

Nobelprijs voor de Natuurkunde 2014

Van efficiënte blauwe leds naar energiebesparende lampen

Akasaki, Amano en Nakamura kregen in 2014 de Nobelprijs voor de natuurkunde voor “de uitvinding van efficiënte blauw licht-emitterende diodes (leds) die felle en energiebesparende bronnen van wit licht mogelijk maakt”. In dit artikel geven we aan waarom deze uitvinding zo belangrijk is, welke wetenschappelijke resultaten dit mogelijk hebben gemaakt en bespreken we enkele vervolgonwikkelingen. L.J.A. Koster en M.A. Loi

4

Het verlichten van kantoren, huizen et cetera kost 20-30% van het totale verbruik van elektrische energie. Het verhogen van het rendement van verlichting kan dan ook een significante energiebesparing opleveren. Moderne ledlampen zijn ongeveer twintig keer zuiniger met energie dan de traditionele gloeilamp. Dit is mogelijk gemaakt door de ontwikkeling van blauwe

leds. Door groene, rode en blauwe leds te combineren kan wit licht verkregen worden [1]. Echter, in commercieel verkrijgbare lampen wordt een blauwe led gecombineerd met een fosforverbinding. Het blauwe licht brengt deze laag in een aangeslagen toestand waardoor deze licht met langere golflengtes uitstraalt. Samen geven deze verschillende golflengtes de indruk van wit licht (zie figuur 1).

geleider te vervangen, kunnen er vrije positieve of negatieve ladingsdragers ontstaan. Dit noemen we p-, respectievelijk, n-type dotering en zorgt ervoor dat de halfgeleider een veel hogere geleidbaarheid heeft.

Wanneer een elektron en gat in een halfgeleider recombineren, wordt er

Jan Anton Koster studeerde natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen waar hij in 2007 promoveerde. Hierna was hij postdoc aan de universiteit van Cambridge en vervolgens aan de TU Eindhoven. Dankzij een Veni-subsidie van STW kon hij in 2010 terugkeren naar de Rijksuniversiteit Groningen. Sinds 2013 is hij daar assistent professor (tenure-track) aan het Zernike Institute for Advanced Materials. In 2014 kreeg hij een Vidi-subsidie om verder onderzoek te doen naar het verbeteren van organische zonnecellen.



l.j.a.koster@rug.nl

Lichtemitterende diodes

Lichtemitterende diodes zijn lichtbronnen die gebaseerd zijn op halfgeleiders. Hun werking is wezenlijk anders dan die van een traditionele gloeilamp. Het hart van een led wordt gevormd door een pn-overgang. Dit is een grensgebied tussen twee verschillend gedoteerde halfgeleiders. Een ongedoteerde halfgeleider kan slechts weinig elektrische stroom geleiden aangezien er weinig vrije ladingsdragers beschikbaar zijn. Door een klein deel van de atomen in het kristal van een half-

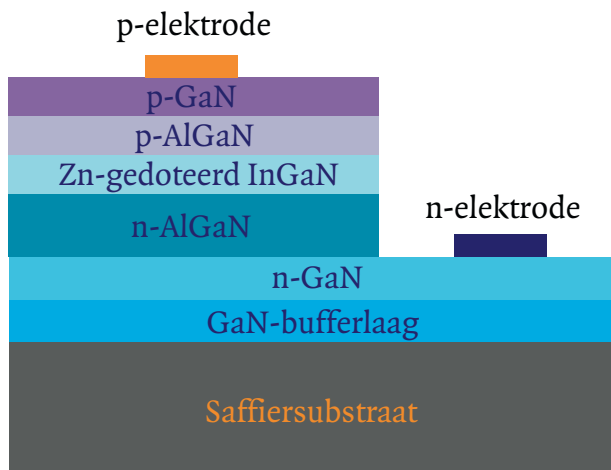
Maria Antonietta Loi studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Cagliari in Italië waar ze in 2001 promoveerde. Daarna ging ze als postdoc naar het Linz Institute for Organic Solar Cells aan de Universiteit van Linz in Oostenrijk. Later werkte ze als onderzoeker aan het Institute for Nanostructured Materials van het Italiaanse National Research Council in Bologna (Italië). In 2006 kreeg ze een tenure-trackpositie als universitair docent en Rosalind Franklin Fellow aan het Zernike Institute for Advanced Materials aan de Rijksuniversiteit Groningen. Ze is nu hoogleraar aan dezelfde instelling en hoofd van de vakgroep Photophysics and Optoelectronics.



