

Illustration: Tino Rozendal (COPS).

At kontrollere udsendelsen af lys

Figur 1. Illustration af anslået atom som udsender en foton.

For 17 år siden foreslog en amerikansk forsker, at udsendelsen af lys kunne kontrolleres fuldstændigt ved hjælp af såkaldte fotoniske krystaller. Nu er denne forudsigelse blevet eksperimentelt bekræftet. Resultatet peger frem mod en række konkrete anvendelser.

Af Peter Lodahl

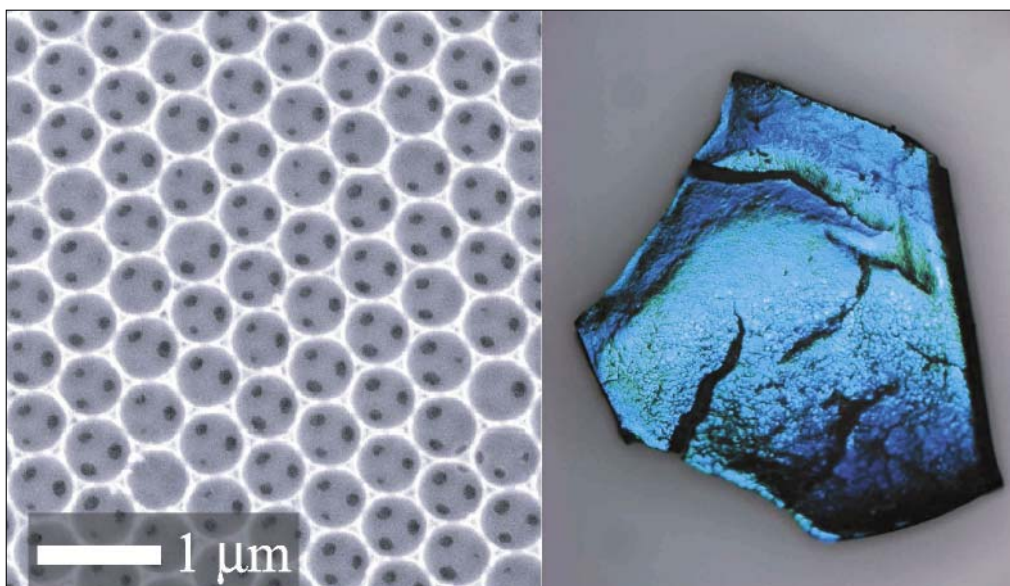
■ Vekselvirkningen mellem lys og materie er en vigtig og fundamental proces i naturen og spiller en afgørende rolle f.eks. i planters livscyklus. Et lys-kvantum (en foton) med en specifik

energi kan absorberes af et atom eller molekyle. Det pågældende atom bliver derved "anslået" – dvs. dets elektroner sættes i en højere energitilstand. Efterfølgende kan atomet spontant

udsende en foton i en tilfældig retning og vender dermed tilbage til sin grundtilstand (se figur 1). Den gennemsnitlige tid atomet forbliver anslået kaldes atomets levetid, som er lig med

tidsforskellen mellem absorption og udsendelse af en foton.

Udsendelsen af fotoner er en kvantemekanisk sandsynlighedsproces, der er nært knyttet til såkaldte vakuumfluktuationer.



FOTOS: COPS.

Figur 2 (tv). En fotonisk krystal bestående af lufthuller (mørke sfærer) i titanium-dioxid (hvide struktur) gengivet med et elektronmikroskop. Lufthullerne er ordnet i et sekskantet mønster. Gitterafstanden for denne krystal er 460 nanometer.

Figur 3 (th). Fotografi af fotonisk krystal, som er omkring 2 mm i bredden. Den smukke blå farve skyldes, at denne farve ikke kan udbrede sig i krystallen og derfor reflekteres.

ner. Vakuumsfluktuationer er et gådefyldt kvantemekanisk fænomen: selv i et fuldstændigt tomt rum findes altid elektromagnetisk energi, der fungerer som en allestedsnærværende baggrundsstøj. I en verden uden vakuumsfluktuationer ville et atom forblive anslået for evigt, men just på grund af denne påvirkning udsender atomer lys. Vakuumsfluktuationer er begrænsende for effektiviteten af lasere, da fotoner udsendt i en vilkårlig retning ikke kan udnyttes. Desuden forstyrrer disse fluktuationer lagring af kvanteinformation, som er essentiel for fremtidige kvantecomputere. Kan man på passende vis kontrollere vakuumsfluktuationer, åbnes der for muligheden for at optimere sådanne fundamentale processer. Der er derfor på verdensplan omfattende forskning i at "tæmme" vakuumsfluktuationer.

