

Nobelprisen i fysik 2014 – den blå lysdiode, der revolutionerede lysvidenskaben

Af Paul Michael Petersen, DTU Fotonik, Danmarks Tekniske Universitet

Nobelprisen i fysik 2014 blev givet for opfindelsen af en ny energieffektiv og miljøvenlig lyskilde – den blå lysdiode. De tre japanere Isamu Akasaki, Hiroshi Amano og Shuji Nakamura belønnes for deres forskningsmæssige gennembrud, i starten af 1990'erne, et gennembrud der muliggør det lysteknologiske paradigmeskifte, som vi, i disse år drager nytte af. LED er baseret på den blå lysdiode, og allerede nu ser vi at LED-belysning vinder hastigt frem i boligen, på kontoret og i udendørsbelysningen. LED bliver den altdominerende lysteknologi i fremtiden, og i denne artikel beskrives teknologien bag de blå lysdioder, og hvordan nobelprisvindernes forskning har revolutioneret lysvidenskaben.

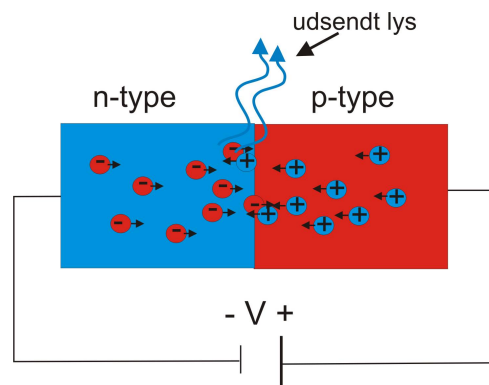
Lyset til det 21. århundrede

Nobelkomiteen begrunder pristildelingen til de tre japanere med, at de har leveret det afgørende bidrag til udviklingen af en teknologi, der er til stor gavn for menneskeheden. Med fremkomsten af LED lamper har vi fået et langt mere energieffektivt og miljøvenligt alternativ til ældre lyskilder som glødepærer, halogenpærer og sparepærer. Belysning, både indendørs og udendørs, udleder betydelige mængder drivhusgasser. Med LED-teknologi kan vi opnå markant reduktion af strømforbruget til belysning, og tilsvarende reduktion af CO₂-udledningen i atmosfæren. Der kan spares langt over halvdelen af en storbys energiforbrug til belysning ved at skifte til diodelys. Ud over den umiddelbare miljøgevinst giver teknologien også en række nye "intelligente" muligheder. Eksempelvis kan lysdioder udsende datainformation kodet i lysets fotoner, og lysdioden er en elektronisk komponent, der kan styres over internettet. På den måde kan gadelys omdannes til langt mere end blot en service, der gør indbyggerne i stand til at se hvor de færdes om natten. LED-lys kan således udsende signaler som et kamera eller en smartphone kan opfange. I princippet kan man stå under en lysstander og udveksle data mellem standen og et elektronisk styresystem. Når lyset bruges til at transmittere data, får man med en intelligent gadelampe samtidig en specifik GPS-position. Sammen med andre lysstanderes data kan man realisere intelligent trafikstyring via "grønne bølger", give information om nærmeste ledige p-plads samt sende besked til trafikstyringssystemer ved trafikuheld. De kan også anvendes som informationstavler i forhold til nærområdets seværdigheder eller aktuelle begivenheder. Det er en teknologi, hvor vi kun lige er begyndt at afdække mulighederne. Glødepærer har været benyttet til belysning i det 20. århundrede – det 21. århundrede vil være oplyst af LED-lamper. Teknologiskiftet inden for belysning er på vej.