M.A.Loi@rug.nl



Figuur 1 Twee voorbeelden van moderne verlichting gebaseerd op blauwe leds. De rij leds die aan is bestaat uit blauwe leds met een laag die de kleur omzet in zichtbaar licht. De traditioneel uitzijende lamp bestaat in werkelijkheid ook uit blauwe leds en werkt op dezelfde manier.



Figuur 2 Schematische doorsnede van een blauwe led als in referentie [7].

een foton uitgezonden met een energie vergelijkbaar met de bandkloof (het verschil tussen het energieniveau van de vrije elektronen en vrije gaten). Dat is precies wat er in een led gebeurt. Door het aanleggen van een spanning gaat er een elektrische stroom lopen. Doordat elektronen en gaten aan verschillende kanten van de pn-overgang met elkaar recombineren, wordt er licht uitgezonden. De kleur van dat licht hangt af van de eigenschappen van de halfgeleider, zoals de bandkloof.

Al in 1907 slaagde H.J. Round (Marconi Electronics) erin om licht te genereren door een spanning aan te leggen over een halfgeleidend kristal van siliciumcarbide (SiC) [2]. De Rus Oleg Losev publiceerde in de jaren twintig en dertig van de twintigste eeuw ook verschillende artikelen over deze elektroluminescerende diodes werden gemaakt zonder een precies begrip van hun werking. In de jaren veertig werd het begrip van de fysica van halfgeleiders en hun elektronische bandstructuur sterk verbeterd, wat leidde tot de uitvinding van de transistor in 1947 (Nobelprijs voor Natuurkunde 1956 voor Shockley, Bardeen en Brattain). Dit maakte de weg vrij voor het gebruik van pn-overgangen voor leds met germanium en silicium (1955 J.R. Heines). Galliumarsenide (GaAs), een halfgeleider met een directe bandkloof, werd eerst gebruikt voor infrarode leds (1962) en vervolgens voor

lasers. Het duurde niet lang voordat rode en groene leds gemaakt konden worden op basis van galliumfosfide (GaP). Deze werden sterk verbeterd in de jaren zestig, onder andere dankzij onderzoek in Philips Laboratoria in Duitsland en Nederland [3].

