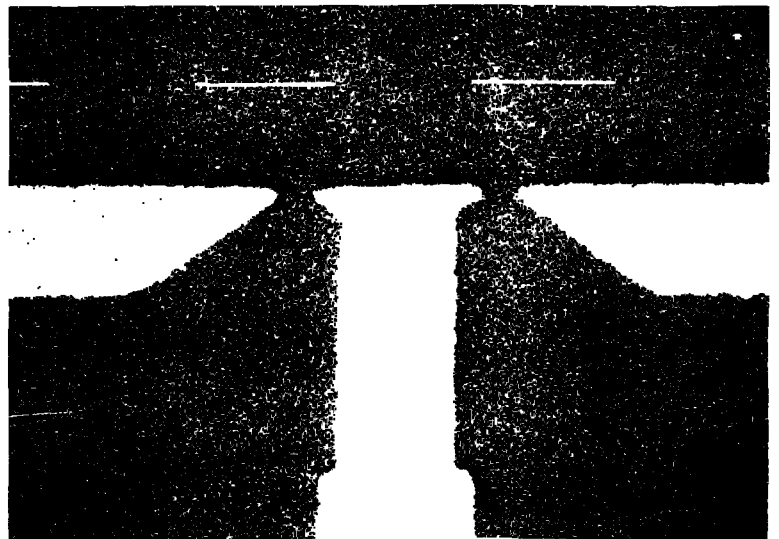


Overeenkomsten tussen de optica en de micro-elektronica

Schakelen met elektronen in nanostructuren

In het Natuurkundig Laboratorium van Philips doet een groep fysici onderzoek naar elektrische geleiding in halfgeleiders op nanometerschaal. Het blijkt dat nanostructuren kunnen werken als optische componenten voor elektronen: diafragma, lensspiegel, collimator en prisma zijn de voorlopers. Deze elektronen-optica maakt principieel nieuwe schakelementen mogelijk, maar vormt bovenal een uitdagend onderzoeksgebied.



Een transistor werkt als een kraan. Zoals het dichtdraaien van een kraan een mechanische barrière voor de waterstroom opwerpt, zo kan een elektrische stroom worden onderbroken door, via een elektrisch veld, een barrière voor de elektronen op te werpen. Een te kleine transistor lijkt op een lekende kraan: de stroom wordt door het opwerpen van een te kleine barrière niet volledig uitgeschakeld. Men kan dit probleem op twee manieren te lijf. Door verbeteringen in het ontwerp van de barrière kunnen men proberen het lek te dichten. Miniaturisatie is dan een hindernis. Het alternatief is het principe van de kraan voor de werking van de transistor overboord te gooien en op zoek te gaan naar een schakelprincipe dat beter werkt, naarmate de afmetingen kleiner zijn. Miniaturisatie is dan een vereiste. In een aantal industriële en universitaire laboratoria, wereldwijd verspreid, doet men intensief onderzoek naar ballistisch transport als

5. Een afbeelding van een gate-elektrode die twee puntcontacten bevat. De foto is genomen met een elektronenmicroscop. De horizontale witte streep heeft een lengte van 1 micron.

nieuwe mogelijkheid voor verdere miniaturisatie van transistoren. In Nederland gebeurt dat hoofdzakelijk in het Natuurkundig Laboratorium van Philips in samenwerking met de Delftse Technische Universiteit; elders in Europa onder andere in het Cavendish Laboratorium te Cambridge en in het Max-Planck Instituut te Stuttgart; in de Verenigde Staten in de laboratoria van IBM, AT & T en Bellcore en in Japan in de universiteit van Osaka en in het laboratorium van NTT. Ballistisch transport treedt op als de afmetingen van het schakelement kleiner worden dan de vrije-weglengte (de gemiddelde afstand tussen twee botsingen van het elektron met verontreinigingen). Bij temperaturen, die het absolute nulpunt

Prof. Dr. C.W.J. Beenakker
Dr. H. van Houten

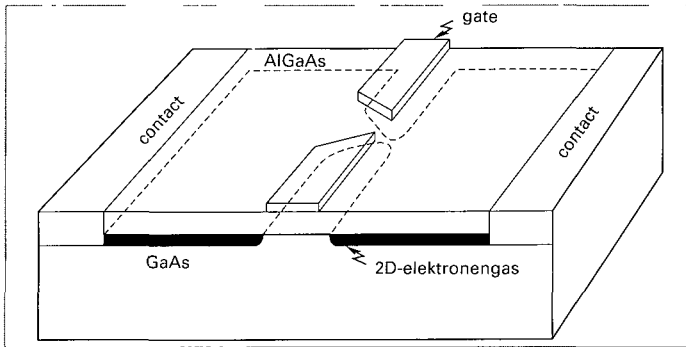
Beide auteurs zijn werkzaam op Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven, in de groep 'Advanced Experimental and Theoretical Physics'. De heer Beenakker is tevens bijzonder hoogleraar aan de Rijksuniversiteit Leiden.

