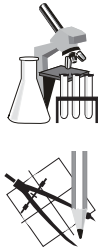


# Nanofotonik kaster lys over fremtiden

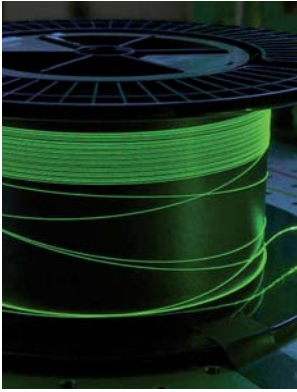


Per Lunnemann Hansen, Mads Lykke Andersen, Mike van der Poel, Jesper Mørk,  
Institut for Fotonik

Nye opdagelser inden for fysik og nanoteknologi gør det muligt at erstatte elektricitet med lys. Mikrochips med fotoniske krystaller, der leder lyset rundt i kredsløbene, og informationen gemt som lyspartikler er nogle af de opfindelser, der kan gøre fremtidens computere endnu hurtigere og mindre. Nanofotonik er et nyt og fremstormende forskningsområde, hvor de nyeste forskningsresultater inden for fundamental fysik bruges til at afkorte ventetiden foran pc'en, udvikle nye kræftbehandlinger og lave ubrydelige koder til dit dankort.

Endnu er elektricitet den altafgørende forudsætning for hele vores moderne informations-samfund. Computere, mobiltelefoner og al anden elektronik er bygget op omkring elektroniske mikrochips. Hver dag overfører vi enorme mængder data elektronisk, og der er et konstant krav om, at overførslen skal gå hurtigere og hurtigere. Men der er en grænse for, hvor hurtigt elektronikken kan arbejde. Elektronerne er simpelthen for langsomme. Når det skal gå rigtig stærkt, er fotoner langt mere anvendelige. Nye fremskridt inden for nanoteknologi og nanovidenskab giver forskere helt nye muligheder for at manipulere fotoner og åbner nye og spændende perspektiver inden for blandt andet informationsteknologi, telekommunikation og lægevidenskaben.

Elektronen er den partikel, som bærer strøm og er dermed grundlaget for al elektronik. Tilsvarende er fotonen den partikel, som lys består af, og *fotonik* er den forskningsdisciplin og samtidig det anvendelsesområde, der beskæftiger sig med lys. Når du surfer på internettet, bliver informationen sendt som laserlyspulser gennem hårtynde optiske fibre. Det er et eksempel på fotonik. Men når informationen skal bearbejdes og gemmes på din computer, bruger den elektroner. Vi sender altså informationer af sted med lys (*fotoner*), men bearbejder den med strøm (elektroner) (*figur 1*). Årsagen til den arbejdsfordeling skal findes i fotoner og elektroners grundlæggende egenskaber – elektroner tilhører den type partikler, som kaldes *fermioner* og som vekselvirker kraftigt med hinanden, mens fotoner er *bosoner*, som vekselvirker svagt. Det betyder blandt andet, at meget af strøm-



men går tabt som varme i computerens kredsløb, eller når vi sender den gennem ledninger over lange afstande, mens lyset bevares langt bedre, fordi det næsten ikke vekselvirker med de optiske fibre, som det løber igennem.

*Figur 1. Information sendes i dag over internettet gennem optiske fibre, men når signalerne skal behandles, er vi stadigvæk nødt til at konvertere dem til elektroniske signaler.*

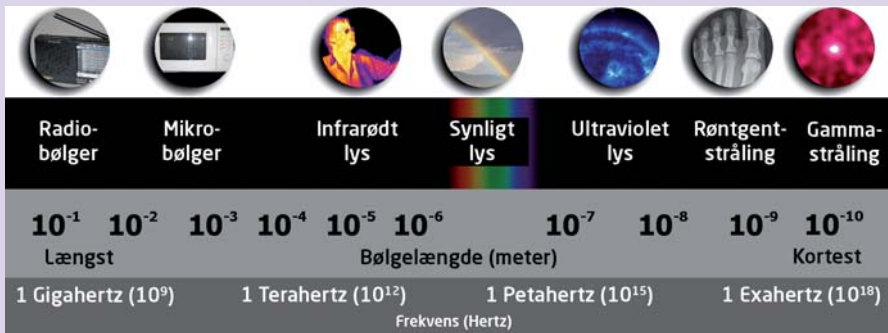
Vi er i disse år vidner til en voldsom udvidelse af fotonikkens anvendelsesområde. Udviklingen inden for nanoteknologi har givet ingeniører helt nye muligheder for at manipulere og designe materialer og strukturer på atomar skala. Ved at udnytte grundlæggende fysiske fænomener fra *kvantemekanikken* kan der fremstilles komponenter, hvor materialets struktur på nanometerskala er afgørende for funktionen. Inden for fotonikken betegnes dette forsknings- og anvendelsesområde som *nanofotonik*. Et eksempel er de lasere, som bruges til at lave det infrarøde lys i lyslederkablerne. Det materiale, som danner og forstærker lyset, er en få nanometer tyk skive, der ligger som fyldet i en sandwich mellem to andre materialer. Det er helt afgørende for laserens funktion, at 'fyldet' har den rigtige tykkelse. Er den bare en nanometer for tyk eller tynd, forringes laserens egenskaber mærkbart. Det er den særlige nanostruktur, der skaber en særdeles effektiv laser. Nanofotonik er et område, som i disse år skaber mange nye og spændende forskningsresultater – lige fra meget fundamentale resultater som for eksempel langsomt lys til mere jordnære, men meget vigtige anvendelser, såsom meget hurtigere internet og computere, 3D-film, energibesparende lysdioder og nye medicinske behandlinger. Danmark har en stærk tradition inden for fotonik, og da grundlaget for den teknologiske udvikling ligger i vores evne til at forstå og kontrollere, hvad der foregår på nanometerskala, er der et stort behov for forskere og udviklingsingeniører med interesse for fysik.

