i OPDI Technologies på 5%.



Figur 8: Fra underskriftceremonien i maj 2013, hvor O-Net Communications sammen med OPDI Technologies danner O-Net WaveTouch.



Figur 9: (a) Seneste udgave af WaveTouch designet, hvor ind- og udkoblingslinserne er placeret i samme hjørne af den sprøjtestøbte acryl topplade. (b) Første prototype rettet mod armbåndsur. (c) Anden prototype rettet mod GPS navigator til biler.

WaveTouch i dag

Designet har udviklet sig en hel del siden den første demo. I dag er al elektronik, herunder laser og detektor array, samlet i ét hjørne. Ind- og udkoblingslinse er således også indstøbt i samme hjørne. O-Net WaveTouch har udviklet den første prototype, som skal bruges til et armbåndsur. Næste prototype er rettet mod bil-navigatorer.

I dag ligger O-Net WaveTouch's udviklingsafdeling på 4 mand i Tåstrup. Yderligere to mand har til huse i Shenzhen, Kina. Virksomheden har stadig et tæt samarbejde med DTU Fotonik, bl.a. i innovationskonsortiet LIQCOP^{II}, der er rettet mod nye teknologier til optiske plaststøbeforme.

II Liquid Quartz Coating for High-Quality Polymer Replication, grant # 11-118420 (2012 – 2015)

3D afbildning af øjet med laser

KRESTEN YVIND, HITESH KUMAR SAHOO, THOR ANSBÆK Nanofotoniske komponenter, DTU Fotonik

Hvert år får titusindvis af mennesker konstateret en øjensygdom. Alene i Danmark får 6 personer dagligt konstateret en synsstyrke på under 33 % og betragtes herefter som blinde.

For at få konstateret en øjensygdom skal patienter i dag først til en øjenlæge, som kan diagnosticere patientens øjensygdom. Hos øjenlægen bruges apparatur til at se på øjenbaggrunden for at diagnosticere sygdomme relateret til nethinden eller hornhinden. En af de store folkesygdomme er nethindesygdommen aldersbetinget makuladegeneration (AMD), som rammer 40 % af befolkningen over 70 år og resulterer i synsforringelse og i sidste ende blindhed. Optisk kohærens tomografi (OCT) bruges i dag ved behandling af AMD, fordi man uden at skade øjet kan se et tværsnitsbillede af nethinden. Ved brug af OCT og medicinsk behandling blev antallet af nytilkomne blinde halveret.

Den nuværende kommercielle OCT-teknologi gør det kun praktisk muligt at gå ind og se tværsnit af øjenbaggrunden ved nethindens skarpsynscentrum. Øjenlægerne efterspørger OCT-apparater som kan gøre det muligt at lave en øjenundersøgelse, der viser både øjenbaggrunden og tværsnittet af hele nethinden, men den nuværende teknologi er for langsom til at skanne et sådant 3D billede. En ny generation af OCT-systemer er derfor ved at blive udviklet, baseret på lasere med variabel bølgelængde efter princippet beskrevet i figur 1. Sådanne OCT-systemer har gjort det muligt at lave 3D billeder i høj kvalitet af hele øjet, figur 1 (højre).

Forskningsgruppen *Nanofotoniske komponenter* har udviklet nøglekomponenten, en OCT Swept Laser, til den OCT-teknologi, som gør det muligt at foretage 3D-optagelser af øjet på et splitsekund. Med denne teknologi vil øjenlægen på en let måde kunne overskue øjet og diagnosticere øjensygdomme i fremtiden. Kernen i vores OCT Swept Laser er en halvlederlaser (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, forkortes VCSEL). Vores laserteknologi udmærker sig ved at kunne ændre



Figur 1: Venstre. Skematisk tegning af hurtigt OCT system. En beamsplitter bruges til at interfere lyset fra et fast spejl og prøven/ øjet og intensiteten måles som funktion af laserbølgelængden der skannes i tid. Ved hjælp af en fourier transform konverteres interferogrammet til et dybdeskan. Den hurtigt skannende laser er nøglekomponenten for metoden. Højre. 3D billede af et øje (fra MIT, USA) hvor det hurtige dybdeskan er brugt sammen med skanning i planen for at skabe et 3D billede. [Grulkowski et al. Biomedical Optics Express 3 (2012) 2733])



Figur 2: Eksempel på måleresultater direkte på laseren. Venstre plot viser det optiske spektrum med og uden en sinusoid spænding påtrykt MEMS kontakten. Eftersom laseren skanner meget hurtigere end måleudstyret, ses et kontinuert og bredt spektrum. Højre plot viser, hvordan komponent simplest muligt kan pakkes til kommercielle anvendelser og indflydelsen af trykket i pakken. Ved at anvende et lavt tryk i pakken svinger MEMS spejlet med væsentlig større amplitude, når spændingen, der påtrykkes, har en frekvens tæt på systemets resonansfrekvens.

bølgelængde hurtigt og kontinuerligt og have lavere produktionsomkostninger end andre løsninger. En version af laseren er vist i figur 3, hvor det ene laserspejl ses ophængt i nogle fleksible arme, således at det kan sættes i svingninger, hvilket få laserens bølgelængde til at blive skiftevis kortere og længere. Denne konstruktion kaldes et mikroelektromekanisk system (MEMS) og har den fordel, at den masse, der skal bevæges, er meget lille, så det kan gøres meget hurtigt. Spejlets bevægelse aktiveres ved brug af de elektrostatiske tiltrækningskræfter, der genereres, når der lægges en spændingsforskel mellem det øverste frithængende spejl og laseren nedenunder, dvs. de to kontakter vist i figur 3 i midten Endelig bringes laseren til at udsende lys, når en strøm løber gennem laserdioden ved en påtrykt spænding mellem laserkontakten på forsiden og bagsiden som vist i figur 2 højre. I figur 2 ses det tidsmidlede optiske spektrum fra laseren med MEMS i hvileposition (grøn kurve), og når der lægges en sinusmodulation på MEMS kontakten (rød og sort kurve). I det konkrete tilfælde moduleres ved 850 kHz, hvilket er tæt ved resonansfrekvensen for MEMS oscillatoren (spejlet med ophæng), så amplituden af bølgelængdevariationen øges, som det ses på den højre figur i figur 2. Dæmpningen af spejlets oscillation er primært givet af luftmodstanden. Ved at sænke trykket omkring laseren, hvilket kan opnås i den indkapsling, laseren alligevel skal have, kan dæmpningen mindskes og amplituden stige kraftigt. Den udviklede OCT Swept Laser har dannet udgangspunkt for opstartsvirksomheden OCTLIGHT ApS, som kommercialiserer teknologien.



Figur 3: Venstre og midt. Elektronmikroskopibilleder af en MEMS VCSEL fra DTU. Højre. Lysmikroskopbillede af laser i brug. Ledninger til kontakterne og det udsendte laserlys ses.



Konventionel laser

Lys ud Spejl Forstærkermedie Spejl

Mikrokavitetslaser (VCSEL)

Hvordan virker laseren?

En laser består grundlæggende af et forstærkermedie, der kan forstærke lys via stimuleret emission, og en såkaldt optisk kavitet, dvs. typisk to spejle, der kan holde lyset omkring forstærkermediet, således at det lys, der tabes på en omgang rundt i kaviteten, er mindre end det, forstærkermediet kan tilføre. I det tilfælde vil lyset være domineret af stimuleret emission hvor alt lyset svinger i fase, og vi siger, vi har en laser (eng: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

I en konventionel laser ændres bølgelængden på lyset ved at gøre et af spejlene bølgelængdeafhængigt, således at kun en enkelt bølgelængde reflekteres. Laseren udsender kun lys ved netop den bølgelængde, for hvilken tabet er mindre end forstærkning, og laserstrålen vil derfor udsende den bølgelængde, hvor refleksionen er størst! Hvis refleksionsbølgelængden ændres, vil laserens bølgelængde også ændres, og laseren vil f.eks. kunne bruges til OCT-målinger. I praksis realiseres sådanne bølgelængdejusterbare lasere typisk ved brug af et optisk gitter, som er en struktur, der reflekterer i forskellige vinkler som funktion af bølgelængden og et mekanisk system, som kan dreje det optiske gitter. Denne konstruktion er forholdsvis langsom og fylder en del, så selve laseren har en størrelse på mellem en tændstiks- og skotøjsæske. DTU-laseren ændrer bølgelængde radikalt anderledes, hvilket har vist sig at give markant bedre billeder. DTUs laser er som nævnt en VCSEL, hvilket også kaldes en mikrokavitetslaser, eftersom afstanden (L) mellem spejlene, der udgør kaviteten, typisk kun er få bølgelængder. I det tilfælde vil bølgelængden af laseren være givet af den stående bølge, der opstår mellem de to spejle, således at bølgelængden er givet ved $\lambda_m(L) = \frac{2nL}{m}$,

hvor n er brydningsindeks for materialet mellem spejlene, og m er et helt tal. Hvis nu det ene af spejlene er lavet som del af et mikroelektromekanisk system (MEMS), så det kan bevæges, vil L og dermed λ kunne ændres. Denne mekanisme for ændring af bølgelængden virker, så længe man arbejder med den "samme" stående bølge (m i ligningen), hvilket kan kvantificeres med den såkaldte frie spektralbredde (FSR) for kaviteten FSR = $\frac{\lambda_2^2}{2nL_0}$, hvor λ_0 er centerbølgelængden for laseren, og L₀ den tilsvarende kavitetslængde. Af formlen for FSR ses, hvorfor denne mekanisme til ændring af bølgelængden primært er interessant for mikrokavitetslaseren, hvor en lille L₀ giver mulighed for et bredt bølgelængdeområde. En anden parameter, hvor VCSEL laserne er overlegne, er på den hastighed, hvorved bølgelængden kan ændres, hvilket bestemmer, hvor hurtigt man kan danne et billede. Udover begrænsninger i mekanikken har den konventionelle laser med variabel bølgelængde baseret på et optisk gitter en anden grundlæggende begrænsning i, hvor hurtigt man kan ændre bølgelængen, nemlig at laserstrålen skal startes fra spontan emission ved hver ny bølgelængde. Eftersom lysets hastighed er ekstremt højt, og forstærkermedierne har kraftig forstærkning, bygger laserstrålen hurtigt op, men den tilfældige startproces introducerer støj i de efterfølgende målinger. For en korrekt konstrueret mikrokavitetslaser udnyttes dopplerskiftet (kendes fra tonehøjden fra ambulancers sirener, når de passerer) fra det hurtigt bevægende spejl til at skifte bølgelængden på lyset, så det præcist passer med resonansbetingelsen (λ_m) . Dette giver en langt mindre støjende skannende laser, som siges at have en høj dynamisk kohærens og kan måle meget længere end konventionelle lasere.