benaderen, bewegen ballistische elektronen als kanonskogels door het materiaal met snelheden van wel 100 km/s (de Fermi-snelheid, aangeduid met v_f). Dit beeld van een elektron als een kanonskogel is natuurlijk een vereenvoudiging van de werkelijkheid. We weten immers dat het elektron zowel een golf- als een deeltjeskarakter heeft. De golflengte van het elektron met snelheid v_f en massa m is de De Broglie golflengte $\lambda = h/mv_f$ (h is de constante van Planck). Nieuwe verschijnselen tengevolge van het golfkarakter van de elektronen kan men verwachten zodra de

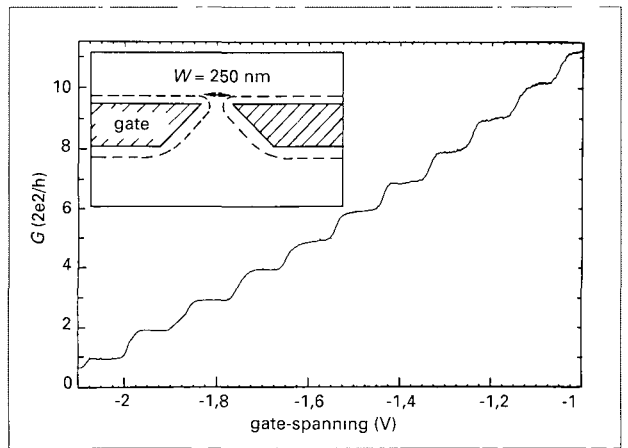
gate-elektrode vormt een ondoorlaatbare barrière met een kleine opening (een puntcontact). De breedte W van de opening is instelbaar tussen 0 en 300 nanometer met de (negatieve) spanning op de elektrode. De vrije-weglengte is veel groter dan W , wel 10 micron. Zo'n grote vrije-weglengte wordt bereikt door gebruik te maken van een structuur bestaande uit twee halfgeleiders, de mengkristallen gallium-arseen (GaAs) en aluminium-gallium-arseen (AlGaAs), die epitactiaal op elkaar zijn gegroeid. De donoren (silicium-atomen) bevinden zich in het AlGaAs, maar de

slechts bepaalde discrete waarden kan aannemen (figuur 2). We spreken van de quantisatie van het geleidingsvermogen. Het puntcontact heet vanwege deze eigenschap een quantum-puntcontact. Met het begrip 'quantisatie' wordt in de natuurkunde het verschijnsel aangeduid, dat sommige grootheden niet continu te variëren zijn, maar alleen voorkomen als gehele veelvouden van een elementaire hoeveelheid die een 'quantum' genoemd wordt. Een schoolvoorbeeld is de quantisatie van de elektrische lading, zoals aangetoond door de proef van Milikan. Het bijbehoren-

2. Quantisatie van het geleidingsvermogen van een quantum-puntcontact. Een geleidelijke verbreding van de opening in de gate-elektrode (door het variëren van de gatespanning) veroorzaakt een stapsgewijze toename van het geleidingsvermogen. De stapgrootte $2e^2/h$ hangt alleen af van fundamentele natuurconstanten.