I dette kapitel giver vi en introduktion til nanofotonik med vægt på de grundlæggende muligheder og problemstillinger samt eksempler på de forskningsemner, vi beskæftiger os med ved Institut for Fotonik på DTU.

### **Boks 1. Lys: Bølger eller partikler?**

Lys er *elektromagnetisk stråling* og er som sådan ikke anderledes end radiobølger og røntgenstråling. Hvilken type stråling, der er tale om, afhænger af det elektriske felts svingningstid. Forskellige svingningstider giver forskellige bølgelængder. Svingningerne med de længste bølgelængder kaldes radiobølger, herefter følger mikrobølger, infrarøde bølger, synligt lys, ultraviolette bølger og til sidst røntgen- og gammastråling (*figur 2*). Elektromagnetisk stråling består af fotoner, lidt på samme måde som stof

består af atomer. Fotonen er en svær størrelse at beskrive med udtryk kendt fra hverdagen, og det var først med kvantemekanikken, man fik styr på den grundlæggende teori om lys. Niels Bohr og Albert Einstein (*figur 3*) førte lange diskussioner om fotonernes besynderlige opførsel. Fotoner udviser nemlig partikel-bølge dobbelthed, det vil sige, at de nogle gange kun kan forstås ved, at man betragter dem som partikler, andre gange kun ved at man betragter dem som bølger.



Figur 2. Det elektromagnetiske spektrum. Synligt lys er elektromagnetiske svingninger med en karakteristisk bølgelængde fra 400 nm (violet) til 700 nm (rød).



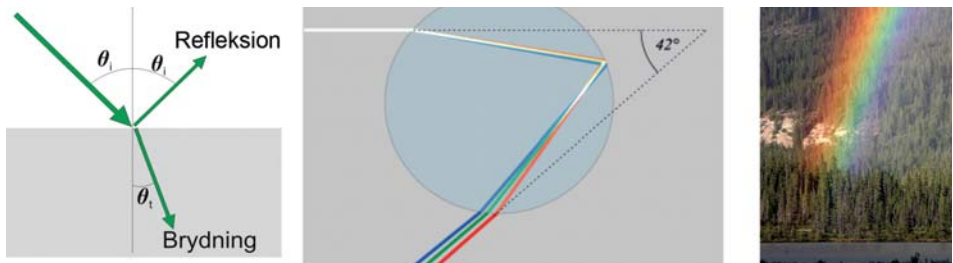
Figur 3. Einstein og Bohr førte lange samtaler om paradokset ved elektronens bølge- og partikelnatur.

## En verden i farver

Optiske fænomener er overalt omkring os, og alt, hvad vi ser, skyldes i sidste instans, at lyspartikler rammer nethinden i vores øje. Lysets forskellige bølgelængder giver verden farver, og fremkommer igennem et væld af processer, når lys og stof mødes og påvirker hinanden. Når du ser en regnbue på himlen, skyldes det, at de forskellige bølgelængder i solens lys brydes forskelligt i hver enkelt vanddråbe i luften (*figur 4*). Himlens blå farve kommer fra den såkaldte Rayleigh-spredning af sollyset, når det rammer molekyler i atmosfæren. Solen udsender lys i alle farver, men molekylerne i atmosfæren spreder de korte blå bølgelængder mest, hvorfor himlen virker blå, når man kigger alle andre steder hen end på Solen. Paradoksalt nok er det det samme fysiske fænomen, som giver solnedgangen sin røde farve. Ved solnedgang står Solen lige over horisonten, og sollysets vej gennem atmosfæren og hen til vores øjne er meget længere end midt på dagen. Derfor er det kun de lange, røde bølgelængder, der slipper hele vejen igennem. Lys med kortere

bølgelængder bliver spredt på de mange molekyler, lyset fra solnedgangen møder på sin vej gennem atmosfæren.

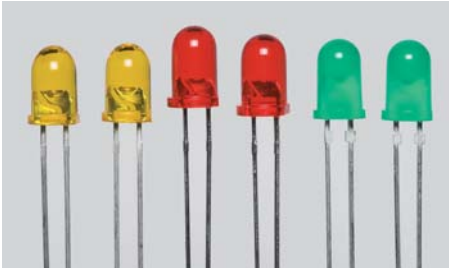
Nogle blomster er røde, andre er blå. Alle ting har en farve, fordi de populært sagt absorberer nogle bølgelængder og tilbagekaster andre. Naturens farver opstår som et delikat samspil mellem mange optiske fænomener som brydning, refleksion, spredning, diffraktion og absorption (figur 4).



Figur 4. Regnbuen – et lysfænomen i naturen. Naturens farver opstår som et delikat samspil mellem mange optiske fænomener. Regnbuen opstår, når lysets forskellige bølgelængder først brydes og derefter kastes tilbage af vanddråberne i luften.

### At kontrollere lyset

Igennem hele menneskets historie har vi været optaget af at kontrollere lyset. For godt 125.000 år siden lærte vi at tænde bål, og dermed fik vi kontrol over den vigtigste kunstige lyskilde nogensinde. Teknikken blev raffineret til fakler, olielamper og stearinlys. Det næste store gennembrud kom først i det 19. århundrede, hvor Thomas Edison udviklede glødepæren. Pæren lyser, fordi glødetråden har så stor en modstand, at den bliver glødende varm, når man sender en strøm gennem den. Glødepæren har været gennem mange generationers udvikling siden dens opfindelse og bruges i dag overalt i samfundet. Desværre udnytter lampen ikke strømmen særligt effektivt, da kun en lille del bliver omdannet til lys, mens resten går tabt som varme. Det ser da også ud til, at glødelampens dage, næsten 130 år efter dens opfindelse, er ved at være talte. En ny type lamper, som på engelsk kaldes for 'Light Emitting Diode' (LED), er i fuld fart ved at fortrænge glødepærer, og LED-fladskærme erstatter billedrørene i de gamle klodsede fjernsyn. De bedste LED-lys har nemlig alle de kvaliteter, man kan ønske sig: De er små, giver et klart lys og har en farve, som kan justeres efter behov (figur 5). Desuden omsætter de den elektriske energi meget effektivt til lys og bliver ikke varme som en tilsvarende glødelampe, og dermed går der ikke så meget energi til spilde. LED-pæren lyser, når elektroner i et halvledermateriale foretager et kvantespring fra en høj energitilstand til en lavere. Når LED-pærer er så effektive, skyldes det, at der kun tabes meget lidt energi som varme, fordi næsten al den udsendte stråling er synligt lys. Fotonernes bølgelængde – og dermed lysets farve – afhænger af, hvilke materialer halvlederen består af. På grund af disse egenskaber er LED-lys billige i drift og kan oven i købet lyse i årtier uden at skulle skiftes ud (figur 6). Du kan læse mere om halvledere og LED i boks 2 og 3.