Figur 4: Skematisk tegning af MEMS VCSEL.

Hvordan realiseres laseren?

Halvlederlasere fabrikeres i specielle rene rum, hvor forskerne er iført specielle støvfri dragter, så hår og hudflager ikke ødelægger komponenterne. De mindste strukturer, der skal ætses ind i halvlederskiverne, som laserne er opbygget af, er ca. 1.000 gange mindre end et hår, så der skal ikke meget til at ødelægge en komponent. Heldigvis fremstilles laserne mange tusinde ad gangen, så til forsknings- og undervisningsbrug kan vi leve med, at der er nogle stykker, der ikke virker. Den laserstruktur, der nu laves på DTU, er en nyere generation end den kommercialiserede og er vist i figur 4. I dette design er det bevægelige spejl indkapslet i strukturen, så det ikke er følsomt for vand og støv, og halvlederskiven med spejlet er bonded sammen med forstærkermediet, som derfor kan vælges frit. Bonding er dog en krævende proces, der kræver næsten atomart flade overflader på materialerne, så de automatisk danner stærke kovalente bindinger, når de sættes sammen. Det sidste spejl er opbygget af alternerende lag af TiO₂ og SiO₂, der fordampes kontrolleret på toppen af komponenten. Ved hvert skift mellem materialerne er der en refleksion, og ved at vælge tykkelserne korrekt, adderer den samlede refleksion op til >98 %.

Før fabrikationen regnes strukturen grundigt igennem. Et eksempel på et design er vist i figur 5. Hvis man kigger nøje efter, kan det ses, at det elektriske felt bevæger sig, når luftgabet ændres, og laserens bølgelængde ændres. Dette kan udnyttes til at placere forskellige typer forstærkermateriale, der forstærker forskellige dele af spektret, så det passer med laserens bølgelængde på positionen. Herved kan laseren generere bredere optiske spektra, end én type forstærkermateriale kan understøtte.

For flere detaljer om teknologien:

- T. Ansbæk, I-S. Chung, E. Semenova, O. Hansen, and K. Yvind, "Resonant MEMS Tunable VCSEL," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, vol. 19, no. 4, pp. 1-6, 2013
- T. Ansbæk, I-S. Chung, E. Semenova, and K. Yvind, "1060 nm Tunable Monolithic High Index Contrast Subwavelength Grating Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 25, no. 4, pp. 365–367, 2013.



Figur 5: Computersimulering (design) af laseren. De to yderste grafer viser et tværsnit midt igennem laseren i figur 4, hvor der er forskellig spænding og dermed forskellig afstand på luftgabet. Den røde kurve viser brydningsindeksprofilen i laseren, mens den blå kurve viser den stående bølge mellem spejlene (henholdsvis 1.230nm og 1.368nm). Det ses, at lyset aftager igennem DBR spejlet, men lidt lys kommer ud. Forstærkermaterialet er lagene med højest brydningsindeks i "InP aktiv området". Miderste graf viser resonansbølgelængden som funktion af luftgabets størrelse samt kravet til forstærkning i forstærkermaterialet (rød kurve).



Optiske **mikro-robotter**

JESPER GLÜCKSTAD*°, MARK VILLANGCA*, DARWIN PALIMA* OG ANDREW BANAS° Programmérbar faseoptik, *DTU Fotonik, °OptoRobotix ApS

Synergien mellem fotonik, nanoteknologi og bioteknologi peger i retning af helt nye forsknings-gennembrud inden for nano-bioteknologi og nano-biofotonik. Fotoniske nyskabelser har allerede været med til at overvinde den naturlige diffraktionsgrænse for afbildning med ikke bare mikroskopisk, men med helt ned til nanoskopisk opløsning. Dette gennembrud blev fejret med Nobelprisen i kemi i 2014. Nye videnskabelige landvindinger kræver dog værktøjer, der ikke kun tillader passiv observation af nanoskopiske fænomener, men også tillader forskere at "række ind" og direkte manipulere og interagere med bestanddelene i dette nanoskalaområde. Vi arbejder på DTU Fotonik lige nu med en helt ny teknologiplatform, der i fremtiden skal kunne adressere dette ved hjælp af såkaldte optiske mikrorobotter. Det er vores målsætning, at disse nye mikroskopiske robotter vil kunne hjælpe med at cementere forskningen og innovationen i Danmark som en af de førende inden for rumlig og tidslig lysstof vekselvirkning på de mindste biologiske skalaer.

Biologi på nanoskalaniveau er lidt som en minedriftsekspedition, hvor forskere er på jagt efter uvurderlige videnskabelige ædelstene, og er indtil for nylig blevet betragtet som noget, der næsten kun kan forekomme i en science fiction verden. Som ved enhver minedriftsmission afhænger kvaliteten af det, der kan findes og udgraves, og af kvaliteten af de tilgængelige værktøjer, som er til rådighed. Avanceret optisk nanoskala mikroskopi – nu navngivet optisk *nanoskopi* i forbindelse med Nobelprisen i kemi i 2014 – kan allerede i dag overgå den klassiske diffraktionsgrænse og tilvejebringe nanoskopisk billeddannelse med en punkt-for-punkt opløsning ned til nogle ganske få nanometer.

Tilsvarende er det i dag muligt ved hjælp af lys fra ultrahurtigt pulsede lasere at 3D-printe nanoskopiske polymer-strukturer med en punkt-for-punkt opløsning ned til under 25 nanometer. Processen, der gør dette muligt, er kendt som to-foton mikro- eller nanofabrikation og er baseret på en snedig kombination af teknikker fra føromtalte nanoskopi og såkaldte ulineære optiske effekter i lysfølsomme polymer-materialer.

En tredje videnskabelig "ingrediens" på vejen mod de futuristiske "mineekspeditioner" på nanoskalaniveau er den fascinerende evne, fokuseret laserlys har til at kunne indfange, fastholde og manipulere mikroskopisk små objekter og celler. Den amerikanske fysiker Arthur Ashkin viste ved et banebrydende eksperiment ved Bell Labs i midten af 80'erne, at stærkt fokuseret laserlys er i stand til at udveksle kræfter med små lysbrydende partikler og nærmest på næsten magisk vis få partiklerne til at søge hen mod laserstrålens fokus og derefter svæve stabilt omkring dette fokuspunkt. I biologiske forsøg foregår dette bedst i en vandig opløsning, hvor celler og andre mikroorganismer kan trives og forblive i live i et relativt naturligt miljø. Ashkins studerende, Steven Chu, videreførte dette arbejde og raffinerede det til et niveau, så selv atomer kan indfanges og lasermanipuleres, og det gav ham Nobelprisen i fysik i 1997.

Kombineres alle disse fantastiske videnskabelige gennembrud i arbejdet med lys, kan vi lægge grundstenen til de fleste af de funktionaliteter, der kræves for at udvikle funktionelle optiske mikrorobotter. Et grafisk eksempel på simpelt opbyggede og 3D-printede optiske mikrorobotter er illustreret i figur 1 på side 36.

Ved hjælp af to-foton mikrofabrikation er det f.eks. muligt at 3D-printe optiske mikrorobotter med multifunktionelle, biofotoniske nanoprober eller redskabsspidser med helt ned til 25 nanometers opløsning. Det



smarte ved denne fremgangsmåde er, at selvom man ønsker at probe på nanoskalaniveau, kan resten af robotstrukturen 3D-printes i en størrelse og en form, der tillader bekvem optisk lasermanipulation. I figur 1 er der f.eks. illustreret optiske mikrorobotter, der hver er udstyret med fire 3D-printede "styrekugler" i mikrometerstørrelse, som hver især fastholdes og kan manipuleres med det røde laserlys. Herved skabes en droneagtig funktionalitet, hvor hver mikrorobot kan styres rundt i 3D og har en række uafhængige frihedsgrader i hver deres bevægelse. Ydermere er der det smarte, at man kan bruge almindelig optisk mikroskopi med et relativt stort "synsfelt" til at styre og observere de optiske mikrorobotter, men samtidig bevare nanoskopisk funtionalitet via den "påmonterede" nanoprobe. Eksempler på forskelligt udformede optiske mikrorobotter med prober kan ses i figur 2:

Den relativt store grundstruktur af de optiske mikrorobotter, som ses i figur 2, medvirker endvidere til at mindske de såkaldte Brownske bevægelser, der får små objekter til at vibrere, og stabiliserer i det hele taget strukturen svarende til en solid pickuparm og dens tilhørende nål ved afspilning af en gammel vinylplade.

Laserstyrede optiske mikrorobotter kan dermed fungere som "frit flydende" sonder til overvågning af processer in vivo og levere rumligt målrettede mekaniske, kemiske eller begge typer stimuli for udvikling og afprøvning af



Figur 2: 3D computermodeller af optiske mikrorobotter ses i søjlen til venstre. Søjlen til højre viser de respektive resulterende 3D-printede resultater.



