

Topologi-optimerede komponenter til lysdrevne computere

Louise Floor Frellsen

Mit ph.d.-projekt gik ud på at udvikle optiske mikro-komponenter til fremtidens computere, som man ønsker drevet via lys i stedet for elektroner. En computer drevet af lys, vil være hurtigere og mere energibesparende – og dermed mere miljøvenlig – end den elektroniske computer.

Der er mange, der forsker i integrerede fotoniske kredsløb, som de kaldes. Det særlige i mit ph.d.-projekt var den metode, vi brugte til at designe optiske komponenter. Den tillod os at gå til opgaven på en ny og ”bagvendt” måde, og tillod os at designe komponenter, som er mere kompakte, end hvad andre hidtil har kunnet demonstrere.

Hvorfor lys?

Nutidens computere fungerer glimrende ved brug af elektricitet, men der er tre gode grunde til, at vi også gerne vil bruge lys:

Elektronikkens begrænsninger

For 50 år siden var computere nogle store skruller, der kunne fylde hele bygninger. Takket være den teknologiske udvikling, kan computere i dag være så kompakte, at vi alle kan gå rundt med en i lommen. Denne udvikling skyldes, at de elektroniske komponenter er blevet ganske små. Det er en fantastisk bedrift, der er gået rivende hurtigt. Desværre kan udviklingen snart ikke fortsætte længere uden hjælp fra anden teknologi. Med elektronik løber man ind i to helt fundamentale problemer. Først og fremmest afgiver de utallige elektroniske komponenter alle sammen varme. Computerkredsløbet kan blive så varmt, at elektronernes veje (metallederne) smelter. Det andet problem er, at komponenterne er blevet så små, at de begynder at udvise kvanteeffekter. Det betyder for kredsløbene, at man ikke længere kan kontrollere, hvor og hvordan strømmen løber.

Så hvis vores computere skal blive hurtigere og bedre, er man nødt til at finde på noget nyt. Det er ikke meningen, at vi helt skal holde op med at bruge al den elektronik, der er udviklet igennem tiden. Visionen er få elektronik og fotonik til at arbejde sammen på én computerchip.

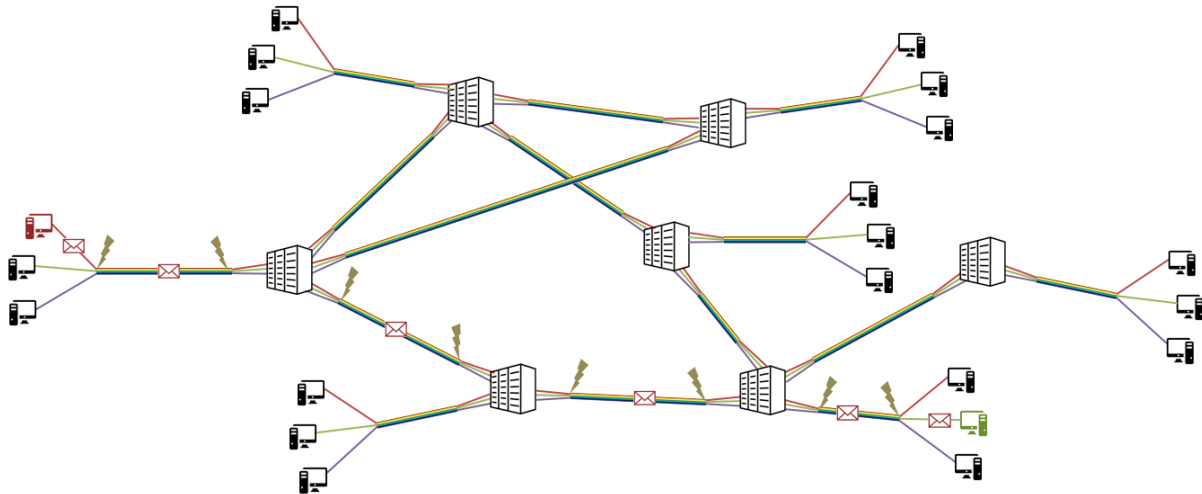
Øget hastighed

At sende data-signaler med lys i stedet for elektroner kan også få computere til at arbejde hurtigere. Fundamentalt set er lyset (der kommunikerer med fotoner) hurtigere end elektronikken (der kommunikerer med elektroner). Faktisk er der intet i universet, der kan bevæge sig hurtigere end lys! Så hvis man gerne vil have hurtigt internet, er det oplagt at bruge lys. Det gør man faktisk allerede – til dels. Selvom computere i dag primært indeholder elektronik, så sendes data via lys i optiske fibre, når det skal over lange afstande. Det leder os dog direkte til det næste problem i nutidens datanet, nemlig vores energiforbrug.