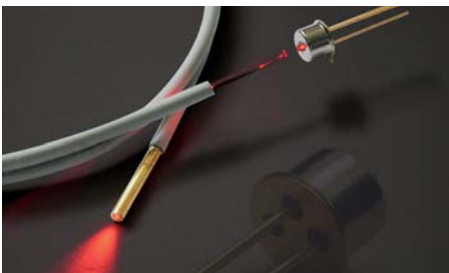


Figur 5. LED-pærer kan lyse i mange forskellige farver.

Figur 6. Fotonik i praksis. Urene i Københavns metro er designet med hvide LED-lys, som kan lyse i årevis uden udskiftning. LED-lys bruges også allerede i cykellygter og biler.



Fotonik er lysets teknologi. Men fotonik handler ikke kun om synligt lys. Uden for regnbuens spektrum befinder sig ultraviolet og infrarødt lys, og disse områder af det elektromagnetiske spektrum er meget vigtige for fotonikken. Voksende mængder data bliver for eksempel gemt og læst ved hjælp af lys fra lasere, for eksempel på en cd eller BlueRay-dvd. Når vi taler i telefon, sendes informationen frem og tilbage gennem telefonkablerne ved hjælp af infrarødt lys. De lysledende kabler er gravet ned i jorden eller lagt på bunden af havet, og hver gang du surfer på nettet, sender en sms eller taler i telefon, bruger du det globale telekommunikationsnetværk, der som et spindelvæv med millioner af kilometer hårtynede optiske fibre er vævet ud over hele jordkloden (figur 7). I de mest raffinerede dataoverførselsforsøg er der blevet sendt op til 25 terabits i sekundet ( $1 \text{ Tb/s} = 10^{12} \text{ b/s}$ ) gennem én lysleder på bare nogle få mikrometers tykkelse (figur 7). Det svarer til den samlede hastighed i mere end én million hurtige internetforbindelser, eller til at hele EU's befolkning på næsten 500 millioner personer kunne tale i telefon samtidig over sådan en fiber.



Figur 7. Optiske fibre sender informationer kloden rundt med lysets hastighed.

Telekommunikation er den suverænt vigtigste anvendelse af fotonik i dag. Mange steder i Danmark er man i fuld gang med at føre lyslederkabler hele vejen ind i folks hjem. Fibernettet, som det ofte kaldes, gør det muligt at hente og sende data over internettet meget hurtigere end med de traditionelle elektriske og trådløse forbindelser.

## Boks 2. Halvledermaterialer

Et bindeled mellem fotonik og elektronik udgøres af den særlige gruppe af materialer, som kaldes halvledere. Halvledere har fået deres navn, fordi de hverken opfører sig som metaller (gode elektriske ledere – for eksempel guld) eller isolatorer (kan slet ikke lede strøm – for eksempel glas). Halvledere kan lede elektrisk strøm, men de har en meget højere modstand end metaller. Imidlertid kan man få halvledere til at lede strøm ved at 'forurene' (*dope*) dem med et andet materiale, det vil sige putte små mængder af et andet materiale ind i halvlederne (figur 8).

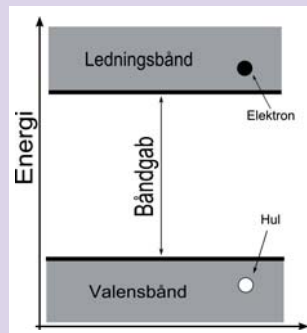
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Figur 8. Halvledermaterialer. Halvledere der skal benyttes til lysudsendelse består af atomer fra hovedgruppe 3 og 5 i det periodiske system, eksempelvis galliumarsenid (GaAs) og indiumfosfid (InP). Silicium (Si) som anvendes til elektroniske microchips er derimod meget dårlig til at udsende lys.

Mange halvledermaterialer har gode fotoniske egenskaber på grund af deres specielle energistruktur. I modsætning til elektronerne omkring frie atomer, der har diskrete energiniveauer, har elektronerne i en halvleder brede intervaller af tilladte energier, som kaldes bånd. I en halvleder er der særligt to bånd, som er vigtige: *Valensbåndet*, som svarer til lave elektronenergier, og *ledningsbåndet*, som svarer til højere energier (figur 9). Imellem disse to bånd er der et 'forbudt' område, hvor ingen elektroner kan eksistere, og derfor kaldes dette område for *båndgab*. I en ren halvleder er valensbåndet fyldt helt op, mens ledningsbåndet er tomt.

Figur 9. Lednings- og valensbånd i en halvleder. De to bånd af tilladte elektronenergier er adskilt af et båndgab, hvor der ikke er nogen tilladte tilstande.

Hvis en elektron skal 'hoppe' fra valens- til ledningsbåndet, er det derfor nødvendigt at tilføre energi (for eksempel i form af lys), der mindst svarer til båndgabets størrelse. Når elektronen 'hopper', efterlader den et hul, det vil sige en plads, hvor der mangler en elektron.