Teori bekræftet

I 1987 foreslog den amerikanske forsker Eli Yablonovitch, at udsendelsen af lys kan kontrolleres fuldkomment ved hjælp af specielle nanostrukturer kaldet *fotoniske krystaller*. Denne forudsigtelse blev startskuddet til en omfattende verdensomspæn-

dende forskningsindsats inden for fotoniske krystaller. 17 år efter Yablonovitch's forudsigtelse er det nu endelig lykkedes at eftervise denne teori i et eksperiment. Således har vi i gruppen *Complex Photonic Systems* (COPS) ved Universitet Twente i Holland som de første været i stand til at kontrollere både tid og retning af fotoner udsendt fra specielt fremstillede syntetiske atomer indbygget i fotoniske krystaller. Disse resultater kan bane vejen for udviklingen af effektive miniaturelasere og solceller og har vigtige anvendelsesmuligheder inden for kvanteinformationsteknologien.

Fotoniske krystaller

Fotoniske krystaller er opbygget af en gentaget sekvens af to materialer med forskellige brydningsindeks. Et materiales brydningsindeks bestemmer hastigheden, hvormed lys bevæger sig gennem mediet og forårsager brydning af lys i f.eks. linser og prizmer. Brydningsindekset i en fotonisk krystal varierer på en længdeskala, der er af samme størrelsesorden som bølgelængden af lys (se figur 2.) For synligt lys er det ca. 500 nanometer, hvilket svarer til mindre end en tusindedel millimeter, men

stadigvæk titusinde gange større end et atom. Jo større forskel i brydningsindeks mellem de to materialer, der opbygger krystallen, desto mere usædvanligt opfører lyset sig i en fotonisk krystal. Således kan lys med en bestemt bølgelængde (dvs. farve) ikke længere udbrede sig i visse retninger, og under belysning med hvidt lys fremstår krystallen derfor med en tydelig farve, da denne farve reflekteres fuldstændigt (se figur 3). Hvis lys med en bestemt farve ikke kan udbrede sig i nogen retning overhovedet, taler man om et *fotonisk båndgab*. I et sådant båndgab er vakuumsfluktuationer undertrykte. For andre bølgelængder, som ikke ligger i båndgabets, kan vakuumsfluktuationerne tilmed forøges. Således opnås muligheden for både at undertrykke og tilskynde udsendelsen af lys. Fotoniske krystaller muliggør derfor ultimativ kontrol over udsendelsen af lys.

Syntetiske atomer som mikroskopiske lyskilder

De fotoniske krystaller i vores eksperiment er fremstillet ud fra titaniumdioxid (stoffet, der giver hvid maling dets farve). Krystallerne, som måler 2