Mindre energikrævende

Det koster energi at lave data om fra elektroner til lys og tilbage igen. I nutidens internet er man nødt til at gøre det mange gange, når datasignalerne skal dirigeres den rigtige vej. Et eksempel er skitseret i figur 1 nedenfor, hvor vi følger en e-mails rejse gennem internettet. Meget groft sagt: Du skriver mailen med elektriske signaler. Du sender den afsted, og den bliver omdannet til lyssignaler, så den kan rejse gennem et verdensomspændende net af optiske fiberkabler. På sin vej vil ”den optiske mail” rejse igennem mange knudepunkter kaldet datacentre. Her mødes en masse optiske fibre, og mailen dirigeres i den rigtige retning. Hjernen i datacentrene udgøres i dag af normale elektroniske computere, så for at adressen på mailen kan læses, skal den optiske mail laves om til elektroner igen. Når den rigtige retning er fundet, bliver mailen endnu en gang konverteret til lyssignaler og sendt videre igennem endnu en optisk fiber. Den konverteringsproces sker flere gange i løbet af rejsen, før mailen kommer frem til det datacenter, der har et kabel, som går ud til modtageren. Her skal mailen laves om til elektroner en sidste gang, for at modtagerens computer kan læse den.

Hver eneste konvertering mellem elektroner og lys koster energi. Nok er der tale om en forsvindende lille mængde i forhold til for eksempel energiforbruget af biler på "de rigtige" veje; men der er langt mere trafik på internettet end på vejene. Tænk bare på alle de billeder og videoer vi optager og deler med hinanden, eller hvordan vi bruger Netflix til at se fjernsyn via internettet. På sigt kan man derfor spare enorme mængder energi, hvis lyssignalerne ikke behøver at blive lavet om til elektroner hele tiden.



Figur 1 Skitse over en e-mails rejse igennem internettet, som den sendes af sted fra den røde computer til venstre, til den grønne computer i bunden til højre. Enkeltfarvede kabler arbejder med elektroner, mens de tykke flerfarvede er optiske fibre. Mailen konverteres i alle de knudepunkter, hvor der er markeret med lyn.

Hvad skal chippen?

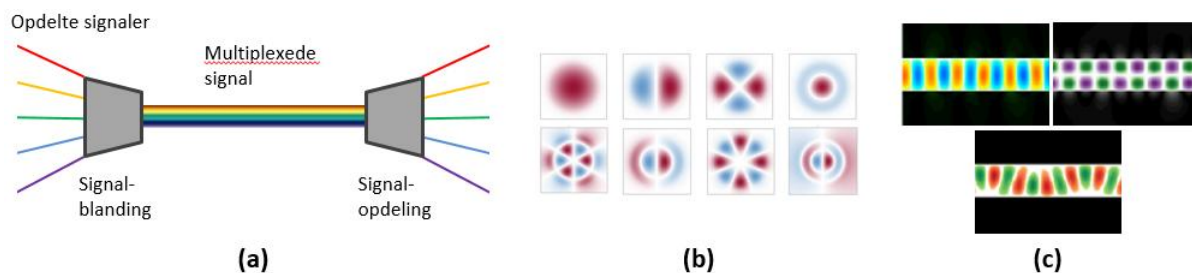
Det er et komplekst arbejde at lave systemer, der kan håndtere lys i computere, og det er bestemt ikke noget, der kan nås i løbet af et enkelt ph.d.-projekt. Mit arbejde fokuserede derfor på at optimere og fremstille nogle bestemte elementer af kredsløbet, som sidenhen kan sættes sammen med andre komponenter. Det jeg designede, skal bruges til at håndtere og dirigere mange datasignaler på én gang.

Multiplexing

Multiplexing (MUX) betyder, at man blander flere forskellige signaler i den samme kanal for at kunne sende dem af sted samtidig. For at det kan lade sig gøre, skal signalerne være forskelligartede, så man kan skelne imellem dem. I optiske fibre bruger man ofte bølglængde-MUX, hvor datasignalerne har hver deres farve (se figure 2(a)).

Man kan meget simplificeret sammenligne optiske MUX-signaler med morsekode, hvor man sender sin besked afsted som lysblink: Hvis man bruger to lommelygter med forskellige farver, kan man sende to beskeder på én gang. I en optisk fiber har man bare det problem, at lyssignalerne blive blandet. Det er derfor nødvendigt, at man har et værktøj, der både kan blande og splitte lyset ad igen. Det var den type komponenter min ph.d. gik ud på at lave.