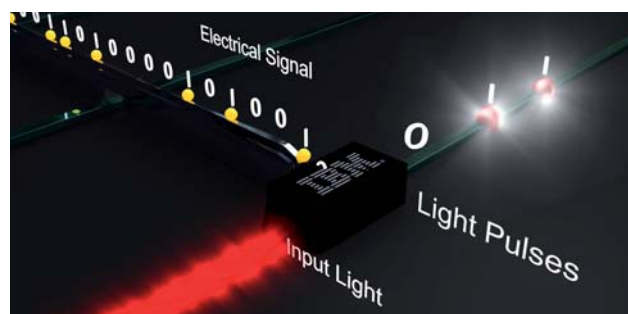


## Fotoner versus elektroner

Mens elektronikkens fundamentale partikel er elektronen, er fotonikkens som tidligere skrevet fotonen. De to teknologier står ikke som en modsætning til hinanden, selvom der er visse områder, hvor de konkurrerer. Fotonik kan noget andet end elektronik og

omvendt på grund af de to fundamentalpartiklers forskellige egenskaber. Fotonen kan i modsætning til elektronen forstærkes og blive til en meget kraftig lysstråle, og dette er grundlaget for den mest pragtfulde af alle fotonikkens frembringelser: laseren. I laserlyset har alle fotonerne samme bølgelængde og svinger i takt samtidig med, at de udgør en veldefineret laserstråle. Det er disse egenskaber, der gør laseren helt central i så forskellige anvendelser som laserkirurgi og dvd-afspillere.

Elektronens elektriske ladning betyder til gengæld, at elektroner kan opbevares med elektriske felter, mens det i dag ikke er muligt at opbevare fotoner på et lille område i mere end nogle få nanosekunder. Desuden er fotonen en masseløs partikel, som bevæger sig med eller lige under lysets hastighed, og derfor er den svær at fastholde: Det er dog ikke kun en ulempe. Skal man overføre store mængder data meget hurtigt, er fotonen suveræn, og det er muligt at overføre data langt hurtigere som lys gennem en optisk fiber end som strøm gennem en elektrisk leder. Den digitale information indkodes i en lysstråle, ved at man hurtigt tænder og slukker for lyset i takt med de digitale 0- og 1-taller, som er elektronikkens *binære* kodesprog (figur 10). Den informationsbærende lysstråle kan føres gennem en lysleder over meget store afstande.



Figur 10. Digital information indkodes i en lysstråle, ved at man hurtigt tænder og slukker for lyset i takt med de digitale 0- og 1-taller.

Dataoverførselsraten over en optisk fiber er steget med over en faktor 400.000 siden 1990. Alligevel er internettet i dag ved at kløjes i de enorme mængder data, der skal overføres, når alle gerne vil se tv i høj kvalitet og spille avancerede computerspil over nettet. Problemet er ikke så meget selve overførselshastigheden i fibrene, men derimod at styre de enorme mængder data de rigtige steder hen. Forestil dig, at alle de 500 millioner EU-borgere ringer op på samme tid og på ét sekund alle sammen skal dirigeres hen til de rigtige telefonnumre.

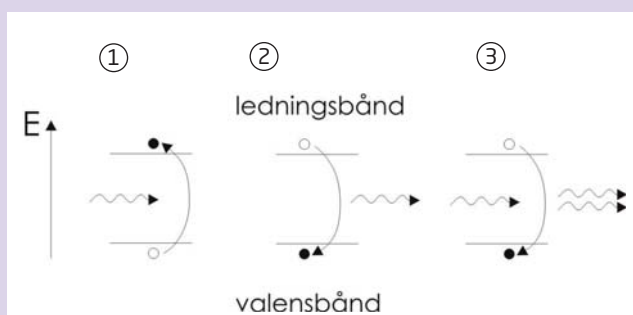
Kunsten er at få de rigtige pakker af data frem til de rigtige mennesker, og det kræver avanceret færdighedsregulering. I dag foregår denne regulering ved at oversætte de fotoniske signaler til elektriske og derefter behandle dem i en computer. Men på den måde kommer de langsomme elektroner til at virke som en flaskehals, når den optiske overførselshastighed bliver så stor, som den er i dag. Løsningen er selvfølgelig endnu mere fotonik, så lyset overtager elektronikkens arbejde med at sortere og fordele de enorme datamængder. Den løsning er dog stadig langt væk, selvom fotoniske netværk er et af de helt hotte forskningsområder.



### Boks 3. Lys-stof vekselvirkning i halvledere

Figur 11 viser de tre fundamentale processer i vekselvirkningen mellem lys og stof i et halvledermateriale: 1) Absorption: En foton ophører med at eksistere, og dens energi går til at løfte en elektron fra en lavere energitilstand til en højere. 2) Spontan emission: En elektron i ledningsbåndet opgiver sin energi ved at danne en foton. 3) Stimuleret emission: En foton stimulerer en elektron i ledningsbåndet til at afgive sin energi, der bruges til at danne en foton, som er en eksakt kopi af den stimulerende foton. I en halvleder er der normalt tale om, at elektronen går fra en højere energi i ledningsbåndet til en lavereliggende tilstand i valensbåndet.

Når man skal registrere lys som i et digitalkamera, er det absorptionen (1), som er den afgørende. I absorptionen overføres lysets energi til elektroner i ledningsbåndet, som derefter kan behandles elektronisk i kameraets elektriske kredsløb. I LED-belysning er det spontan emission (2), der får pæren til at udsende fotoner. Når man sender strøm gennem lysdioden, svarer det til, at man sender elektroner med stor energi ind i ledningsbåndet, og det er den energi, som omsættes til lys, når elektronerne laver et kvantespring fra ledningsbånd til valensbånd. Endelig bruger man stimuleret emission (3) i lasere og i optiske forstærkere generelt. Det lys, som kommer ind i materialet, stimulerer elektroner i ledningsbåndet til at afgive deres energi på en måde, så lyset forstærkes. Ved at bruge elektronisk energi til at 'kopiere' fotoner forstærker man et svagt lysfelt, så det bliver meget kraftigt.



Figur 11. Vekselvirkninger mellem lys og stof. De hule cirkler illustrerer elektronens energiniveau i starten, fyldte cirkler illustrerer elektronens energiniveau til slut, og de bølgede pile illustrerer hver en foton.