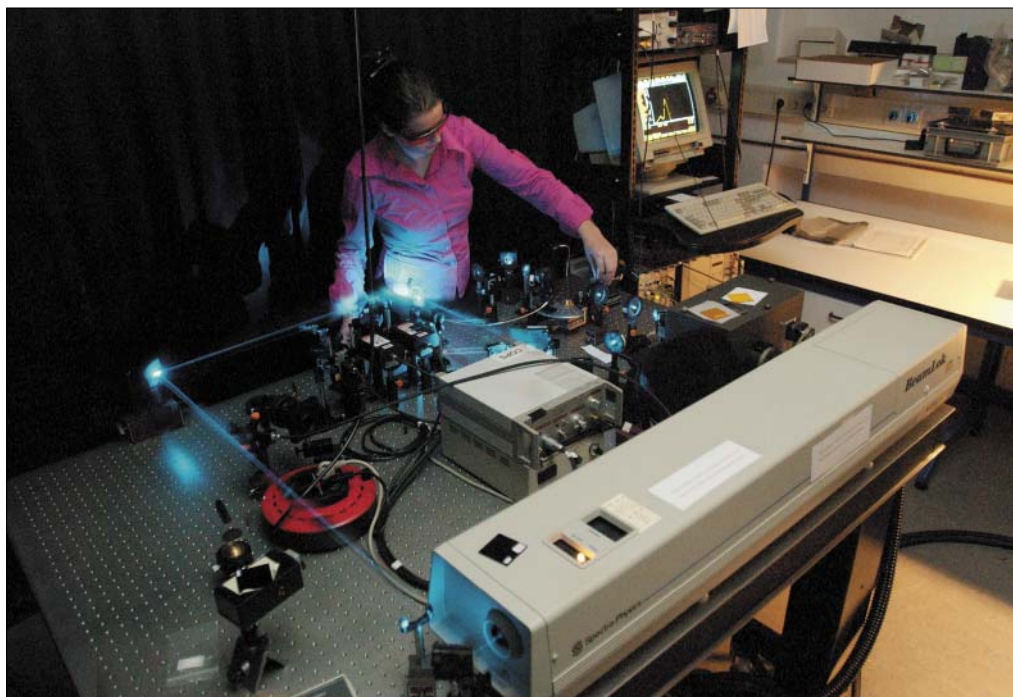
gange 2 gange 0,3 millimeter, er opbygget således, at der findes tusinder af lufthuller i alle retninger inde i krystallen.

Afstanden mellem på hinanden følgende lag (gitterafstanden) varierer mellem 240 og 650 nanometer, hvilket er i samme størrelsesordenen som bølgelængden af synligt lys. I disse krystaller er anbragt såkaldte *kvantepunkter*, som kan udsende lys. De er fremstillet af halvleder-materialet cadmium-selenid, og de opfører sig i mange henseender som atomer. Kvantepunkter bliver derfor også kaldt "syntetiske atomer". Fordelen ved kvantepunkter er, at de kan fremstilles med netop de egenskaber, som er påkrævet i et eksperiment – således er man ikke begrænset af de strukturer, som naturen tilbyder. Kvantepunkterne i vores krystaller er i gennemsnit 4,5 nanometer i diameter, hvilket er hundrede gange mindre end dimensionen af den fotoniske krystal og derfor ikke synlige på elektronmikroskop-billedet i figur 2.

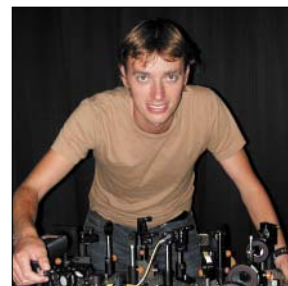
I vore eksperimenter har vi anslået disse kvantepunkter med en kort lyspuls fra en laser. Efterfølgende har vi målt, hvor længe det tager før en foton udsendes, og i hvilken retning den bevæger sig. Et kvantepunkt fungerer derfor som en mikroskopisk lyskilde og fotoniske krystaller kan bruges til at påvirke levetiden af det anslåede niveau.

Resultat med praktiske perspektiver

I vores eksperiment finder vi, at i en fotonisk krystal med en gitterafstand på 420 nanometer er levetiden for udsendelsen af lys fra kvantepunkterne 9,6 nanosekunder, mens den er 19,3 nanosekunder i en krystal med en gitterafstand på 500 nanometer (se figur 4). Til sammenligning er levetiden for kvantepunkter i en ikke-fotonisk referencokrystal 12,4 nanosekunder. Disse resultater viser, at det er muligt både at forlænge og forkorte levetiden for udsendelsen af lys i en fotonisk krystal, i overensstemmelse med de teo-



Et laboratorium på Complex Photonic Systems (COPS), Universitet Twente.



Om forfatteren

Peter Lodahl er postdoc ved Complex Photonic Systems (COPS), Universitet Twente
Tlf.: 003153-489 5393
E-mail: p.lodahl@utwente.nl

retiske forudsigelser. Forskellen mellem den længste og korteste levetid er mere end en faktor 2. Fotoniske krystaller giver derfor kontrol over tidspunktet for udsendelsen af lys.