Figur 1: Illustration af optiske mikro-robotter der vekselvirker med en biologisk overflade



Figur 3: Ved hjælp af software og mikroskopi kan optiske mikrorobotter laserstyres som droner.

biologiske modeller og cellulær opførsel. Sammen med de parallelle forskningsaktiviteter, der foregår inden for avancerede cellulære miljøer, kan optiske mikrorobotter give dynamiske eksperimentelle stimuli, der ellers ikke er mulige at opnå i et fuldt 3D biomiljø. Som illustreret i figur 1 og figur 3 kan man forestille sig en mindre sværm af funktionaliserede robotværktøjer, der kan levere rumog/eller tidsprogrammerede cellulære stimuli selv ved brug af bioaktive stoffer, som ellers ikke kan sameksistere i opløsning. Et robotværktøj kan f.eks i princippet måle på receptorerne på en cellemembran og udnytte cellens signalnetværk til at indlede biokemiske processer inde i selve cellen. Selv uden kemisk funktionalisering kan robotværktøjerne stadig bruges til at levere programmerede mekaniske stimuli til at udforske de molekylære effekter, der f.eks. konverterer mekaniske signaler, opfanget af en cellemembran, til biokemiske svar længere inde i selve cellen. Eksempler på vores eksperimentelle muligheder i brugen af optiske mikrorobotter, der kan bruges til at probe cellemembraner eller aktivere andre mikroskopiske objekter, kan ses i figur 4:



Figur 4: (1)-(4) viser en optisk mikro-robot der prober en T-celle – filmet oven fra og fra siden. (5)-(10) viser mulighederne for at foretage opto-mekaniske operationer på et overflade-objekt.

Mulighederne er næsten uendelige, og med den seneste generation af vores optiske mikrorobotter vil vi snart være i stand til at levere en lille last til injektion i celler på et præcist område (figur 5).



Figur 5: Seneste generation af optiske mikro-robotter der vil kunne levere en lille last til celler.

SE DET SKJULTE med ultrahurtig terahertz-stråling



CORINNA LUDUVICA KOCH DANDOLO OG PETER UHD JEPSEN Ultrahurtig infrarød og terahertz videnskab, DTU Fotonik

Det er godt at finde ud af, hvad der er skjult under overfladen, og her vil vi se nærmere på den direkte betydning af dette udsagn.

Hvordan finder man ud af, om pudset på en mur sidder godt forankret på stenene eller er løst og skal renoveres? Man banker let på overfladen og lytter til lyden. Lyder det hult, er der dårlig kontakt mellem puds og sten, og er lyden fast, er der god kontakt. Ved at banke forskellige steder på muren kan man danne sig et overblik over, hvilket område der skal renoveres. Denne simple metode fungerer udmærket, hvis der er tale om en almindelig mur. Men har muren dybereliggende skader, kan det være svært at høre forskellen, og hvis muren for eksempel er udsmykket med et uvurderligt kalkmaleri, er der risiko for, at man banker en del af overfladen og maleriet helt løs. Dette simple eksempel illustrerer, at der tit er behov for metoder, der er mere præcise, mere skånsomme og som kan fortælle præcist, i hvilken dybde under overfladen eventuelle problemer findes.

Der findes flere måleteknikker, der kan detektere og visualisere skjulte strukturer. Fælles for disse metoder er, at et signal i form af lydbølger eller elektromagnetiske bølger detekteres efter at have udbredt sig i det emne, som skal undersøges. Et meget velkendt eksempel på visualisering ved hjælp af lydbølger er ultralydsscanning, hvor skjulte strukturer træder frem, da ekkoer fra overfladen af disse strukturer er adskilt i tid, og derfor kan måles separat. Vi kender denne teknik fra hospitaler og lægeklinikker og fra skibes ekkolod. Andre velkendte teknikker bruger forskellige former for elektromagnetisk stråling i stedet for lyd. Man bruger for eksempel røntgenstråling til gennemlysning af kroppen, bagage og tekniske installationer, og i avanceret form kan røntgenstråling bruges til frembringelse af tredimensionelle billeder af for eksempel kroppens indre ved hjælp af ekstremt kostbart CT-udstyr (CT = Computed Tomography).

På DTU og andre steder i verden arbejder vi med en ny teknik til ikke-destruktiv undersøgelse af den indre struktur af forskellige materialer. Denne teknik benytter ekstremt korte pulser af lys ved meget lange bølgelængder, såkaldt terahertz (THz)-stråling. THz-stråling har nogle meget attraktive egenskaber med hensyn til undersøgelse af den indre struktur af materialer. Dels har de fleste kemiske substanser karakteristiske signaturer i dette frekvensområde, og dels er mange forpakningsmaterialer gennemsigtige i THz-området, selvom de er aldeles lystætte for synligt lys.



Figur 1: (a) Transmissionsmåling og (b) refleksionsmåling med THz-pulser. Billedet dannes ved at scanne objektet i x- og y-retningen. (c) I hvert punkt måles det tidslige og spektrale indhold af den transmitterede/reflekterede THz puls, hvorved materialets absorptionskoefficient og brydningsindex kan bestemmes som vist i (d).

THz-pulser frembringes og måles ved hjælp af femtosekund-laserpulser for eksempel i små antennestrukturer, som er optimeret til THz-frekvensområdet [1]. Med denne teknik kan man frembringe meget korte pulser med en varighed på mindre end 1 picosekund (1 ps = 10^{-12} s). Figur 1 viser, hvordan man kan bruge THz-pulser til undersøgelse af den indre struktur af et objekt. En stråle med THz-pulser fokuseres på objektet, som skal undersøges. Objektet bliver så scannet i x- og y-retningerne, som angivet på tegningerne. Denne generelle måleteknik kaldes ofte for *THz-imaging*. Figur 1(a) viser en situation, hvor den transmitterede THz-puls måles.

THz stråling: Elektromagnetisk stråling i den fjerneste del af det infrarøde spektrum, på grænsen til mikrobølgeområdet. En frekvens på 1 THz svarer til en bølgelængde på 300 µm, omtrent 500 gange længere end bølgelængden for rødt lys. Moderne THz-kilder frembringer enten stråling med en bestemt frekvens (continuous-wave) eller ultrakorte pulser med meget stor båndbredde, der typisk dækker området mellem 0,1 og 3 THz. Som vi vil vise efterfølgende, er denne teknik specielt velegnet til detektering af kemiske substanser. Figur 1(b) viser en teknik, hvor THz-pulsen reflekteres fra objektet. Den indre struktur bliver afsløret ved at måle det tidslige forløb af det reflekterede signal. Overgange mellem forskellige materialer inde i objektet vil give anledning til små reflekser, som er tidsligt forsinkede i forhold til refleksen fra overfladen. Denne variation af THz-imaging er derfor specielt velegnet til kunstigt at separere de enkelte lag i lagdelte strukturer som for eksempel malerier. Dette vil vi se nærmere på til sidst i teksten. Figur 1(c) viser princippet for spektroskopi og kemisk genkendelse ved hjælp af THz-pulser. Hvis THz-pulsen på sin vej gennem objektet gennemtrænger en kemisk substans, vil specifikke frekvenser svarende til substansens absorptionsbånd mangle i det transmitterede signal. Eksemplet viser, hvordan THz-pulsens spektrum og tidslige profil ændres i laktosepulver (mælkesukker). Et meget tydeligt dyk i signalet ved 0,53 THz er karakteristisk for dette stof. Med en nærmere analyse af signalerne kan man finde absorptionskoefficienten og brydningsindekset for laktose som vist i figur 1(d). Disse kurver er grundlaget for en egentlig kemisk genkendelse af substanser, hvor forskellige matematiske teknikker (såsom Principal Components Analysis, PCA) kan benyttes til sikker og automatisk identifikation [2].



Figur 2: Kemisk genkendelse med THz-stråling i transmission. (a) Gymnasieelever under SRP-øvelse, hvor et brev med skjult indhold blev undersøgt med DTU's mobile THz-scanner. (b) Indhold af brevet: SD-kort, papirklips af metal, poser med druesukker og laktose. (c) Billede af brevets indre optaget med THz-Iys. (d) Kemisk genkendelse af laktose ved hjælp af absorptionssignaturen som ses i figur 1(d).

Identificering af kemiske substanser i lukkede pakker er af stor praktisk betydning for eksempel til detektering af skjulte sprængstoffer og narkotika men også til kvalitetskontrol i medicinalindustrien. Et simpelt eksempel på genkendelse af skjulte stoffer er vist i figur 2. Her ses fire gymnasielever under udførelsen af deres studieretningsprojekt (SRP) på DTU i efteråret 2015. Eleverne forberedte et brev med forskellige skjulte objekter (figur 2(b)), deriblandt en pose med laktose og en pose med druesukker. THz-gennemlysningen af brevet (figur 2(c)) viser tydeligt de skjulte objekter sammen med bobleplast-foringen af kuverten. Man ser, at udover konturerne af papirklips og plastikposer er der tre områder med "mistænkelige" objekter. En nærmere matematisk analyse af de transmitterede THz-pulser, der specifikt fremhæver kemiske signaturer, får posen med laktose til at træde tydeligt frem som vist i figur 2(d).



Figur 3: THz-imaging udført i refleksion af Jomfruen med Barnet og en Helgen, et træpanel fra det 14. århundrede fra Taormina på Sicilien. (a) Panelet under scanning. (b) Foto med synligt lys af det scannede område. (c)-(e) viser separerede THz-refleksioner fra de forskellige lag i panelet. (f) Detalje af forgyldningen i det scannede område. (g) THz-billedet af samme detalje afslører, hvordan kunstneren har påført bladguldet. (Foto i (a) er brugt med tilladelse fra Antonino Cosentino, Cultural Heritage Science Open Source, http://chsopensource.org)

Vi har i de seneste år arbejdet sammen med konservatorer og forskere fra Danmark, Italien og Belgien omkring anvendelse af THz-imaging til undersøgelse og hjælp i forbindelse med konservering af vigtige malerier og andre genstande fra vores fælles kulturarv [3-7]. Et eksempel på dette arbejde er vist i figur 3. Her har vi i samarbejde med Dr. Antonino Cosentino (Cultural Heritage Science Open Source) undersøgt et ikonisk træpanel fra det 14. århundrede fra samlingen på biblioteket i Taormina på Sicilien. THz-målingerne blev foretaget under restaureringen af ikonet. Man ser Jomfru Maria med Jesus på skødet og en helgen ved siden af sig (figur 3(b)). Billedet er udført på en flad træplanke (32x39x0,8 cm) og er udført oven på et tyndt lag grunder. Selve billedet er en kombination af forgyldning med bladguld og oliebaseret maling.