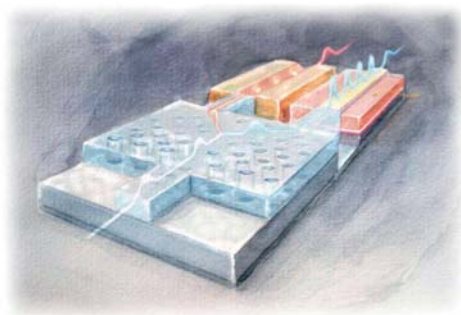
### Fotoniske krystaller

Et meget vigtigt forskningsområde i disse år er *fotoniske integrerede kredsløb*, det vil sige kredsløb, der udelukkende fungerer ved hjælp af lys. Når lyset når frem gennem lyslederkablet til computeren, er ønskedrømmen, at lyset i stedet for at videregive sin information i form af elektrisk strøm til computerens elektroniske komponenter fortsætter direkte ind i fotoniske komponenter i computeren. Det vil altså sige, at der ikke længere er elektronik inde i computeren, men at alting er baseret på fotoner. Men før det bliver virkelighed, er det nødvendigt at udvikle teknikker til at fremstille ultrasmå avancerede fotoniske kreds-

løb svarende til de elektroniske mikrochips, der i dag rummer millioner af transistorer på et område på størrelse med en fingernegl. Dette forskningsområde kaldes fotonisk integration.

Figur 12 viser en teoretisk model over et fotonisk kredsløb, hvor flere nanofotoniske komponenter er bygget sammen. I forgrunden ses en *fotonisk krystal*, som splitter lyspulser op i to dele. En fotonisk krystal er en todimensionel periodisk struktur, der virker som et godt spejl for lys med en række bestemte bølgelængder. Bagerst til venstre bevæger lyspulserne sig ind i en *bølgeleder*, hvor lyset gennem vekselvirkning med en metaloverflade krymper til nogle få nanometers størrelse. Bagerst til højre ses en komponent med *kvantepunkter* (se nedenfor), der bremser lyspulserne op. Modellen er taget med for at illustrere, hvordan forskerne forestiller sig, at fotoniske kredsløb kan overtage de elektroniske kredsløbs arbejde med at sortere og bearbejde information i computere og andet elektronik.

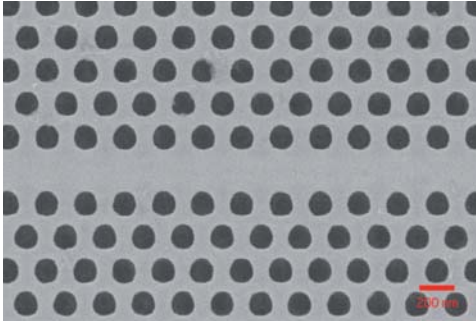
Figur 12. En fotonisk drømmekomponent består af en fotonisk krystal, der spalter lyset, en bølgeleder, der krymper lysets bølgelængde, samt af kvantepunkter, der bremser lyset op.



En af de første udfordringer for forskningen i fotonisk integration er at lave lysledere, som kan føre lyset rundt på overfladen af en chip. Jo skarpere hjørner man kan få lyset til at løbe omkring, des mindre kan man nemlig få sine kredsløb til at fylde. En af de mest lovende teknologier er de såkaldte fotoniske krystaller.

Når synligt lys rammer en halvgennemsigtig overflade (for eksempel glas), vil en vis procentdel af lyset reflekteres, og resten sendes gennem overfladen. Det er derfor, man både kan se et spejlbillede af sig selv samt varerne i butikken, når man står foran et butiksvindue. Effekten kan bruges til at lave utroligt gode spejle ved at lægge flere lag halvgennemsigtige materialer oven på hinanden og dermed øge den samlede refleksion. Sådant struktur kaldes et Bragg-spejl. Et Bragg-spejl virker kun for visse bølgelængder og kun for lys, der falder vinkelret ind på spejlet, der således tilbagekastes i præcis samme bane, som det kom ind i. Dermed er et Bragg-spejl en endimensionel struktur. For at kunne styre lys rundt på overfladen af en chip har vi brug for en todimensionel struktur, der virker som et godt spejl, uanset hvilken indfaldsvinkel lyset har.

Vi kan lave en struktur, der er et godt spejl for lys i alle plane indfaldsretninger, ved at bygge en todimensionel periodisk struktur. Det gøres ved at bore cirkulære huller i et heksagonalt krystalgitter (figur 13). Det kalder man en fotonisk krystal. Hullerne har en størrelse på 100 nm eller mindre, og man bruger derfor en elektronstråle til at bore med. Metoden, som hedder elektronstrålelitografi, kan du læse mere om i kapitel 8 om nanofabrikation.



Figur 13. En fotonisk krystal med en lysleder, det vil sige en kanal eller gang, der styrer lyset igennem krystallen. Afstanden mellem to nabo-huller i krystallen er 400 nm, og diameteren af hullerne er 280 nm. Hullerne virker som spejle, der kaster lyset tilbage, og derved holder dets kurs. Ændres diameteren blot nogle få nanometer, fungerer lyslederen ikke.

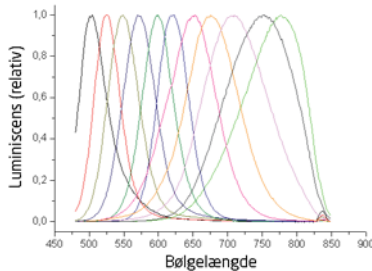
Man kan bruge fotoniske krystaller til at lede lys rundt på en fotonisk chip. Da lys foretrækker at bevæge sig i lige linjer er dette sværere, end man umiddelbart skulle tro, men ved at udelade en række huller i den fotoniske krystal kan man tvinge lyset til at følge de manglende huller som på figur 13. For at lyslederen skal virke, skal alle hullernes placering og størrelser være defineret med få nanometers præcision, og det kan kun lade sig gøre ved at bruge meget avanceret produktionsudstyr. Har man styr på det, er der til gengæld mulighed for at designe mange forskellige egenskaber ind i bølgelederen. Ud over at lede lyset rundt i baner svarende til de ledende baner i en almindelig elektronisk chip kan man splitte lyset i to eller fordele det ud i forskellige ledere, alt efter hvilken farve (bølgelængde) lyset har. Hvis man automatisk kan sortere lys efter bølgelængder, kan man hurtigt adskille de informationer, der er kodet ind i lyset.