Principperne bag lysdiode-teknologien

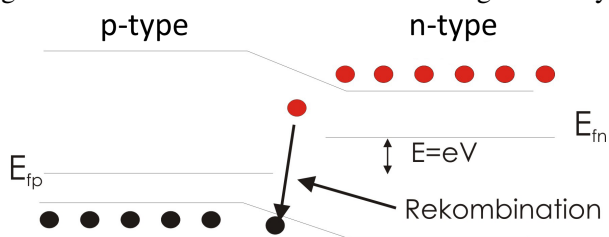
I 1990'erne havde røde og grønne dioder været kendt i mere end 30 år, men selvom man havde ydet en betydelig indsats, både i det videnskabelige samfund og i industrien, var man endnu ikke i stand til at udvikle

en blå diode. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano og Shuji Nakamura fik succes, hvor alle andre fejlede. Akasaki arbejdede sammen med Amano ved universitetet i Nagoya, mens Nakamura var ansat på "Nichia Chemicals", et lille firma i Japan. Deres samarbejde førte til produktionen af blåt lys fra halvledere, og derved blev det for første gang muligt at danne ægte hvidt LED-lys, der er både energibesparende og brugbart som almindelig belysning. Den opfindelse var revolutionerende. Gennembruddet byggede oven på mange års forskning inden for halvledertechnologi, og fører helt tilbage til opfindelsen af den første transistor i Bell laboratorierne i 1947. Shockley, Bardeen og Brattain fik i 1956 Nobelprisen for udviklingen af transistoren, en af den moderne fysiks helt store landvindinger. Under arbejdet med at udvikle transistoren opdagede man, at der samtidigt blev udsendt lys. I 1956 publicerede J.R. Haynes fra Bell laboratorierne således en artikel [1] hvori han forklarede, at lyset der blev udsendt ved elektroluminescens i germanium skyldtes rekombination af huller og elektroner i en pn-overgang. Princippet for lysudsendelse i en pn overgang er vist i figur 1. En p-type halvleder og en n-type halvleder er bragt i tæt kontakt, og når de to halvledermaterialer påtrykkes en spænding, vil der udsendes lys fra området tæt på pn-overgangen. I halvlederkrystaller samler de enkelte atomers elektrontilstande sig i energibånd med et stort antal elektrontilstande i hvert bånd.



Figur 1. En lysdiode med pn-overgang påtrykket en spænding i lederretningen udsender lys, når ladningsbærere rekombinerer i diodens pn-overgang.

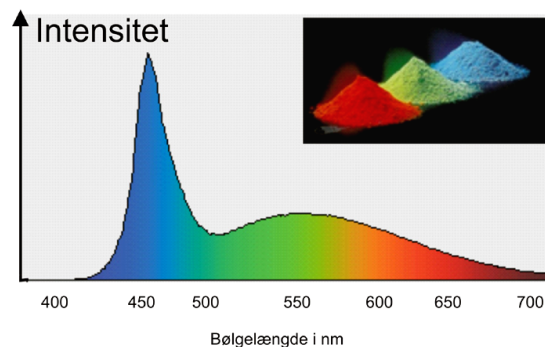
Elektroner som exciteres til ledningsbåndet efterlader en fri plads (hul) i valensbåndet. Energibåndene for halvlederen i pn-overgangen er vist i figur 2. Man kan ændre halvlederes optiske og elektriske egenskaber dramatisk ved at tilsætte små mængder af fremmedatomer (doteringsmaterialer). I en n-type halvleder tilsættes fremmedatomer med overskud af elektroner (vist som røde cirkler) og i en p-type halvleder tilsættes fremmedatomer med underskud af elektroner. Herved dannes frie elektroner i n-type halvlederen og huller (vist som sorte cirkler) i p-type halvlederen. Elektroner og hullerne fordeler sig energimæssigt i termisk ligevægt med omgivelserne efter Fermi-Dirac fordelingen. I figur 2 vises Fermi-energien for både n- og p-type materialet. Når man påtrykker en spænding, vil elektronerne trænge ind i p-type området og hullerne vil trænge ind i n-type området og herved går der en strøm igennem pn overgangen. Processen kaldes en minoritetsbærerinjektion, fordi elektroner som minoritetsbærere i p-type området rekombinerer med huller, som er majoritetsbærere i p-type området. Ved rekombinationsprocessen frigives energi, der kan udsendes som lys. Lysets bølglængde λ er bestemt af materialets båndgab E_g ud fra formelen: $\lambda = hc/E_g$. Dvs. forskellige halvledermaterialer udsender forskellige farver lys.