Ved at separere de forskellige tidslige dele af den reflekterede THz-puls er det muligt at danne billeder af de enkelte lag af ikonet, uden at billedet beskadiges. Overfladen af billedet mod luften ses i figur 3(c), overgangen mellem maling og grunder ses i figur 3(d), og overgangen mellem grunder og træ ses i figur 3(e), hvor træets årer er meget tydelige. Desuden ses beskadigelser af billedet gennem alle tre lag tydeligt som mørke områder. Det er altså muligt ved hjælp af THz-imaging at få et fuldt overblik over tilstanden af et sådant skrøbeligt kunstværk fra middelalderen. Udover den bevaringsmæssige stand er det også muligt at få indblik i den teknik, som kunstneren i sin tid har benyttet sig af under udførelsen af billedet. En detalje af en del af bladgulddekorationen mellem Jomfru Maria og helgenen, markeret med rektanglet på figur 3(b), er vist i figur 3(f) (synligt lys) og figur 3(g) (THz-refleksion fra øverste lag). THz-billedet afslører tydeligt, hvordan kunstneren har lagt bladguldet (lyse områder) på underlaget uden at snitte guldet præcist til og derefter malet figurerne oven på bladguldet. Den benyttede bladguldteknik er karakteristisk for visse perioder og kunstnere, og THz-billederne giver derfor vigtig information om ikonets baggrund, som ikke kan findes med andre metoder.

De her valgte eksempler viser en lille del af de områder, som THz-imaging i dag bliver anvendt inden for. Udbredelsen af teknikken er i øjeblikket ikke begrænset af mulige anvendelsesmuligheder, men af de høje omkostninger der er ved teknikken. Specielt er den nødvendige femtosekund-laserteknologi stadig meget dyr, hvilket begrænser udbredelsen af THz-imaging teknologien. Den teknologiske og kommercielle udvikling i denne retning ser dog meget lovende ud, og hvis det bliver muligt at reducere prisen for transportabelt THz-udstyr, viser de eksempler, som vi her har fremhævet, at THz-teknologi vil blive en integreret del af den værktøjskasse, som kan benyttes inden for kulturarvsbeskyttelse, industriel proceskontrol og screening i sikkerhedsbranchen.

Litteratur

- P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications", Laser Photon. Rev. 5, 124-166 (2011).
- [2] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints", Opt. Express 11, 2549-2554 (2003).
- [3] C. L. Koch-Dandolo, T. Filtenborg, K. Fukunaga, J. Skou-Hansen, and P. U. Jepsen, "Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting", Appl. Opt. 54, 5123 (2015).
- [4] C. L. Koch Dandolo, T. Filtenborg, J. Skou-Hansen, and P. U. Jepsen, "Analysis of a seventeenth-century panel painting by reflection terahertz time-domain imaging (THz-TDI): contribution of ultrafast optics to museum collections inspection", Appl. Phys. A 121, 981-986 (2015).
- [5] C. L. K. Dandolo, A. Cosentino, and P. U. Jepsen, "Inspection of panel paintings beneath gilded finishes using terahertz time-domain imaging", Studies in Conservation 60, S159-S166 (2015).
- [6] A. Cosentino, C. L. K. Dandolo, A. Cristaudo, and P. U. Jepsen,
 "Diagnostics pre and post Conservation on a 14th Century Gilded Icon from Taormina, Sicily", e-Conservation Journal 3, http://e-conservation.org (2015).
- [7] C. L. K. Dandolo and P. U. Jepsen, "Wall Painting Investigation by Means of Non-invasive Terahertz Time-Domain Imaging (THz-TDI): Inspection of Subsurface Structures Buried in Historical Plasters", J. Infrared Millim. Terahertz Waves 10.1007/ s10762-015-0218-9, 1-11 (2015).

Fremtidens medicinske diagnostik baseret på diodelasere



DOMINIK MARTI, OLE BJARLIN JENSEN, ANDERS K. PAUL MICHAEL PETERSEN OG PETER ANDERSEN Diodelasere og LED-systemer, DTU Fotonik

I tidskriftet Nature Photonics fra december 2015 [1] forklares, at diodelasere meget vel kan være nøglen til den næste evolution inden for medicinsk diagnostik. Det udstyr, som anvendes på hospitalerne i dag, er en mangfoldig blanding af apparaturer lige fra talrige ultralydsapparater til MR-skannere, og ofte for bekostelige til at kunne findes på andet end de største hopitaler. Noget af dette udstyr er udviklet til et dedikeret formål inden for medicinsk diagnostik, mens andet, såsom en ultralydsskanner, har vist sig at være mere alsidigt. Dette til trods mangler man stadig metoder til billeddannelse med ultrahøj opløsning.

Behov for høj billedopløsning ved medicinsk diagnostik

Vi har behov for en høj opløsning for at identificere en sygdom som kræft i dens forskellige former så tidligt som muligt. I tidlige stadier vil kræftlæsioner være meget små og således lette at overse med de nuværende, tilgængelige metoder. Det åbenlyse valg for at generere højopløselige billeder er også det valg, vi mennesker er mest vant til, nemlig synligt lys. Hvordan kan det så være, at vi kan tage megapixel billeder med et kamera i en smartphone, men ikke kan gøre det samme for vores egen krop? Svaret er ligetil, nemlig at vores kroppe ikke er særlig transparente. At tage et højopløseligt billede af en kræftlæsion under huden er det samme, som at prøve på at tage et billede en tåget aften gennem et mælkehvidt vindue på et badeværelse for så at identificere en måge udenfor. Så hvorfor overhovedet forsøge sig? Interessen for en tidlig kræftdiagnose er enorm, eftersom der udover at forbedre patienternes velfærd også er store besparelser

inden for sundhedssektoren, jo tidligere vi kan diagnosticere kræften. For at blive ved badeværelsesanalogien så er der forskellige kneb, vi kan bruge, for at kunne se mågen og tilmed identificere dens farver. Det eneste problem heri er at få kombineret disse kneb i en let anvendelig metode eller platform og samtidig ikke rode vores badeværelse til med bekosteligt udstyr.

Udvikling af lasersystemer og multifotonmikroskopi på DTU Fotonik

I Diodelaser- og LED-systemgruppen arbejder vi intenst på at løse begge disse problemer ved at udvikle kompakte lyssystemer til at afbilde menneskeligt væv. Vi har opbygget et særligt multi-fotonmikroskop, der er baseret på en diodelaser, samt et optisk kohærenstomografisystem, der er baseret på den samme teknologi [2, 3]. Figur 1 og 2 viser billeder taget med begge afbildende metoder.



Figur 1: Optisk kohærenstomografibillede af nethinden, taget med en frekvensfordoblet laserdiodepumpet Ti:safir laser.

Figur 2: Multifotonmikroskopibillede af fluorescensmærkede celler, taget med en frekvensfordoblet diodelaserpumpet Ti:safir laser.



Figur 3: Multimodalt tofotonmikroskop udviklet i Diodelaser- og LED-systemgruppen på DTU Fotonik. En diodelaser pumper en Ti:safir laser, som via en x/y-scanner kan aftaste en prøve (sample). I dette system er et OCM-system endvidere indlejret (en ultrahøjopløselig udgave af et optisk kohærenstomografisystem).

Til begge metoder anvender vi en diodelaser, der afgiver nær-infrarødt lys som det første led i en kæde af lyskonverteringer, som slutteligt udsender en ultrakort pulseret laserstråle på 800 nm i et bredt lysspektrum. Denne stråle kan benyttes til begge de førnævnte metoder på samme tid og dermed blive en del af et multisystem. Vores næste skridt er dermed at kombinere begge metoder i en enkelt opstilling som vist i figur 3.

Dette system vil indledningsvist stadig være laboratorieog forskningsudstyr. For at gøre det relevant inden for medicinsk diagnostik er der yderligere behov for at formindske de øvrige komponenter udover diodelaseren, gøre instrumentet brugervenligt, og frem for alt gøre det anvendeligt inden for mange områder. Vort mål er at kombinere disse metoder i endoskoper. Arbejdet er påbegyndt i et EU-projekt (FAMOS), og i et netop bevilget H2020 projekt (MIB, 2016) skal denne udvikling fortsættes og afprøves i kliniske studier.

Dette lasersystem afgiver en intensiv grøn lysstråle genereret ved at konvertere lys fra en infrarød diodelaser til grønt lys [4]. DTU Fotonik har opnået verdensrekorder i at konvertere infrarøde diodelasere til synligt lys. I 2015 opnåede forskningsgruppen den højeste laserkraft på 5,5 W ved at konvertere lys fra infrarøde diodelasere [5]. Denne unikke lyskildeteknologi sikrer en kompakt laserstråle med høj energi og fremragende egenskaber inden for biomedicinsk billeddannelse.