### Kvantepunkter – designeratomer

De fotoniske egenskaber af atomerne i en gas har længe været brugt i gasbaserede lasere. Elektronerne omkring atomerne bliver anslået til en højere liggende energi ved hjælp af en ekstern energikilde, for eksempel strøm. Idet en foton farer forbi det anslåede atom, stimuleres elektronen til at henfalde til den oprindelige grundtilstand, samtidig med at den udsender en eksakt kopi af den forbifarende foton. Det kaldes stimuleret emission, som vi beskrev i boks 3. Den nye foton kan efterfølgende stimulere emission af endnu en foton. På den måde skabes lynhurtigt et kraftigt lys, der udsendes i én bestemt retning. Problemet med gaslaseren er, at lyset, der udsendes, fra naturens side har en karakteristisk bølgelængde, som vi ikke kan ændre på. Bølgelængden og dermed farven på lyset afgøres af energiforskellen mellem den anslåede og grundtilstanden af atomet, som igen afhænger af, hvilket atom eller molekyle man benytter. Derfor kan man ikke selv vælge, hvilke bølgelængder man vil bruge, når man anvender gasser til fotonik, men må nøjes med dem, naturen stiller til rådighed.

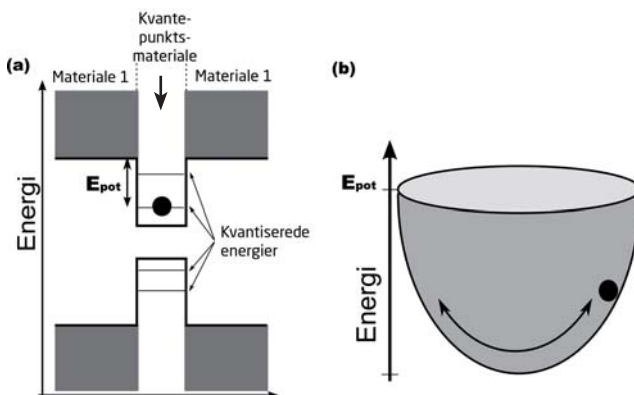
Kvantepunkter er en form for specielt designede atomer. Nanoteknologiske fabrikationsmetoder, der er udviklet over de sidste 10 år, har gjort det muligt at fabrikere kvantepunkterne, så de absorberer og udsender lys ved netop den bølgelængde, man ønsker. Samtidigt kan kvantepunkter sættes fast i en krystal, og derfor er de meget lettere at holde styr på end

atomer, der typisk farer rundt i luften med et par tusinde km/t. Dette åbner for helt nye muligheder, hvor vi senere i kapitlet (*enkeltfotonkilder*) skal se nærmere på et eksempel. Kvantepunkter er små punktformede krystaller af halvledermateriale som for eksempel Indiumarsenid (InAs) med typiske størrelser på 5-100 nm. Størrelsen af punkterne bestemmer bølgelængden af det lys, de kan absorbere og udsende (figur 14). Et stort kvantepunkt (typisk 50 nm) udsender lys med en større bølgelængde end et lille kvantepunkt (typisk 5 nm).



Figur 14. Venstre: Fluorescensspektrum for cadmiumtellurium (CdTe) kvantepunkter i forskellige størrelser. Højre: Kvantepunkter af forskellige størrelser og materialer har forskellige farver.

Kvantepunkters atomlignende energistruktur fremkommer ved, at en dråbe halvledermateriale omsluttes af en anden type halvledermateriale. Ved nøje valg af materialer kan man designe en såkaldt *potentialbrønd* for elektronerne i dråben. En potentialbrønd er et område i materialet, hvor elektronen bliver fanget. Man kan sammenligne det med en kugle, der triller frem og tilbage i bunden af en skål. Skålen virker som en potentialbrønd. For at kuglen kan undslippe skålen, skal den tilføres en kinetisk energi større end den potentielle energi ved skålens kant (figur 15). Sammenligningen med kugler og elektroner stopper dog her. For hvor kuglen kan antage en vilkårlig kinetisk energi, vil en elektron, der er fanget på et meget lille område, kun kunne opholde sig i et diskret sæt af energier. Man kalder det, at tilstandene er kvantiserede.



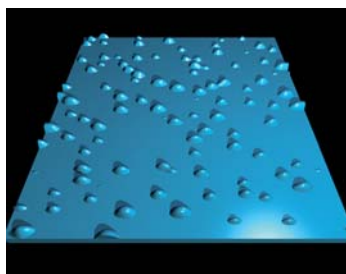
Figur 15. Et kvantepunkt laves af to typer halvledermaterialer, der tilsammen danner en potentialbrønd, der holder elektronen fanget. Hvis potentialbrøndens omåde er småt nok, kan elektronen kun antage kvantiserede energiniveauer, i modsætning til en kugle i en skål, som kan antage en vilkårlig energi.

Skinner man laserlys på en mængde kvantepunkter med en frekvens svarende til energiforskellen mellem to niveauer, anslår man elektronerne fra det lavtliggende energiniveau til det højereliggende energiniveau. Elektronen efterlader en tom plads, som kaldes et hul. Ligesom ustabile isotoper har den anslåede elektron en karakteristisk levetid (typisk 100 pikosekunder ( $10^{-12}$  sek) til 1 nanosekund ( $10^{-9}$  sek)). Elektronen kan nu henfalde ved enten spontan eller stimuleret emission, som illustreret i *figur 11*. I modsætning til tidligere hvor der var tale om et energibånd med mange mulige elektronenergier, findes der imidlertid nu kun een mulig elektronenergi bestemt af kvantiseringen. De udsendte fotoner har dermed en helt bestemt energi og bølgelængde (farve). Ved at ændre størrelsen af kvantepunktet ændres elektronenergien og dermed farven af det udsendte lys – det ultimative nanosnedkeri!