Figur 2. Energibåndene i halvleders pn-overgang. Elektroner i ledningsbåndet vil rekombinere med huller i valensbåndet, når spændingen V påtrykkes. E_{fn} er Fermi-energien i n-type halvlederen og E_{fp} er Fermi-energien i p-type halvlederen. De to Fermi-energiniveauer forskydes med energien eV (e er elektronens ladning), når der påtrykkes en spænding.

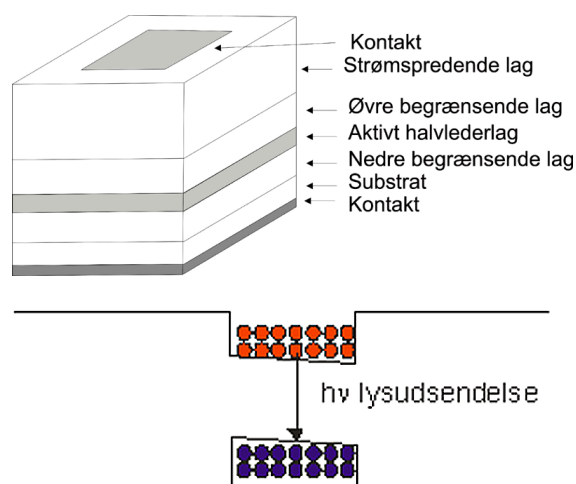
Vejen til den blå diode

De første effektive lysdioder blev udviklet i 1962 i materialet GaAs [2]. Båndgab i GaAs er 1,4 eV og derfor sker lysudsendelsen som infrarødt lys ved bølglængder omkring 900 nm. Man kan ændre bølglængden i disse LED ved at legeres med andre III-V forbindelser, og man kan opnå lysudsendelse i bølglængdeområdet fra 1000 nm til 1700 nm med legeringer af $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$ ved at vælge x og y passende. Ved at benytte legeringer af (GaP_xAs_{1-x}) kan man ændre båndgab, og således udsendes synligt lys. I 1962 lykkedes det N. Holonyak Jr. [3] at fremstille lysdioder, som udsendte rødt lys. I 1970 havde man også grønne og gule lysdioder, og interessen for udviklingen af blå lysdioder blev intensiveret. Det var nemlig først med den blå farve, at man ville være i stand til at danne hvidt lys. I figur 3 er vist hvorledes en blå lyskilde med peakbølglængde på omkring 460 nm exciteres et fosforescerende materiale, og herved dannes grønne, gule og røde bølglængder. Det opfatter det menneskelige øje som hvidt lys.



Figur 3. Lysspektret fra en blå lysdiode med fosforescerende materialer.

Udviklingen af den blå lysdiode blev imidlertid meget vanskeligere end forudset. De første forsøg blev foretaget i materialerne ZnSe og SiC, men disse materialer viste sig uegnede til effektiv lysudsendelse. Det var materialet GaN, der viste sig at fungere, men der skulle gå omkring 30 år fra N. Holonyak Jr.'s første røde lysdiode til det omsider lykkedes at fremstille en effektiv blå lysdiode. For at opnå lysudsendelse skal man have både n-type halvledere og p-type halvledere til rådighed. Problemet var at udvikle p-type halvlederen. I 1988 opdagede Akasaki og Amano imidlertid, at når GaN doteret med zink placeres i et elektronmikroskop, afgiver det meget mere lys [4]. Elektronbestråling forbedrede lysudsendelsen i p-type halvlederen - en effekt, der senere blev forklaret af Nakamura. Den første effektive blå lysdiode blev udviklet af Shuji Nakamura i 1994 [5]. Lysdioden var baseret på dobbelt heterostrukturen som Z.I. Alferov og H. Kroemer modtog nobelprisen for i 2000.