Referencer

- R. Won, "View from... Photonics Meets Biology Summer School: The biomission of diode lasers", *Nature Photonics*, vol. 9, no. 12, p. 786–787, December 2015.
- [2] A. Unterhuber, B. Považay, A. Müller, O. B. Jensen, M. Duelk, T. Le, P. M. Petersen, C. Velez, M. Esmaeelpour, P. E. Andersen and W. Drexler, "Simultaneous dual wavelength eye-tracked ultrahigh resolution retinal and choroidal optical coherence tomography", Optics Letters, vol. 38, no. 21, p. 4312–4315, November 2013.
- [3] K. König, P. E. Andersen, T. Le and H. G. Breunig, "Multiphoton imaging with a novel compact diode-pumped Ti:sapphire oscillator", *Microscopy Research and Technique*, vol. 78, no. 12, p. 1154–1158, December 2015.
- [4] O. B. Jensen, P. E. Andersen, B. Sumpf, K.-H. Hasler, G. Erbert and P. M. Petersen, "1.5 W green light generation by single-pass second harmonic generation of a single-frequency tapered diode laser", Optics Express, vol. 17, no. 8, p. 6532-6539, 2009.
- [5] A. K. Hansen, P. E. Andersen, O. B. Jensen, B. Sumpf, G. Erbert and P. M. Petersen, "Highly efficient single-pass sum frequency generation by cascaded nonlinear crystals", Optics Letters, vol. 40, no. 23, p. 5526-5529, 2015.



Figur 4: Kompakt frekvensfordoblet diodelasermodul udsender grønt laserlys (Foto courtesy: Norlase ApS).

1001001 10011101

1101/11110011

110011 11001001 100

MAMMAN

MMM1 11001001 100'

No. of Concession, No. of Conces

ANT TRACTORY IN

43 Tbit/s data fra en enkelt laser

LEIF OXENLØWE, TOSHIO MORIOKA, HAO HU OG MICHAEL GALILI Ultrahurtig optisk kommunikation, DTU Fotonik

Informationsalderen er bygget på et optisk internet, hvor hundrede milliarder optiske bits sendes rundt på jordens overflade hvert sekund. Disse mange bits sendes i en optisk fiber, som i dag udgør rygraden af internettet, og som Charles Kao fik Nobelprisen i Fysik i 2009 for at have udviklet. Hver eneste dag i år 2015 skaber og sender vi mere data, end der blev skabt fra tidernes morgen til omkring år 2000.

Så hurtigt er internettet vokset, og internettrafikken vokser stadig med tocifrede procenttal, cirka 35-50 % per år – altså den faktiske trafik på internettet på verdensplan. Samtidig er energiforbruget af internettet samlet oppe på det, der svarer til 2-3 % af det globale CO₂-udslip. Der er andre industrier (transport og byggeindustrierne f.eks.) der bruger lige så megen energi eller mere (altså svarende til mere end 2-3 % CO₂-udledning), men de vokser bare ikke så meget som internettrafikken. Derfor er det bydende nødvendigt, at ressourcerne udnyttes optimalt – det indebærer dels, at der skal bruges så lidt energi som muligt på datatransport, og dels, at der skal sendes så meget som muligt per tilgængeligt spektrum. At bruge færre lasere i en sender er derfor meget interessant.

Ved den internationale konference, Conference on Lasers and Electro-Optics 2014, som blev afholdt i San Jose, Californien i juni 2014, præsenterede vores gruppe et rekordeksperiment i form af et såkaldt *postd eadline paper*. Eksperimentet var en demonstration af verdens højeste bitrate genereret på lyset fra en enkelt laser og transmitteret igennem en multikernefiber. Vi opnåede 43 Tbit/s transmission fra en enkelt laser.

For at opnå denne rekord brugte vi alle de smarte tricks, der findes nu om stunder til at lave data i 5 dimensioner: tid, frekvens, polarisation, kvadratur (kompleks modulation) og rum (multikernefiber). I tid generede vi 320 Gbaud Nyquist-kanaler, og i frekvens multipleksede vi seks af disse Nyquist-kanaler ved forskellig bølgelængde sammen. Alle seks N-WDM-kanaler blev polarisationsmultiplekset, og hver puls bar på to bit i kvadratur i formatet kaldet DQPSK (differential quaternary Phase Shift Keying), hvor den optiske fase kan antage fire forskellige værdier i stedet for den binære med kun to



Nedenstående figur viser princippet:

Figur 1: Principtegning af, hvordan de 43 Tbit/s blev genereret. En enkelt pulset laser forbedrer sit spektrum til et superkontinuum (meget bredt sammenhængende spektrum), hvoraf seks 320 GHz brede spektrale dele filtreres ud. Disse 320 GHz bidder kan nu moduleres med data (i kompleks plan), og hvert symbol svarer til en meget kort puls på omkring 3 ps bredde. Ved at lægge flere sådanne pulser sammen tæt op ad hinanden (tidslig multipleksning) opnås en seriel streng af datapulser hørende til hver 320 GHz kanal. Derefter flettes en tilsvarende datakanal på en vinkelret polarisation, hvorved dataraten fordobles. Sluttelig multiplekses rumligt i syvkernefiberen, hvor seks kerner fyldes med data (7,2 Tbit/s), der transmitteres over den 65 km lang fiber. I modtageren findes den modsatte proces med en rumlig fordeler, en polarisationssplitter, en bølgelængdeopdeler (spektral) og til sidst en optisk tidslinseseriel til parallelkonverter til at splitte datasignalerne op i bidder, der kan modtages af kommercielt tilgængeligt udstyr.



Figur 2: Billede af et tværsnit af en syvkernefiber og en tegning af en metode til at koble lys fra enkelte fibre ind i en multikernefiber ved brug af en såkaldt fan-in/fan-out kobler.

værdier. Endelig benyttede vi en særlig optisk fiber, vi havde fået adgang til gennem et samarbejde med den japanske telegigant NTT. Denne fiber havde syv kerner inden for samme diameter som en almindelig single-mode fiber, og den var 67 km lang. Den midterste kerne blev brugt til at sende et klokkesignal til at synkronisere modtageren, og de seks ydre kerner bar hver på en kopi af N-WDM-signalet. Samlet set blev der altså transmitteret 43 Tbit/s – alt sammen baseret på en enkelt laser i senderen.

I modtageren blev der anvendt en såkaldt *optisk tidslinse* til at adskille signalerne igen. Optiske tidslinser er noget, vi har udviklet meget på de senere år, og vi har nu formået at udvikle dem til f.eks. at kunne modtage et Nyquist Tbit/s serielt signal og konvertere det til et spektralt parallelt signal, så man uden videre kan filtrere de enkelte kanaler fra hinanden uden at bruge mere energi, end den linsen bruger. Vi har f.eks. også vist, at brugen af sådanne tidslinser kan reducere det samlede energiforbrug i en modtager betragteligt, idet man kan undgå flere parallelle aktive kontakter.

Multikernefibre er den seneste trend i optisk kommunikationsforskning som en metode til at pakke mere data ind i en enkelt fiber – de flere kerner gør ikke fiberen større end en almindelig fiber, og data kan sendes uafhængigt i hver kerne.

I en almindelig standardfiber kan man transmittere omkring 100 Tbit/s (100.000 Gigabit/s), hvilket er demonstreret af andre grupper. I en multikernefiber er det vist, at man kan transmittere mere end 1 Petabit/s (1.000.000 Gigabit/s). Men til dette krævedes mange hundrede lasere. I vores eksperiment var vi interesserede i at se, hvor meget data vi kunne lægge på lyset fra en enkelt laser for dermed at reducere antallet af strømforbrugende komponenter.

Multikernefibre er et relativt nyt forskningsområde, men fibrene har allerede vist sig at være robuste til transmission. NTT har i samarbejde med bla. professor Toshio Morioka på DTU Fotonik vist, at man kan transmittere 1,01 Pbit/s i multikernefiber¹, og at afstandskapacitetsproduktet kan nå så store højder som 1 Exabit/s-km ved at transmittere 2 x 344 Tbit/s over 1.500 km multikernefiber (NTT, DTU). En Nyquist-kanal er en kanal, der ideelt set er rektangulært formet spektralt, så den i tidsdomænet ifølge Fourier transformation er sinc-funktionsformet. Hvis datasignalet f.eks. har en bitrate på 10 Gbit/s, altså sender en datapuls hver 100 ps, vil en Nyquist-kanal spektralt fylde ideelt set 10 GHz. Det betyder, at den tidslige form, sinc-funktionen, topper i midten af sin timeslot, men går i nul 100 ps senere, altså der, hvor dens nabo topper. Således vil alle datapulser have nabopulser rækkende ind over sin timeslot, men de vil gå i nul i midten, hvor den selv topper. Derfor vil der være nul interferens netop i midten, og datainformationen kan således ugeneret trækkes ud. Denne type datasignal, hvor dette princip til at pakke data så tæt som muligt anvendes, kaldes en Nyquist-kanal. Med et, ideelt set, spektralt rektangulært spektrum med bredde på præcis symbolraten (eller for et binært datasignal, databitraten), altså 10 GHz i dette tilfælde, kan man nu lægge flere bølgelængdekanaler helt tæt op ad hinanden og dermed opnå optimal spektral effektivtet. Dette kaldes et Nyquist WDM-signal. I praksis vil man dog ofte levne lidt plads mellem Nyquist WDM-kanalerne, da man ellers i praksis ikke vil kunne skille dem ad igen. Det vil sige, at den spektrale effektivitet altså i praksis aldrig er 1,00, men tættere på 0,8 til 0,9 for et sådant Nyquist WDM signal (binært). I sammenligning er et typisk WDM-signal med 10 Gbit/s kanaler ofte adskilt med 50 til 100 GHz og har altså en spektral effektivitet på 0,1 til 0,2.