### Fremstilling af kvantepunkter

Der findes i dag to forskellige slags kvantepunkter: Kolloidale kvantepunkter og selvsamlende kvantepunkter. Forskellen stammer fra den måde, kvantepunkterne fremstilles på. Kolloidale kvantepunkter fremstilles kemisk og findes derfor som runde nanokrystaller, der flyder rundt i en væske. Der forskes i dag i at bruge kolloide kvantepunkter i kræftbehandling (*boks 4*).

Selvsamlende kvantepunkter fremstilles ved at lade krystaller fra ét halvledermateriale (for eksempel indiumarsenid) gro som en tynd film oven på overfladen af et andet halvledermateriale (for eksempel galliumarsenid). De to materialer vælges sådan, at overfladespændingen mellem dem til sidst får den dannede halvlederfilm til at gå i stykker og samle sig som små dråber oven på den nederste halvlederoverflade som vanddråber på et blad. Kvantepunktet har 'samlet sig selv' (*figur 16*).

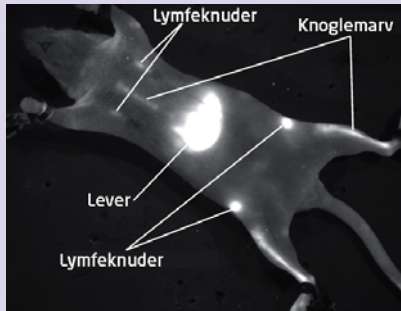


*Figur 16. Dannelsen af selvsamlende kvantepunkter minder om måden, vanddråber samler sig på et blad. Billedet til højre viser en 3D-visualisering af et billede af kvantepunkter taget med et Atomic Force Mikroskop (AFM). Hvert kvantepunkt er cirka 10 nm i diameter.*

### Boks 4. Kvantepunkter afslører kræftknuder

Kolloidale kvantepunkter er et af lægernes nyeste våben i kampen mod kræft. Håbet er, at kvantepunkter kan bruges til at finde ud af, hvor i patienten en kræftsvulst sidder, og hvor stor den er. Ideen er at overtrække de kolloidale kvantepunkter med en

tynd film af proteiner, som genkender og binder til kræftramt væv. Når de proteinbelagte kvantepunkter sprøjtes ind i patienten, flyder de rundt med lymfevæsken rundt (figur 17), indtil de møder kræftcellerne, hvorefter proteinerne og dermed kvantepunkterne sætter sig fast i det syge væv. Infrarødt lys går gennem hud og væv, og ved at skinne med lyset på patienten lyser kvantepunkterne ved de kræftramte celler op som små advarselsslamper, der afslører placeringen og størrelsen af kræftsvulsten inden i patienten.



Figur 17. En bedøvet mus har fået sprøjtet kvantepunkter ind i kroppen. Kvantepunkterne flyder med lymfevæsken rundt og er især tydelige i de vigtigste områder af lymfesystemet.

Fordelen ved at benytte kvantepunkter er, at de lyser kraftigt, samt at de er fotostabile, det vil sige, at lyset ikke mister intensitet med tiden. Sidstnævnte er et velkendt problem med andre typer fluorescerende stoffer.

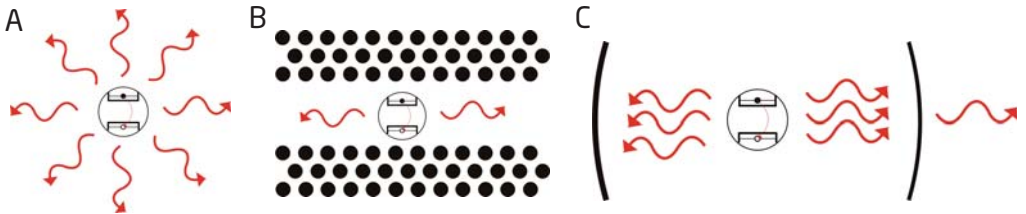
## Enkeltfotonkilder

Fysikere og ingeniører har længe forsøgt at bygge en lyskilde, der kan udsende enkelte fotoner – en såkaldt *enkeltfotonkilde*. Med sådan en kilde kan man blandt andet sende hemmelige beskeder sikkert mellem to personer, som det er beskrevet i boks 5 om kvantekryptering. Udfordringen ligger dog ikke i kun at lave en foton ad gangen, men snarere i at kontrollere, hvornår den bliver dannet, og i hvilken retning den udsendes. Der er blevet bygget enkeltfotonkilder i forskningslaboratorier, men der er endnu lang vej, før de kan anvendes kommercielt. Ved hjælp af kvantepunkter håber ingeniørerne at kunne lave effektive enkeltfotonkilder inden for en overskuelig fremtid.

Lad os se på, hvordan man forsøger at bruge et enkelt kvantepunkt med to energiniveauer  $E_1$  og  $E_2$  som enkeltfotonkilde. Selve den enkelte foton er let nok at frembringe. Man bringer kvantepunktet i anslået tilstand ved at ramme det med en kort puls af laserlys, som anslår kvantepunktet til energien  $E_2$ , der er højere end grundtilstandsenergien  $E_1$ . Hvis kvantepunktet er placeret i et ensartet materiale, vil det snart efter henfalde til grundtilstanden og i den forbindelse udsende en enkelt foton ved spontan emission.

For at enkeltfotonkilden skal være praktisk anvendelig, skal man kunne kontrollere, hvornår fotonen udsendes og i hvilken retning. Levetiden for et anslået kvantepunkt er meget kort, kun omkring 1 nsek, så inden for det tidsrum kan man altså med stor sikkerhed skabe en enkelt foton. Det store problem for en ingeniør, når han skal bygge en enkeltfotonkilde, er derfor at kontrollere retningen, som fotonen udsendes i (figur 18A).