Figur 4. Øverst: Dobbelt heterostruktur LED består af et aktivt område med lysudsendelse. Det aktive område er omsluttet af to halvledermaterialer med større båndgab end det aktive område. Denne sandwichstruktur fører til en øget koncentration af frie ladningsbærere i det aktive område. Nederst: Skematisk tegning af energibåndstrukturen, hvor det fremgår, at elektroner og huller samles i det aktive lag med lysudsendelse.

I figur 4 ses dobbelt heterostrukturen [6], som har været altafgørende for udviklingen af effektive lysdioder. Lysudsendelse sker ved rekombination og denne proces kræver en høj og rumligt veldefineret

ladningsbærerkoncentration. I en simpel pn-overgang, som beskrevet i figur 2, diffunderer ladningsbærerne imidlertid væk fra pn-overgangen, hvilket giver en relativt lav værdi af ladningsbærtætheden. Den dobbelte heterostruktur består af en sandwichstruktur, hvor det aktive lag med lysudsendelse foregår i en halvleder med lille båndgab omgivet af to halvledermaterialer med højere båndgab. Herved indfanges elektroner i en potentialbrønd, og der opnås en effektiv lysudsendelse. En yderligere fordel ved heterostrukturen er, at de optiske tab reduceres kraftigt, så levetiden bliver signifikant større. Dette er årsagen til at lysdioder i dag kan have en levetid på omkring 50.000 timer.

Nobelprisen og vores hverdag

20 % af verdens elforbrug går til belysning. I skoler, kontorer og boliger er indendørs belysning ansvarlig for 20 til 50 % af det samlede energiforbrug. Ud over at de direkte omkostninger er betydelige, så har det høje strømforbrug som nævnt også en skadelig effekt på miljøet.



Figur 5. Nat i New York. Belysning i byerne er ansvarlig for en stor andel af elektricitetsforbruget. I nogle byer er belysningens andel over 50 % af det samlede forbrug.

Ved at erstatte glødepærer, halogenpærer og energisparepærer med LED-belysning, kan der derfor både opnås store besparelser og betydelige miljøgevinster. Diodebelysning har de seneste år gennemgået en hastig udvikling og anses af de fleste for at være fremtidens lysteknologi. Lysudbyttet pr. W fordobles hvert 3. år for diodelys, og dioder forventes snart at blive mere energieffektive end de mest effektive kendte lyskilder i dag. I september 2009 udgik de matte glødepærer af produktion, og i 2012 blev de klare glødepærer ligeledes udfaset. Udfasningen er nødvendig, fordi energieffektiviteten i glødepærerne er for ringe til, at vi kan nå de fastlagte politiske mål for energibesparelser, både i Danmark og i EU som helhed.

Belysningsområdet står over for meget store udfordringer. Der er tale om et globalt teknologiskifte, hvor politisk regulering og lovgivning af hensyn til miljøet udfaser kendte lyskilder. Når man i de kommende år skal udskifte en lang række konventionelle lyskilder, skal man naturligvis finde de bedst mulige erstatninger.