Bølglængde-MUX er bare én måde, hvorpå man kan blande lyssignaler. En anden variant, som jeg arbejdede meget med, er *mode*-MUX. En optisk *mode* beskriver, hvordan et lyssignals energi er fordelt rummeligt i en kanal, som vist i et par eksempler i figur 2(b). Princippet bag mode-MUX er det samme som med at blande farve; hér blander man bare lys med forskellige rummelige mønstre (figur 2(c)).



Figur 2 (a) Skitsering af multiplexing-konceptet. (b) Illustrationer af forskellige rummelige fordelinger af lys (modes) set i tværsnittet af en fiber. (c) Simulering af henholdsvis 0. mode (blå+rød) og 1. mode (lilla+grøn) i en siliciumbølgeleder (hvid), samt hvordan det ser ud, når de to bliver blandet (rød+grøn).

Hvordan får vi chippen til at gøre det?

Det særlige ved mit projekt var metoden topologi-optimering (TopOpt), som vi brugte til at designe de fotoniske komponenter. For at sætte tingene lidt i perspektiv, ser vi først på, hvordan man normalt designer fotoniske komponenter og derefter på, hvad det er, man kan med TopOpt.

Konventionelt design

Når man normalt designer et fotonisk kredsløb, ser man først på, hvilke parametre man kan justere på. Det er som regel komponentens dimensioner og form. Derefter begynder man groft sagt at prøve sig frem. Dette kræver i sagens natur en masse beregninger, det tager tid, og det er begrænset af de parametre, man har valgt at kigge på. Det vil sige, at man ikke nødvendigvis ender med et optimalt design.

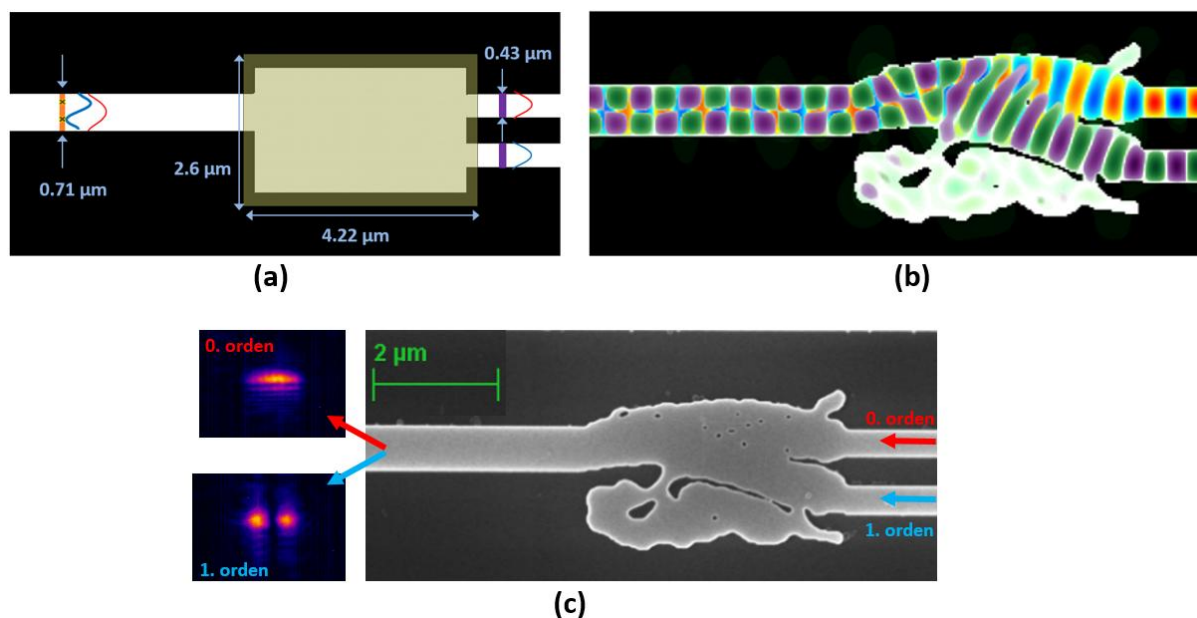
For at bruge et hverdageksempel er det lidt, som hvis man skal bage en kage uden en opskrift og må prøve sig frem. Vi ved godt, at mel ville være en god ingrediens, men at sennep ville være en dårlig idé. Så mængden af mel er altså en parameter, vi kan ændre på. Vi ved nok også, hvor meget mel vi omtrentligt skal bruge: det kunne godt være 400 gram, men i hvert flad ikke 400 kilogram. Hvis kagen skal blive, som vi har ønsket os, ved vi dog ikke, om det ville være bedst med 350 gram eller 450 gram. Uden en hel præcis opskrift, har vi ikke en chance for at lave den perfekte kage, før vi har bagt mange og sammenlignet dem. For at gøre det hele værre, så afhænger mængden af mel, vi skal bruge også af, hvor mange æg vi putter i og så videre. Så der skal bages rigtig mange kager, før vi finder den perfekte opskrift. Når man designer fotoniske komponenter, er processen i grove træk den samme. Parametrene er selvfølgelig anderledes, og antallet kan være så stort, at "trial-and-error"-fremgangsmåden er både dyr og tidskrævende.