Der er flere måder at angribe problemet på. Her vil vi blot nævne to. Den første mulighed er at indbygge sine kvantepunkter i en fotonisk krystalbølgeleder. Som omtalt tidligere kan bølgelederen dirigere lyset i bestemte retninger. Placerer man sit kvantepunkt i bølgelederen, kan man spærre vejen for fotonerne i alle andre retninger end den ønskede og på den måde tvinge den henfaldne foton til at bevæge sig i bølgelederens retning (figur 18B).



Figur 18. A. I et ensartet materiale bliver fotoner udsendt i alle retninger fra en enkeltfotonkilde. B. Den fotoniske krystal sørger for, at fotonerne kun kan slippe ud i en bestemt retning. C. Ved at placere kvantepunktet mellem to spejle kan man lokke det til at udsende fotonen på en måde, så den bliver reflekteret frem og tilbage, indtil den til sidst undslipper gennem et af spejlene.

Den anden mulighed er, at i stedet for at spærre alle uønskede retninger af, kan man prøve at 'lokke' fotonen til at bevæge sig i den ønskede retning. Hvis man placerer to krumme spejle over for hinanden, er det muligt for lys at fare frem og tilbage mellem dem i en uendelighed. Hvis man placerer et anslået kvantepunkt mellem sådan to spejle, vil fotonen fra kvantepunktet blive indfanget af spejlene. Fotonen rejser mange gange frem og tilbage mellem de to spejle og passerer derfor kvantepunktet mange gange med mulighed for at blive reabsorberet for derefter igen at blive udsendt. På den måde har man altså en tilstand mellem de to spejle, der er en blanding af et anslået kvantepunkt og en foton og derfor hverken foton eller anslået elektron. Hvis man lader det ene spejl reflektere lidt mindre end det andet, vil fotonen til sidst slippe ud gennem det dårligste af de to spejle (figur 18C). Herved har man udsendt en enkelt foton i en bestemt retning og således dannet en enkeltfotonkilde.

### Boks 5. Ubrydelig kryptering med fotoner

Moderne kryptering i for eksempel dankorttransaktioner foregår ved hjælp af sindrige matematiske metoder, men er alligevel ikke fuldstændigt sikre. Heldigvis tager det selv de største computere i verden meget lang tid at bryde koderne. Man kan dog ikke være sikker på, at det vil blive ved med at være sådan i fremtiden, hvor mere effektive computere eller smartere kodebrydningsmetoder måske ser dagens lys.

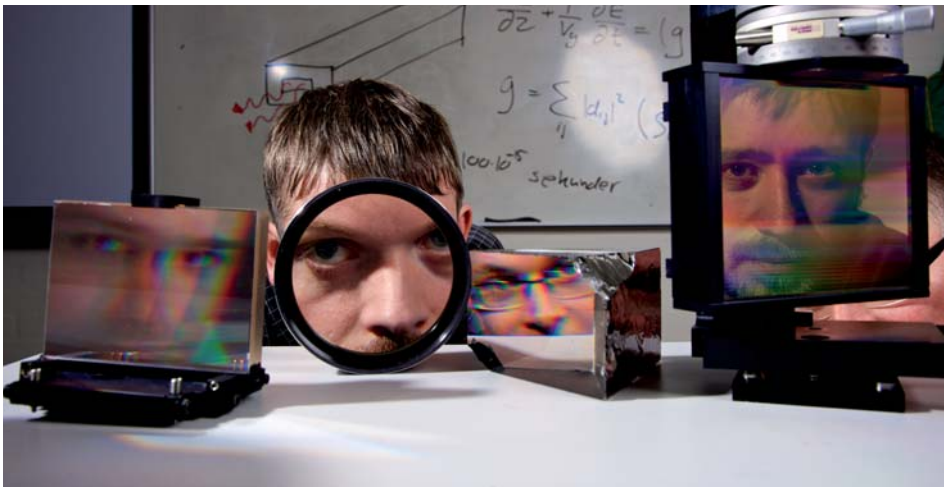
I 1980'erne blev der foreslået en elegant metode til at kryptere meddelelser med en kode, der ifølge fysikkens love er fuldstændig ubrydelig. Metoden er baseret på fundamentale kvantemekaniske egenskaber ved lys og kræver en enkeltfotonkilde. Lad os antage, at Alice ønsker at sende en hemmelig besked til Bob. I enkeltfotonkrypte-

ring benyttes enkelte fotoner til at sende informationen, som er gemt i en polarisering, det vil sige fotonernes svingningsretning. Ved kommunikation mellem Alice og Bob holdes der konstant styr på de enkelte fotoner og den vej, de svinger. Hvis en informationstyv forsøger at måle polariseringen, kan tyven ikke gøre det uden også at ødelægge den. Alice og Bob vil derfor med det samme opdage det, hvis en informationstyv prøver at læse deres budskab, da de kan se det, hvis nogen har pillet ved polariseringen.

### Fremtiden er lys

Vi er i disse år vidner til en voldsom udvidelse af fotonikkens anvendelsesområde. Gammeldags kameraer udkonkurreres af digitalkameraer, LED-fladskærme afløser fjernsyn med billedrør, og internetforbindelsen bliver konstant hurtigere takket være lysledende kabler. Men selvom udviklingen går hurtigt, er der stadig lang vej at rejse.

Fysikere og ingeniører står i dag over for adskillige udfordringer, der skal løses, før fotoniske kredsløb og enkeltfoton kilder finder deres vej til praktiske anvendelser. Men i dag kan vi dog allerede designe og bygge systemer inden for nanofotonik, som man end ikke turde drømme om for blot 10 år siden, og det er helt sikkert, at forskningen inden for nanofotonik bliver yderligere intensiveret over de næste 10 år. Så hvem ved, måske vil fotoniske chips snart bane vejen for hurtigere internet, sikker kommunikation og optiske computere – eller måske helt andre anvendelser, vi slet ikke har tænkt på endnu.



Kapitlets forfattere. Fra venstre: Ph.d. studerende Per Lunnemann Hansen, Lektor Mike van der Poel, Professor Jesper Mørk og Ph.d. studerende Mads Lykke Andersen.