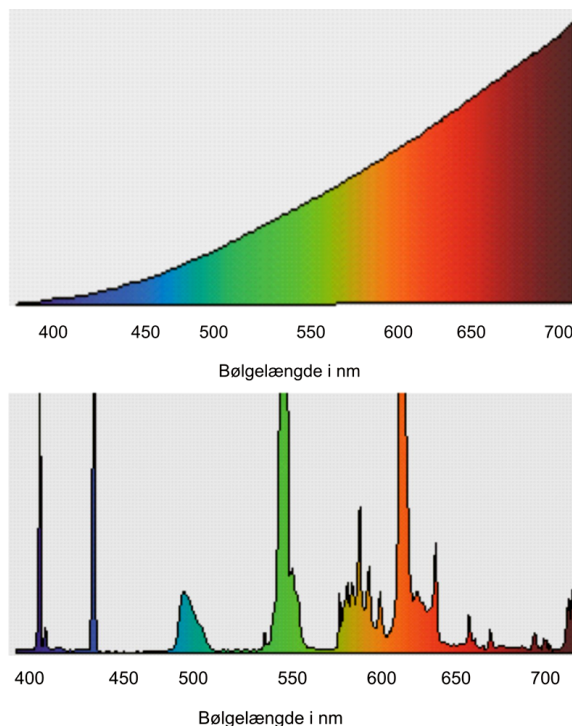
Umiddelbart er LED det oplagte alternativ. Den nye lyskilde tilbyder energibesparelser samt en lang række nye interaktive muligheder, men det skal retfærdigvis nævnes, at den også har nogle børnesygdomme. Derfor er det vigtigt, at vi tester og kvalitetssikrer hele denne udskiftningsproces. I det følgende afsnit præsenteres en oversigt over de centrale parametre, når vi kvalitetsvurderer nye energibesparende lyskilder.

Sammenligning af forskellige lyskilder

Hvis LED skal dominere den almene bolig, kontoret og udendørsbelysningen, er det en forudsætning at brugerne er tilfredse med den nye teknologi. For at sikre brugertilfredshed er det nødvendigt, at teste de forskellige lyskilder for en række faktorer, der tilsammen bestemmer hvordan vi subjektivt opfatter lyskildens kvalitet og hvordan vi kan måle dens energieffektivitet. De centrale parametre er farvegengivelse, farvetemperatur, lysstrøm, belysningsstyrke og effektivitet.

Lyskildens farvegengivelse udtrykkes ved Ra-indekset, der angiver lyskildens evne til at gengive farver på belyste genstande. Farvegengivelsen måles i forhold til farverne i en referencebelysning, eksempelvis en glødepære eller dagslyset. Ved målinger benyttes otte standardiserede farver, og ved fuldstændigt sammenfald har lyskilden et farvegengivelsesindeks (Ra-indeks) på 100.

Lyskildernes spektre er vigtige for lyskilderne farvetemperatur og farvegengivelse. I figur 6 er vist spektrene for henholdsvis en glødepære (øverst) og et lysstofrør (nederst).



Figur 6. Bølgelængdespektrene for henholdsvis en glødepære (øverst) og et lysstofrør (nederst). Glødepæren har en god farvegengivelse men det er en meget ineffektiv lyskilde, fordi der udsendes meget infrarødt lys. Lysstofrøret har en bedre effektivitet, men farvegengivelsen er ikke optimal.

Hvidt lys, som udsendes fra en lyskilde, har en farvetone som angiver om lyset er koldt (blåligt) hvidt eller mere varmt (rødtligt) hvidt som kendes fra en solnedgang.

Farvetemperaturen knytter sig til lyskildens farvetone og angives i kelvin (K). Farvetemperaturen bestemmes ved at sammenligne farveindtrykket fra lyskilden med farveindtrykket fra et opvarmet sort legeme. Når lyskilden og det sorte legemes farver er ens, registreres det sorte legemes temperatur i kelvin, og lyskilden siges at have den pågældende farvetemperatur. En høj farvetemperatur svarer til blåligt hvidt lys og en lav farvetemperatur svarer til rødtligt hvidt lys.

En lyskildes lysstrøm angiver det samlede lys fra en lyskilde og den måles i SI-enheden lumen (symbol: lm). Lysstrømmen udtrykker lysenergi pr. tidsenhed i fotometriske enheder som er vægtet med øjets følsomhed, for forskellige bølgelængder.