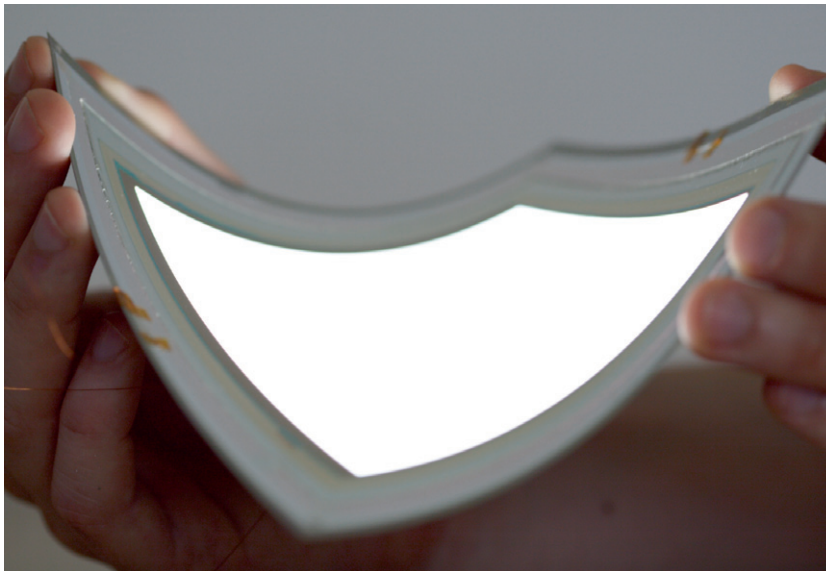
Het maken van leds die groen of rood licht uitzenden gebeurde al in de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw. Echter, voor het maken van wit licht is het essentieel om ook blauwe leds te hebben. Het maken van leds die blauw licht produceren, bleek nogal lastig. Verschillende bedrijven hebben het lange tijd geprobeerd maar gaven gaandeweg op. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano en Shuji Nakamura bleven volharden en slaagden er uiteindelijk toch in. Het produceren van halfgeleidende kristallen van voldoende zuiverheid en kwaliteit was een belangrijke uitdaging. Het gecontroleerd doperen (p-type) was een andere uitdaging die voor schier onmogelijk werd gehouden. Pas eind jaren tachtig (na meer dan tien jaar werk) slaagden Akasaki, Amano en Nakamura erin deze problemen op te lossen met een combinatie van materiaalkunde, device-fysica, optica en veel volharding.

Blauwe leds

Galliumnitride (GaN) bleek uiteindelijk het aangewezen materiaal voor het maken van blauwe leds. GaN heeft een bandkloof van 3,4 eV wat het mogelijk maakt om ultraviolet licht uit

te zenden. Akasaki en zijn promovendus Amano probeerden dan ook blauwe leds te maken van GaN. Ook Nakamura koos dit materiaal om aan te werken. Er waren twee belangrijke obstakels voor het maken van een blauwe led. Ten eerste was niemand in staat kristallen van voldoende kwaliteit te doen groeien [4]. Dit werd bemoeilijkt door het grote verschil in roosterafstand van GaN en het saffiersubstraat. Ten tweede was het erg moeilijk om p-type GaN te maken omdat dit vaak n-type gedoteerd is als gevolg van defecten en onzuiverheden.

In 1986 publiceerden Akasaki, Amano en anderen een methode om een GaN-kristal te laten groeien van hoge kwaliteit [5]. Ze deden dit door een bufferlaag van aluminiumnitride (AlN) op een substraat van saffier aan te brengen. Deze bufferlaag maakt het mogelijk om middels *metalorganic vapour phase epitaxy* (MOVPE) een GaN-kristal te laten ontstaan. MOVPE is een techniek waarmee samengestelde halfgeleiders gemaakt kunnen worden door geschikte uitgangsmoleculen met elkaar te laten reageren. Akasaki, Amano en hun medewerkers gebruikten deze techniek door eerst een laag AlN op een saffiersubstraat aan te brengen en vervolgens GaN te vormen. Aangezien AlN fysisch lijkt op zowel GaN als saffier, leek dit een erg geschikt tussenmateriaal [4]. De methode wierp zijn vruchten af, want de resulterende laag GaN was 's werelds eerste GaN-kristal van zeer hoge



Figuur 3 Een witte organische led geproduceerd door het Holst Centrum.

kwaliteit en vrij van scheuren, dislocaties et cetera [5].

Akasaki en Amano realiseerden nog een doorbraak: in 1989 slaagden ze erin om p-type GaN te maken. De lagen GaN die voor de introductie van de AlN-bufferlaag werden gemaakt, bevatten hoge concentraties donoren waardoor het n-type gedoteerd werd. Akasaki, Amano en hun medewerkers doteerden GaN met magnesium. Na activatie van dit magnesium (door het te beschieten met laagenergetische elektronen) ontstond p-type GaN [6]. De eerste GaN pn-overgang led was een feit [6] (zie figuur 2).