Ved at lave et optisk tidsligt multiplekset (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) Nyquist-signal kan man lave en enkelt ultrahøj-bitrate Nyquist-kanal. Vi har lavet verdens hurtigste Nyquist-kanal på 1,28 Tbit/s (binær data) - og den fylder spektralt præcis 1.28 THz. Det vil sige, at den spektrale effektivitet er lig med 1,0. Hele de 1,28 THz er nemlig fuldstændigt fyldt op med data - der er ikke lagt lidt plads ind som i et Nyquist WDM-signal. Dette blev præsenteret for et år siden ved CLEO 2013 som et postdeadline paper. I vores CLEO 2014 postdeadline paper, lavede vi 320 Gbaud Nyquistkanaler, da disse er lidt mere robuste på nuværende tidspunkt end det ekstreme 1,28 Tbaud. Dette var ønskværdigt, da vi ville gå efter meget høj kapacitet, navnlig de 43 Tbit/s. Vi lavede nu 6 WDM kanaler a 320 Gbaud med præcis 320 GHz spektral bredde hver, og vi anbragte dem meget tæt op ad hinanden spektralt med kun 10 GHz gab imellem

1.28 Tbit/s Nyquist ch. 100km transmission



Figur 3: Nyquist Tbit/s kanal. Det røde rektangulære spektrum er præcis 1,28 THz bredt og bærer præcis 1,28 Tbit/s data, hvilket svarer til en optimal binær spektral effektivitet på 100 %. Da det er en enkelt kanal, er der ingen spektrale gab mellem dele af kanalen, dvs. intet spild.

dem. Dette svarer til en spektral effektivitet så høj som 0,97. Vi anvendte også quaternær modulation, hvilket fordobler antal bits per symbol, og vi anvendte polarisation multipleksning, hvor hvert symbol bruges i to polarisationer inden for den samme båndbredde. Dette resulterede i en faktor 4 forøgelse af bitraten på en 320 Gbaud symbolrate, hvilket vil sige, at vi opnåede 1,28 Tbit/s på hver Nyquist WDM-kanal, og fik en samlet spektral effektivitet på 3,88.

I et praktisk system vil lyset fra den enkelte laser splittes op i flere grene med hver sin datamodulator, hvor de separate individuelle datasignaler vil påtrykkes de enkelte lyspulser. Det vil foregå ved 10-40 Gbaud med QPSK, svarende til 20-80 Gbit/s. Dette er ikke anderledes end i WDM-systemer i dag. Men der vil stadig kun bruges en enkelt laser som lyskilde. Laseren, vi brugte, får forbedret sit spektrum til et superkontinuum via såkaldt selvfasemodulation i en ulineær optisk fiber. Dette princip er velkendt, og f.eks det danske firma NKT Photonics bruger dette princip til at lave hvidlyskilder². Konceptet er altså kommercielt robust – men dog ikke anvendt til telekom-applikationer endnu. I vores modtager bruger vi en ulineær optisk fiber til vores tidlinsesystem, som er fremstillet af OFS Denmark Aps³.

Da de fleste essentielle komponenter i denne 43 Tbit/s demonstration er kommercielle produkter, er det ikke urealistisk, at dette system kunne finde vej til fremtidige praktiske løsninger.

Demonstrationen af 43 Tbit/s data på lyset fra en enkelt laser er en verdensrekord. Aldrig før er så meget data lagt på lyset fra en enkelt laser, og resultatet vidner om, at der er enorme besparelsesmuligheder i optiske kommunikationssystemer ved denne nye teknologi. I stedet for flere hundrede enkeltlasere, kan man altså nøjes med en enkelt, og da hver laser skal bruge energi, kan man således reducere det samlede energiforbrug markant. Resultaterne vakte da også stor opsigt, og et længere radiointerview i BBC's videnskabsprogram Click blev også gennemført. Programmet kan høres fra vores hjemmeside^{4.}

Endvidere valgte websitet engineerjobs.com at placere resultatet på deres liste over de 20 største ingeniørbedrifter i 2014. Og som de skriver, svarer 43 Tbit/s til at downloade hele NetFlix's samlede filmbibliotek på 3,14 Petabyte på cirka 10 minutter ⁵.

Det er ikke første gang, forskergruppen på DTU Fotonik har slået rekorder, og på vores hjemmeside kan man læse flere historier om højhastighedskommunikation⁶.

Flere af disse forskningsresultater er blevet beskrevet i de populære medier ⁷.

- ¹ (http://ing.dk/artikel/dtu-professor-slar-rekord-senderen-petabit-i-sekundet-gennem-en-optisk-fiber-132652)
- ² http://nktphotonics.com/
- ³ http://www.ofs.dk/
- ⁴ http://www.fotonik.dtu.dk/english/-/media/Institutter/ Fotonik/Groups/HighSpeed/News/digitalp_ 20140826-2030a.ashx?la=da
- ⁵ http://www.engineerjobs.com/magazine/2014/ 20-greatest-engineering-feats-2014.htm?utm content=buffer455c4&utm_medium=social&utm_ source=twitter.com&utm_campaign=buffer
- ⁶ http://www.fotonik.dtu.dk/english/Research/ Communication-technologies/HighSpeed
- 7 http://web-files.ait.dtu.dk/mgal/Dissemination_to_public.htm

Nanofotoniske komponenter til fremtidens optiske chip

LARS HAGEDORN FRANDSEN, ALEXANDRA LUPI OG KRESTEN YVIND Nanofotoniske komponenter, DTU Fotonik

For at flytte information hen over en computerchip eller imellem forskellige computerchips bruger man i dag elektriske signaler og små integrerede metalledninger, som typisk er lavet af aluminium eller kobber. Det er velkendt, at computerchips i dag bliver hurtigere og hurtigere og skal behandle og flytte mere og mere data. På sigt kan de integrerede metalledninger ikke følge med til denne rivende udvikling og udgør i dag allerede flaskehalse i f.eks. kommunikationen imellem en computers centrale chip (CPU'en) og dens hukommelse (RAM).

I fremtiden vil problemerne kun blive værre og flere, eftersom elektronikindustrien snart har udtømt deres muligheder for at presse ydelsen af de små integrerede elektriske ledninger. Afløserne til de integrerede metalledninger kan dog - bogstaveligt talt - ligge lige om hjørnet, og vi udnytter dem allerede alle sammen, når vi i dag henter video fra en online TV-udbyder, laver et videoopkald via vores smartphone, laver en opdatering på vores foretrukne sociale platform eller går på jagt efter nyheder på vores smartphone/tablet. Afløserne for de elektriske ledninger er optiske fibre, som sender enorme mængder af datasignaler uden forsinkelser fra computer til computer og rundt omkring i verden via internettet. I dag bruges ultrahurtige optiske netværk også i vid udstrækning i kommunikationen imellem de dyre og gigantiske netværk af højtydende computere, der eksempelvis udgør Facebook, Googles søgemaskine og DMI's vejrsimulator. Eftersom optiske fibre ikke har de samme fundamentelle begrænsninger som elektriske ledninger, forsøger ingeniører og fysikere verden over i dag at kopiere principperne fra de optiske netværk og udnytte dem til at flytte og behandle data inde i selve computeren ved hjælp af små integrerede optiske lysledere og integrerede optiske kredsløb. Visionen er at opnå en chip, hvor elektronisk kommunikation (næsten) er erstattet af optisk, og hvor såkaldte optiske interkonnektorer også vil udgøre forbindelsesleddene imellem chippen og omverdenen. Hvis en sådan kombineret elektrisk og optisk chip bliver udviklet til en billig produktionspris, kan den blive hvermandseje og tillade, at også hjemmecomputere (og smartphones) kan kommunikere hurtigere imellem de interne dele. Dermed vil forøgelsen i computernes hastighed, som vi i dag tager for givet, kunne fortsætte, uden at energiforbruget, prisen og størrelsen eksploderer.

I gruppen for nanofotoniske komponenter på DTU Fotonik er forskere i fuld gang med at udvikle løsninger til fremtidens optiske interkonnektorer og integrerede optiske kredsløb. En vigtig komponent i den optiske interkonnektor er 'nanolaseren', der skaber lyset, som skal kodes med det elektriske datasignal. For bl.a. at kunne have mange lyskilder på én chip er det vigtigt, at nanolaseren er ultrakompakt med et arealforbrug i størrelsesordenen 10⁻¹³ m². Et gennemsnitligt menneskehår med et tværsnit på ca. 780*10⁻¹³ m² vil dermed kunne rumme ca. 780 nanolasere på dets tværsnit! Ud over den kompakte størrelse skal nanolaseren også have en høj effektivitet og gerne maksimalt bruge i omegnen af 10-15 J per databit, den udsender. Dermed vil nanolaseren til sammenligning kunne udsende et antal optiske signaler svarende til ca. 300.000 ikke-komprimerede



Figur 1: Farvelagte skannings elektron mikroskop billeder af nanolaseren, udviklet i gruppen for nanofotoniske komponenter. Til venstre ses den fotoniske krystalbølgeleder (rød), som er blevet nøje designet til at danne en laserkavitet (grøn), og som derved kontrollerer lysets udsendelse. Ydermere tillader krystalbølgelederens hullede struktur, at elektroner kan pumpes effektivt ind i laserkaviteten fra ledninger på siden og under kaviteten (gul) og sikrer også en god afledning af den genererede varme. Laseren er realiseret i en ca. 220 nm tyk indiumfosfid (InP) membran med to ca. 4 nm tynde kvantebrønde placeret i midten af membranen. Til højre ses et nærbillede af InP piedestalen (gul), som bølgelederkernen hviler på, og som udnyttes til effektivt at pumpe elektroner ind i laseren.



Figur 2: Optiske mikroskopbilleder af DTU Fotoniks nanolaser set fra oven. Til venstre ses de elektriske kontakter til nanolaseren som forholdsvis store og runde områder og de små delikate ledninger, som fører ned til forskellige dele af nanolaseren. Til højre ses nanolaseren i funktion, hvor der pumpes elektroner ind i laserkaviteten, som i dette tilfælde skaber lysudsendelse ud af papiret. Nanolaseren er her oplyst af en svag infrarød lyskilde for at guide forskerne under karakteriseringen, og derfor lyser kanter af laseren op.