En forkortet levetid forårsager forhøjet udsendelse af lys, således at effektiviteten af lyskilden er forøget. Desuden viser eksperimenterne, at lysudsendelsen er stærkt retningsafhængig. Dette betyder, at lyskilderne ikke blot er mere effektive, men samtidig mere retningsbestemte, hvilket øger det samlede lysudbytte endnu mere. Derfor er mikroskopiske lyskilder i fotoniske krystaller interessante for anvendelser i mikrolasere og LED'er (f.eks. i billedskærme) eller for lyskilder, der kan udsende lyskvanter en ad gangen (for kvanteinformation).

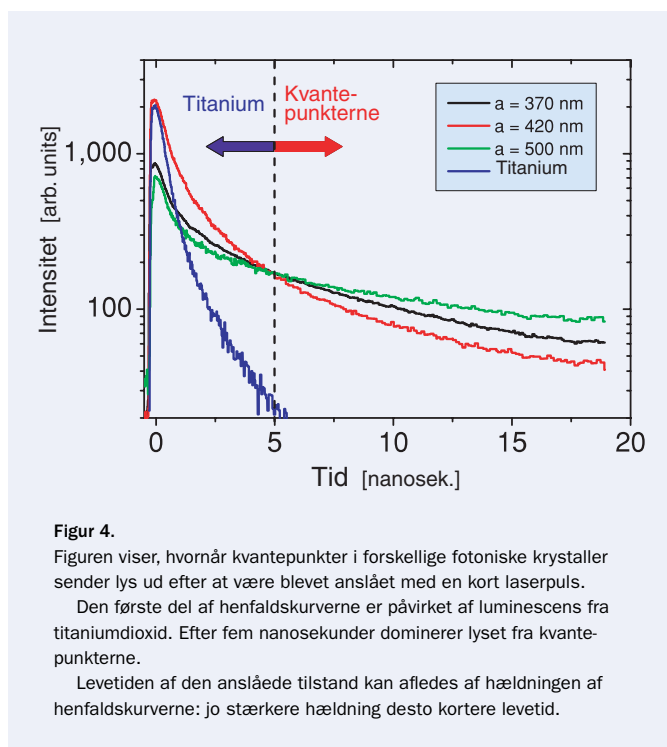
En forlænget levetid betyder, at udsendelsen af lys er undertrykt. Hermed bliver energi fastholdt i længere tid i kvantepunkterne. Dette kan vise sig at blive en virkningsfuld måde at øge effektiviteten af f.eks. solceller. En solcelle virker netop ved, at sollys anslår elektroner (i f.eks. kvantepunkter) i højere energitilstande og disse elektroner "høstes" derefter som

strøm. Effektiviteten af solceller er ultimativt begrænset af, at de anslåede elektroner kan henfalder under udsendelse af lys. Fotoniske krystaller kan bruges til at undertrykke dette tab af energi i form af lys.

En bemærkelsesværdig egenskab ved vores eksperiment er, at kvantepunkterne overalt i

den fotoniske krystal leverer den ønskede virkning og for mange forskellige bølglængder samtidig. Dette er i modsætning til alternative metoder for kontrol af lysudsendelse, hvor lyskilden skal være lokaliseret i et meget lille område og sende lys ud med en meget veldefineret farve. ■

Forskningen er udført ved Universitet Twente i Holland af postdoc Peter Lodahl, ph.d. student Ivan Nikolaev, specialestuderende Arie Irman og Karin Overgaag, og professor Willem Vos i samarbejde med ph.d. student Floris van Driel og professor Daniël Vanmaekelbergh fra Universitet Utrecht, Holland.



Figur 4.

Figuren viser, hvornår kvantepunkter i forskellige fotoniske krystaller sender lys ud efter at være blevet anslået med en kort laserpuls.

Den første del af henfaldskurverne er påvirket af luminescens fra titaniumdioxid. Efter fem nanosekunder dominerer lyset fra kvantepunkterne.

Levetiden af den anslåede tilstand kan afledes af hældningen af henfaldskurverne: jo stærkere hældning desto kortere levetid.

Yderligere læsning

P. Lodahl, A.F. van Driel, I.S. Nikolaev, A. Irman, K. Overgaag, D. Vanmaekelbergh, and W.L. Vos, *Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals Nature* 430, 654-657 (2004).

www.tn.utwente.nl/cops