Shuji Nakamura begon in 1988 aan blauwe leds te werken. Hij bedacht zijn eigen methode om GaN van hoge kwaliteit te maken. Hij bouwde een andere opstelling voor het MOVPE-proces en kon zo GaN-lagen maken van hoge kwaliteit, zonder eerst een AlN-laag te gebruiken. In plaats van een AlN-bufferlaag, liet hij eerst bij lage temperatuur een bufferlaag van GaN groeien om vervolgens de temperatuur te verhogen en hoogwaardige GaN te deponeren [8].

Vervolgens bedacht hij, samen met zijn co-auteurs, een methode om GaN p-type te doteren [9] die makkelijker en goedkoper is dan die van Akasaki en Amano. Zij beschoten het gedoteerde GaN met een elektronenbundel om de acceptoren te activeren. Nakamura kon de acceptoren ook activeren door het materiaal op te warmen [9]. Hij kon ook verklaren waarom deze procedures hetzelfde resultaat hadden: in beide gevallen wordt het waterstof verwijderd dat

de effectieve dotering verhinderde. In 1993 kondigde Nichia Chemicals (het bedrijf waar Nakamura zijn onderzoek deed) aan dat het op grote schaal blauwe leds ging produceren. Heden ten dage vormen op GaN gebaseerde leds de dominante technologie voor energiebesparende lampen en voor beeldschermen in laptops, mobiele telefoons et cetera. Blauwe en ultraviolette GaN-lasers worden ook gebruikt in dvd's met hoge informatiedichtheid (Blu-Ray). Door de hoge efficiëntie waarmee deze leds elektriciteit omzetten in licht, verbruiken al deze technologieën minder energie. Zoals benadrukt door het Nobelcomité is deze prijs geheel in de geest van Alfred Nobel, namelijk voor een natuurkundige ontdekking die van groot nut is voor de mensheid.

Verdere ontwikkelingen

Blauwe leds zijn een groot succes en zijn de nieuwe standaard voor verlichting. Andere halfgeleiders kunnen wellicht ook concurreren voor verlichting. Een voorbeeld daarvan is het gebruik van organische halfgeleiders. Organische halfgeleiders zijn geconjugeerde moleculen die gebruikt kunnen worden als het actieve materiaal in transistoren, zonnecellen en leds. Philips, een van de pioniers op het gebied van organische leds, heeft dunne panelen ontwikkeld die wit licht uitstralen. Dergelijke panelen zijn gebaseerd op organische leds die rood, groen en blauw licht uitstralen. Door deze leds te stapelen ontstaat er wit licht (zie figuur 3).

Quantumdots, bolvormige clusters

van anorganische halfgeleiders met een typische doorsnede van enkele nanometers, geven ook goede resultaten in hybride organische/anorganische leds. Hun bandkloof en dus de kleur van het licht dat ze uitstralen is afhankelijk van hun grootte en kan dus makkelijk aangepast worden. Bovendien kunnen deze materialen vanuit oplossing worden verwerkt, waardoor je quantumdots bijvoorbeeld kan printen. In een recent artikel lieten Dai en collega's zien hoe ze van zulke anorganische nanodeeltjes efficiënte leds kunnen maken [10]. In de toekomst zullen nieuwe materialen mogelijk leiden tot nieuwe vormgeving, afmetingen en toepassingen, naast verdere verbeteringen in efficiëntie en kleurechtheid.

Referenties

- 1 E. F. Schubert en J. K. Kim, *Science* **308**, 1274 (2005).
- 2 H.J. Round, *Electr. World* **49**, 308 (1907).
- 3 H. G. Grimmeis en H. Koelmans, *Phys. Rev.* **123**, 1939 (1961).
- 4 I. Akasaki en H. Amano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 9001 (2006).
- 5 H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki en Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 353 (1986).
- 6 H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu en I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L2112 (1989).
- 7 S. Nakamura, T. Mukai en M. Senoh, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1687 (1994).
- 8 S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L1705 (1991).
- 9 S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh en T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 1258 (1992).
- 10 X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, X. Liang, L. Chen, J. Wang en X. Peng, *Nature* **515**, 96 (2014).