Blue-Ray film (7.500 TB) ved brug af samme energi som en 60W pære bruger på 1 sekund! I centeret for 'Nanofotonik til terabit kommunikation (NATEC)' har forskerne for nylig demonstreret en nanolaser, som på sigt kan leve op til de strenge krav. Nanolaseren (se figur 1) er realiseret ved at udnytte en nøje designet og ultrakompakt fotonisk krystalbølgeleder, hvori forskerne har integreret såkaldte kvantebrønde, som er i stand meget effektivt at udsende lys, når de bliver pumpet med energi i form af lys eller elektroner. Forskerholdet er de første i verden til at udvikle og fabrikere et nanolaserdesign, der kombinerer kvantebrønde, de eksotiske egenskaber i den fotoniske krystalbølgeleder, og elektroner, der pumpes direkte ind i laserkaviteten fra en underliggende ledning. Dette er en unik kombination, som har taget forskerne en del år at udvikle. Kvantebrøndene sikrer en effektiv konvertering af elektroner til fotoner (lys), og den fotoniske krystalbølgeleder holder på lyset og giver en høj vekselvirkning med kvantebrøndene for at stimulere yderligere udsendelse af fotoner. Ydermere sikrer den underliggende ledning i form af en understøttende og ledende piedestal, at elektronerne 'afleveres' til kvantebrøndene direkte i midten af laserkaviteten, så chancen for, at hver enkelte elektron omdannes til én foton, øges og ikke går til spilde som varme. Potentielt set kan nanolaseren dermed skabe lys med en helt specifik bølgelængde med en meget høj hastighed (> 10 Gb/s) og ved brug af forsvindende lidt energi. I første omgang er nanolaserens funktionalitet blevet demonstreret ved at pumpe kvantebrøndene optisk og sende det genererede lys vertikalt op fra nanolaseren. Forskerne har dog nye design klar i skuffen, som i stedet skal koble lyset til en lysleder på chippen, så datasignalet kan blive ført videre til processering på chippen. Med elektrisk pumpning virker nanolaseren i øjeblikket 'kun' som en lysdiode (se figur 2), men ved en optimering af designet og fabrikationsprocessen forventer forskerne snarest at kunne realisere en nanolaser med elektrisk

pumpning af kvantebrøndene. Første generation af den elektrisk pumpede nanolaser vil være et stort skridt på vejen hen imod fremtidens optiske interkonnektorer og muliggør en løsning til at generere datasignaler 'on-chip'. For den optiske chip er det vigtigt også at have et effektivt og kompakt kredsløb af integrerede optiske komponenter, som kan varetage behandlingen og videreformidlingen af de datasignaler, nanolaseren genererer. Til at 'bundte' data i optiske netværk benytter man typisk såkaldt bølgelængde-multipleksing, hvor datasignalerne deles ud på forskellige datakanaler, og hvor hver kanal er kendetegnet ved deres unikke bølgelængde (se figur 3a). Dermed kan man transmittere data simultant, uden at de forstyrrer hinanden. Dog er antallet af tilgængelige datakanaler/bølgelængder begrænset, og med et stigende behov for at transportere mere og mere data er man ved at nå et kapacitetsloft for bølgelængde-multipleksing. Man er derfor begyndt at udnytte et nyt princip kaldet mode-multipleksing, hvor data bundtes med forskellige feltfordelinger i lyslederen (se figur 3b). Feltfordelingen og bølgelængden repræsenterer forskellige frihedsgrader for det elektromagnetiske felt og kan derfor kombineres frit med øget kapacitet som resultat.



Figur 3: Skematisk oversigt over forskellige optiske multipleksing principper. (a) Bølgelængde-multipleksing, hvor data samles fra fire til en bølgeleder med forskellige farver (bølgelængder). (b) Mode-multipleksing, hvor data bundtes i en lysleder med forskellige feltfordelinger (også kaldet modes). (c) Polarisationssplitter (-samler), hvor to ortogonale polarisationer kan splittes (samles), så datakapaciteten i princippet kan fordobles yderligere.

I 2015 har forskerne i gruppen for nanofotoniske komponenter også demonstreret eksempler på ultrakompakte og effektive, integrerede komponenter, som kan benyttes i mode-multipleksing til at behandle og videreformidle datasignaler på en chip, og som kan fremstilles ved brug af ren siliciumteknologi. Til dette har forskerne brugt en unik metode udviklet af DTU Mekanik kaldet topologioptimering til at designe og optimere komponenterne. Metoden har tidligere været benyttet til at designe mekaniske konstruktioner som f. eks. broer, bil- og flychassiser og er baseret på en invers og iterativ designstrategi, hvor et sæt foreskrevne regler (bæreevne/styrke eller som her, optisk transmission) bruges som mål til at designe en given konstruktion/ komponent. Metoden muliggør kompakte og optimale design med de givne ressourcer (f.eks. plads på chippen) og er ikke er bundet af geometriske regler, som typisk bruges i traditionelle designprocesser.

Mode-konverteren vist i figur 4a er et eksempel på en ultrakompakt og topologioptimeret komponent, som finder anvendelse inden for mode-multipleksing. Målet for komponenten er at konvertere et datasignal med en fundamental feltfordeling (rød) til et datasignal med en første-ordens feltfordeling (orange). Startdesignet er her 'frit' valgt med en størrelse på 3.4 μ m x 1.4 μ m (grøn) og er godt 4-5 gange mindre end en tilsvarende modekonverter, der er designet på traditionel vis. Efter at topologioptimeringen er udført, opnås designet som er vist i figur 4b. Metoden har tydeligvis fordelt materialet i den grønne boks på en kompleks måde for at opfylde det opsatte mål om mode-konvertering. Computersimuleringerne i figur 4 viser komponentens ydeevne før (figur 4c) og efter (figur 4d) optimeringen og viser tydeligt, at det optimerede design formår at lave konverteringen trods det ultrakompakte design, som til dato er verdens mindste integrerede mode-konverter realiseret i ren siliciumteknologi.

Integrerede optiske kredsløb realiseres af mange årsager oftest i materialer med et højt brydningsindeks, som typisk er 3-4 gange højere end brydningsindekset for luft. Det betyder, at lys i nanofotoniske kredsløb 'bindes' stærkt til bølgelederen og bliver meget følsomt over for bølgelederens dimensioner. Det betyder videre, at lys, hvis elektriske og magnetiske felter svinger forskelligt i rummet - med såkaldte forskellige polarisationer, vil opleve den selvsamme bølgeleder og integrerede komponenter forskelligt og have forskellige transmissionsvilkår i disse. Derfor er det nødvendigt at designe og benytte forskellige komponenter og bølgeledere til at behandle og transmittere datasignaler med forskellige polarisationer. Typisk deles polarisationerne op i to kategorier: en transvers elektrisk (TE) polarisation, hvor lysets elektriske - og kun de elektriske - feltlinjer svinger i planet, og tilsvarende den transvers magnetisk (TM) polarisation, hvor de magnetiske - og kun de magnetiske - feltlinjer svinger i planet. En vigtig komponent til at varetage denne polarisations afhængighed er en polarisationssplitter, som kan splitte de to TE og TM polarisationer til hver deres bølgeleder (se figur 3c). I teorien kan man også udnytte polarisations-multipleksing til at fordoble kapaciteten i et system, men i praksis er dette dog til dato noget vanskeligt at udnytte på en chip.



Figur 4: Topologioptimeret mode-omformer. (a) Startdesignet med en størrelse på 3.4 µm x 1.4 µm (grøn) til optimering, hvor det indkomne datasignal (rød) med en Gaussisk feltfordeling ønskes konverteret til den første højere-ordens mode (orange). (b) Det topologioptimerede design. Computersimulering, som viser komponentens ydeevne før (c) og efter (d) topologioptimeringen.



Figur 5: Polarisationssplitter (/-samler) som kan splitte (samle) to ortogonale polarisationer i et integreret kredsløb. (a) Startdesignet med en størrelse på 2.8 µm x 1.8 µm (grøn) til optimering, hvor det indkomne transvers elektriske (blå) og transvers magnetiske (rød) datasignal ønskes dirigeret til henholdsvis den øverste og nederste udgangsport. (b) Den topologioptimerede struktur, som splitter de to ortogonale datasignaler til de to forskellige udgangsporte. Beregnede transmissionsmønstre gennem den optimerede komponent for det transvers elektriske signal (c) og det transvers magnetiske signal (d).

I 2015 har nanofotonik-forskerne også med succes anvendt topologioptimering til at realisere en integreret polarisationssplitter. Figur 5a viser igen udgangspunktet for optimeringen, hvor den grønne boks på 2.8 μm x 1.8 μm angiver komponentens størrelse. I dette tilfælde ønskes datasignalet med TE/TM polarisation sendt til henholdsvis den øvre/nedre udgangsport. Den topologioptimerede struktur vist i figur 5b har igen tilegnet sig et spektakulært design, men ses at udføre opgaven, idet det TE polariserede datasignal (figur 5c) tydeligt sendes til den øvre udgangsport, mens det TM polariserede datasignal (figur 5d) transmitteres til den nedre port. Ydermere udføres opsplitningen af de polariserede datasignaler over et stort bølgelængdeområde og med et lavt transmissionstab, som gør polarisationssplitteren til en af de bedst ydende og mest kompakte, der er realiseret til dato.

Gruppen for nanofotoniske komponenter har i 2015 blandt andet deltaget aktivt i de to store forskningscentre på DTU Fotonik 'Nanofotonik til terabit kommunikation II (NATEC II)' samt 'Silicon photonics for optical communications (SPOC)' og har bidraget med deres kompetencer inden for design, fabrikation og karakterisering af forskellige integrerede optiske komponenter. Gennem disse centre vil gruppen fortsat i det kommende år give deres bidrag til og bud på nanofotoniske komponenter til fremtidens optiske chip.