Lyskilders effektivitet måles i lumen pr. watt (lm/W), og den er et udtryk for lyskildens effektivitet og dermed for effektforbruget for lyskilden. Nutidens bedste kommercielle dioder har en energieffektivitet på op til 140 lm/W, mens glødepærer ligger på 8-12 lm/W, og de mest effektive lysstofrør ligger på omkring 125 lm/W. Det teoretiske maksimum afhænger af hvor bredspektret hvidtlyskilden skal være, men den vil ikke kunne overstige 400 lm/W hvis lyskilden skal have en god farvegengivelse.

Belysningsstyrken måles i lux eller lumen pr. m².

Fremtidens belysning med halvlederteknologi

Belysning baseret på lysdioder er i dag den mest effektive kilde til frembringelse af høj kvalitet hvidt lys. Den seneste eksperimentelle rekord er lidt over 300 lm/W [7], der kan sammenlignes med 10 for glødepærer og ca. 60 for energisparepærer. Herudover har LED potentiale for at levere en meget høj lyskvalitet beskrevet ved Ra-værdien, og endelig tilbyder de en meget lang levetid på mere end 50.000 timer. Imidlertid udviser LED'erne et signifikant fald i effektivitet ved høje strømtætheder og lumenværdier [8] (Eng: The efficiency droop in LEDs). Dette fald i effektiviteten begrænser output lumen signifikant for enkeltelement LED. Årsagen til faldet i effektiviteten er stadig ikke helt klart. I faglitteraturen er det blevet foreslået, at følgende elementer kan være ansvarlige for fald i effektivitet ved høj lumen output:

- “Overflow” af ladningsbærere i halvlederens kvantebrøndstruktur,
- Rekombination i krystalenheder ved høje ladningsbærertætheder
- Rekombination uden lysudsendelse (fx dannelse af “hot electrons” i halvlederen)

For nylig blev Auger-rekombination også foreslået som den dominerende mekanisme [9] og det er nok den mest sandsynlige forklaring. Brug af diodelasere kunne

muligvis løse problemet, da diodelasere potentielt er mere effektive til lysudsendelse. En yderligere fordel ved diodelasere til belysning er, at den høje effektivitet kan opnås ved høje lumenniveauer i et enkelt emittelement. Endelig har diodelasere en høj retningsbestemmelse af det genererede lys, hvilket øger energibesparelseeffekten i mange applikationer. Derfor er det realistisk at forvente, at vi i fremtiden vil få flere belysningssystemer som er baseret på laservirkning i pn-overgangen.



Figur 7. De tre modtagere af Nobelprisen i Fysik, 2014. Fra venstre: Hiroshi Amano, Shuji Nakamura og Isamu Akasaki.

Litteratur

- [1] J.R. Haynes (1955), *Phys. Rev.* **98**, 1866; J.R. Haynes & W.C. Westphal (1956), *Phys. Rev.* **101**, 1676.
- [2] J.I. Pankove, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 283-285 (1962); J.I. Pankove & J.E. Berkeyheiser (1962), *Proc. IRE*, **50**, 1976-1977.
- [3] N. Holonyak Jr. & S.F. Bevacqua (1962), *Appl. Phys. Lett.* **1**, 82.
- [4] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda & Y. Ishii (1988), *J. Lumin.* **40** & **41**, 121.
- [5] S. Nakamura, T. Mukai & M. Senoh (1994), *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1687.
- [6] Z.I. Alferov (2000), *Reviews of Modern Physics* **73**, 767.
- [7] CREE pressemeddelelse, 26. marts 2014, Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier, <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>
- [8] J. Wierer, Jr., J.Y. Tsao, & D.S. Sizov (2013), *Laser Photonics Rev.* **7**, No. 6, 963.
- [9] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J.S. Speck, og C. Weisbuch (2013), *Phys. Lett.* **110**, 177406.



Paul Michael Petersen er professor på DTU Fotonik og er desuden leder af et markant initiativ indenfor LED-belysning kaldet *DOLL – a Photonics Green lab*, som er Nordeuropas største. DOLL hjælper danske virksomheder med at udvikle konkurrencedygtige tiltag indenfor LED-teknologi.