Topologi-optimering: kunsten at designe baglæns

I mit projekt designede jeg fotoniske komponenter ved brug af TopOpt. Det er en invers designmetode, hvilket vil sige, at man designer "baglæns". I metoden fokuserer vi på, hvad vi gerne vil have komponenten til at gøre i stedet for hvilke design parametre, der kan ændres på.

Det kan for eksempel være, at vi gerne vil MUXe to forskellige optiske signaler (markeret med rød og blå) fra bølgelederne til højre i figur 3(a) ned i den bredere optiske bølgeleder til venstre i figuren. Det ene optiske signal (rød) skal ikke ændre mode, mens det andet signal (blå) skal konverteres. Som skitseret i figuren kan vi fortælle TopOpt-metoden, at den må omstrukturere designet inden for den gule kasse, men vi definerer intet om, hvordan det skal se ud. I stedet fortæller vi programmet, hvad resultatet skal være – at signalet skal spilttes med så lidt tab som muligt. Så begynder TopOpt-programmet at finde ud af, hvordan materialet skal være fordelt, for at vi får det bedste resultat. Det gør den ved at lave beregninger løbende. Det er altså resultatet, der er den parameter, vi ændrer på i stedet for formen af komponenten. Det der gør metoden så effektiv er, at den ikke er begrænset af fastsatte former og størrelser. Vi får nogle besynderlige resultater med huller og knaster, som vi som designere aldrig selv ville have gættet på. Det er fidusen ved det hele: Når vi ikke er begrænset af vores

fantasi eller forventninger om lige linjer, cirkler eller firkanter, kan vi opnå de ønskede egenskaber på mindre plads, end man ellers kan.



Figur 3 (a) Billede af input som gives til topologioptimeringsprogrammet. Designet laves i det firkantede gule område. Inputtet er lys blandet af to forskellige modes, det er markeret med en orange bar til venstre. De lilla markører til højre er dér, hvor det angives, hvordan lyset skal opføre sig. **(b)** Illustration af det endelige topologioptimerede design vist sammen med en simulation af lysets bevægelse igennem det. **(c)** Elektron-mikroskopbillede af det fabrikerede design samt målinger (til venstre) af lysets opførsel alt efter, hvilken bølgeleder det rejser igennem.

En iterativ proces – at have det bedste udgangspunkt

Når nu vi har en TopOpt, kan man spørge sig selv, hvorfor der overhovedet var brug for en ph.d.-studerende i projektet. Til dels var mit arbejde at fremstille strukturerne i rentrummet og måle på dem i laboratoriet. Den anden – og større – del var, at nogen skal fortælle TopOpt-programmet, hvad det skal gøre. Det handler både om at få ideerne til komponenter og om at formulere kravene til dem rigtigt. Programmet kan trods alt kun arbejde inden for de rammer, vi giver det.

Vi vender tilbage til kageeksemplet: Jeg kunne bede programmet om en opskrift på en brun kage. Jeg bager den og får en lækker kanelkage, men det jeg gerne ville have haft var en chokoladekage. Så i stedet for at lade programmet vælge helt frit, burde jeg have krævet, at kakao var en parameter.

De optiske komponenter vi lavede skulle være meget små, men bliver de for små, er det umuligt at fremstille dem. Vi må derfor guide programmet i den rigtige retning for at finde det bedste kompromis imellem funktionalitet og størrelse.

TopOpt tillader at lave designs, vi ellers aldrig kunne have opnået, men det er stadig en iterativ proces, der kræver menneskeligt input. I løbet af mit projekt lykkedes det at finde de rigtige inputs til mange forskellige komponenter. Jeg fik lavet flere designs, som blev fabrikeret og målt på, og som efterviste TopOpt's styrker indenfor design af fotoniske komponenter.