LANGSOMT LYS kan gøre fotoniske kredsløb hurtigere

≣ JESPER MØRK, Teori og signalprocessering, DTU Fotonik

Ved at anvende optiske nanostrukturer er det muligt at nedsætte den hastighed, hvormed en lysstråle passerer gennem et materiale. Dette betyder, at lyset vekselvirker mere effektivt med materialet og kan anvendes til at kontrollere lysstrålen, for eksempel slukke for den, dirigere den et andet sted hen eller gøre den kraftigere. Disse basale funktioner kan danne basis for integrerede fotoniske chips (kredsløb), hvor lyspartikler – fotoner – udfører nogle af de opgaver, som elektroner klarer i dag i integrerede elektroniske chips. Derved åbnes der mulighed for at konstruere meget hurtigere chips og imødekomme informationssamfundets tilsyneladende umættelige krav på data og datahastighed. I denne artikel beskrives den grundlæggende fysik, som gør, at langsomt lys kan give os et hurtigere internet.

Fra Ole Rømer til Lene Hau

Det var den danske videnskabsmand Ole Rømer, der som den første bemærkede lysets "træghed": Ved at betragte skyggevirkningen af en af planeten Jupiters måner konkluderede han, at lysets hastighed er endelig. I dag ved vi, at lyset i vakuum bevæger sig med en hastighed på c ≅ 300.000.000 meter i sekundet, svarende til at det på 3,3 nanosekunder (0,000000033 sekunder) bevæger sig 1 meter. I materialer bevæger lyset sig lidt langsommere. I almindeligt vinduesglas er lyshastigheden således $v_{glas} = c/n_{glas}$, hvor det såkaldte brydningsindeks for glas, n_{glas} , er ca. 1,5. Imidlertid har man for nylig opdaget, at det under visse omstændigheder er muligt at nedsætte lyshastigheden i et materiale ganske betydeligt. Således viste Lene Hau [Hau et al., Nature, vol. 397, pp. 594 (1999)], at en lyspuls, der udbreder sig gennem en gas af kolde atomer, kan bremses op, så hastigheden bliver sammenlignelig med en (god) cykelrytter, nemlig v_{glas} =

17 meter i sekundet (≅ 61 km i timen). Siden da har der været en verdensomspændende forskningsindsats for at forstå fysikken bag langsomt lys samt undersøge mulige praktiske anvendelser.

Langsomt lys i "hullede" materialer

På DTU Fotonik interesserer vi os specielt for langsomt lys i såkaldte fotoniske krystaller, se figur 1. En fotonisk krystal består af et materiale, som er gennemboret med ganske små huller, der sidder i et ganske bestemt mønster. Vælger man det rette mønster, bliver det umuligt for lyset at udbrede sig i området med huller. Den effekt, der udnyttes, er, at lys er bølger, og hvis man lægger to bølger sammen, således at toppen af den ene overlapper med minimum af den anden, vil de udslukke hinanden (destruktiv interferens). Afstanden mellem hullerne i den fotoniske krystal er netop valgt således, at lyset kastes



tilbage, hvis det prøver at udbrede sig i det "hullede" område, idet lyset udslukker sig selv. Dette kan man udnytte til at konstruere en meget effektiv vejbane, bølgeleder, for lyset ved at fjerne en række af huller. Da lyset ikke kan udbrede sig i det "hullede" område, er det tvunget til at følge bølgelederen – som derved også kan guide lyset omkring et hjørne. Der findes mange andre måder at guide lys på, for eksempel i hårtynde optiske fibre, som udgør motorvejene i internettet og omspænder vores klode. Hvad der er specielt ved en såkaldt fotonisk krystalbølgeleder er imidlertid, at lyset ikke bare bliver guidet, men det udbreder sig også med en hastighed, som

Figur 1: En fotonisk krystalmembran består af et tyndt lag af halvleder, hvori der er boret ganske små huller ved hjælp af en elektronstrålekanon. Gitteret af huller er valgt således, at lys med en bølgelængde på 1,5 mikrometer ikke kan udbrede sig. I midten af halvlederen er der indlejret et aktivt materiale, for eksempel kvantepunkter. I illustrationen til højre er en række huller udeladt, hvormed der skabes en bølgeleder, hvor lyset er tvunget til at bevæge sig. Samtidig nedsættes hastigheden af lyset væsentligt. 1 nm (nanometer) = 0,000000001 m.

er væsentligt lavere end i almindelige materialer. Den fysiske årsag til dette er, at lyset stadig spredes frem og tilbage af de huller, der er i kanten af bølgelederen, svarende til, at lyset tager to skridt frem og et tilbage, to skridt frem og et tilbage osv. og dermed bevæger sig i en langsomt fremadskridende zigzagbevægelse.



Figur 2: Figuren øverst illustrerer stimuleret emission: En foton rammer et atom, som er exciteret til en højere energitilstand, hvorved atomet udsender den overskydende energi i form af en ny foton, som er en eksakt kopi af den indkommende foton. Hvis lysstrålen bevæger sig gennem et materiale med exciterede atomer, kan det forstærkes i en lavineproces. Illustrationen nedenunder er for et almindeligt materiale med atomer, mens figuren nederst viser effekten af langsomt lys: Hvis lyset bevæger sig langsommere, vekselvirker det mere effektivt med atomerne, og den stimulerede emissionsproces foregår oftere.

Langsomt lys skaber et nært venskab mellem atomer og fotoner

Som illustreret i figur 1 kan materialet i midten af membranen ændres. For eksempel kan der her indlejres et materiale, som kan forstærke lyset. Denne proces er illustreret i figur 2. Hvis et atom tilføres ekstra energi, kan det eksistere i en såkaldt exciteret, ustabil tilstand, hvor der er elektroner, som har en ekstra energi. Hvis man lyser på et sådant atom, kan atomet henfalde til sin naturlige tilstand, men under udsendelse af den overskydende energi som lys. Denne proces kaldes stimuleret emission og er illustreret ved, at en lyspartikel - en foton - rammer atomet og får det til at udsende en ny foton, som er fuldstændig identisk med den oprindelige. Hvis lyset passerer gennem et materiale med mange atomer, kan styrken øges eksplosivt i en lavineeffekt: Den første foton leder til 2 fotoner, som leder til 4 fotoner, som leder til 8 fotoner osv. Denne effekt benyttes til at realisere optiske forstærkere, som sørger for, at data, der transmitteres rundt i internettet, ikke "dør ud", før de når frem til modtageren. Det er også stimuleret emission, der anvendes i lasere, som genererer de datapulser (bits), der transporteres rundt i internettet.

Så hvor kommer det langsomme lys ind? I udgangspunktet vekselvirker en lysstråle ikke særlig kraftigt med et enkelt atom, idet atomet er af en størrelsesorden på nogle få nanometer, mens lysbølgelængden er af en størrelseordenen på 1 mikrometer (0,000001 m), altså tusind gange større. De optiske (fiber)forstærkere, der benyttes i internettet, er derfor mange meter lange. Hvis lyset udbreder sig langsomt forbi et atom, får fotonerne og elektronerne imidlertid meget længere tid til at "tale sammen", og dermed kan sandsynligheden for, at atomet udsender lys ved en stimuleret emissionsproces, øges mange gange. Som vi har demonstreret eksperimentelt¹, muliggør dette en meget stor forstærkning i selv en ganske lille komponent. Der åbnes derved mulighed for, at der kan realiseres optiske forstærkere, der er så små, at de kan integreres på en lille chip. Dette er en vigtig funktionalitet, hvis man ønsker at realisere såkaldte fotoniske chips, hvor der benyttes fotoner i stedet for elektroner til at behandle data.

Hvorfor benytte fotoner i stedet for elektroner?

Det er opfindelsen af transistoren og integrerede elektroniske kredsløb, som har muliggjort de PC'ere, tablets, mobiltelefoner osv., som er en så integreret del af vores arbejdsliv og fritidsliv i informationssamfundet. Men uden optiske fibre og fotoner til at transportere data ville det ikke have været muligt at realisere det globale internet. Lige så snart datahastigheden eller afstanden bliver stor, omformes det elektriske signal til et optisk signal bestående af lyspulser, som sendes gennem det optiske fibernet og igen omdannes til elektriske signaler. I informationssamfundet er der således opstået en "arbejdsdeling" mellem elektroner og fotoner: Elektroner benyttes til at manipulere/processere data, og fotoner benyttes til at transportere data. Omformningen mellem elektroner og fotoner, som sker i lasere (fra elektroner til fotoner) og fotodetektorer (fra fotoner til elektroner), begrænser imidlertid ofte den hastighed, hvormed data kan behandles eller "downloades". Der er derfor en stor interesse i at rykke "arbejdsdelingen" lidt. Hvis vi kunne benytte fotoner til simple former for databehandling, ville det kunne øge internettets hastighed væsentligt. Og her kommer langsomt lys ind. I modsætning til elektroner, vekselvirker fotoner ikke direkte med hinanden. To lysstråler kan passere igennem hinanden, uden at de påvirkes, og det er derfor, de er så gode til at transportere data. Men hvis lyset udbreder sig langsomt i et materiale, kan det vekselvirke meget effektivt med atomerne i dette materiale således som illustreret ovenfor i forbindelse med optisk forstærkning. På lignende vis kan to lysstråler - måske - bringes til at vekselvirke effektivt med hinanden, hvis de begge "taler" med de samme atomer. Hvis man ad denne vej kunne realisere en ultrahurtig optisk transistor, hvor én lysstråle effektivt kontrollerer en anden, ville det lede til en helt ny generation af fotoniske chips og åbne mulighed for en række spændende nye anvendelser.

Konkluderende kan det siges, at langsomt lys er en fascinerende fysisk effekt, som udfordrer vores måde at beskrive og tænke på lys. Nye udviklinger inden for nanofabrikation har gjort det muligt at fremstille fotoniske krystalstrukturer – hullede materialer – hvori vi kan nedsætte lyshastigheden og øge vekselvirkningen med lys og materiale. Det er allerede demonstreret, at dette kan udnyttes til at fremstille ultrakorte optiske forstærkere, som kan indgå i fotoniske kredsløb, og mange andre anvendelser synes mulige.



DTU Fotonik Institut for Fotonik

Danmarks Tekniske Universitet Ørsteds Plads Building 343 2800 Kgs. Lyngby