1. Doorsnede van een quantum-puntcontact in een tweedimensionaal elektronengas.

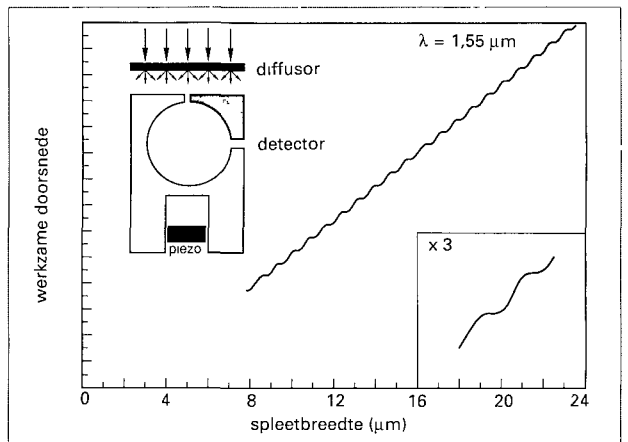


afmetingen van het schakelement van dezelfde orde van grootte zijn als de golflengte. Voor metalen is dat niet goed te verwezenlijken, aangezien λ daar zeer klein is (ongeveer 0.5 nanometer). In een halfgeleider kan λ echter wel 100 keer zo groot zijn als in een metaal. De golflengte is dan zo'n 50 nanometer, vergelijkbaar met de resolutie van de elektronenbundel-lithografie die wordt gebruikt om de miniatuur schakelementen te vervaardigen. Vanwege de overeenkomst tussen elektronengolven en lichtgolven spreken we in dit verband van elektronen-optica. Hiermee wordt bedoeld, dat we elektrische componenten kunnen fabriceren, die het analogon zijn van bekende optische componenten.

Diafragma

Een mooi voorbeeld van zo'n analogie tussen de optica en de micro-elektronica is het quantum-puntcontact (figuur 1). Het elektrische veld opgewekt door een tweedelige

elektronen bevinden zich in een dunne laag in het GaAs (op het grensvlak met het AlGaAs). Door de ruimtelijke scheiding wordt verstrooiing van de elektronen aan de donoren tot een minimum beperkt. Omdat de elektronen in de dunne laag slechts vrij in een vlak kunnen bewegen, spreken we van een tweedimensionaal (2D) elektronengas. Een stroom I van elektronen wordt opgewekt door het aanbrengen van een spanningsverschil V tussen twee Ohmse contacten, aan weerszijden van het puntcontact. De grootte van de stroom is afhankelijk van de breedte van de opening in de barrière en dus van de spanning op de gate-elektrode. Hoe breder de opening, des te groter de stroom, dat zal niemand verbazen. Wat verbazend is, is dat de stroom bij het verbreden van de opening niet gelijkmatig toeneemt, maar stapsgewijs. De verhouding tussen I en V is het geleidingsvermogen G . De stapsgewijze toename van de stroom heeft tot gevolg, dat G



de quantum van lading is de lading e van een enkel elektron. Van recentere datum is het quantum-Hall-effect, in 1980 door de Duitser Klaus von Klitzing ontdekt. Hij ontving hiervoor vijf jaren later de Nobelprijs. Het quantum van geleidingsvermogen dat bij zowel het quantum-Hall-effect als het quantum-puntcontact optreedt, is e^2/h . Deze combinatie van natuurconstanten correspondeert met een

3. Het optisch analogon van het quantum-puntcontact. De hoeveelheid licht door een spleet neemt stapsgewijs toe met de spleetbreedte. Een diffusor zorgt voor de noodzakelijke belichting in een vlak loodrecht op de spleet. Een piezo-elektrisch element varieert de breedte van de spleet. De detectie van het doorgelaten licht heeft plaats via een integrerende bol achter de spleet.

weerstand van 25 813 Ohm. Ondanks de overeenkomst tussen deze twee kwantisatieverschijnselen kwam de ontdekking van het gequantiseerde geleidingsvermogen van het quantum-puntcontact als een verrassing. Het effect is eind 1987 ontdekt door het bovengenoemde samenwerkingsverband tussen Delft en Philips [1] en ongeveer gelijktijdig door een groep onderzoekers in Cambridge [2]. Het quantum-puntcontact heeft een analogie in de optica. We vergelijken het met een gaatje in een scherm waarvan we de opening kunnen variëren, zoals bij voor-

ning (figuur 3) [4]. In dat geval neemt de werkzame doorsnede per eenheid van lengte van de spleet toe met stappen van $\lambda/2$. De overeenkomst tussen figuren 2 en 3 is een treffende illustratie van het golfkarakter van de elektronen.

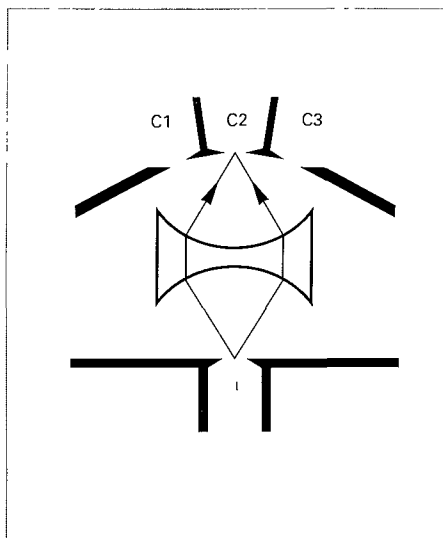
Lens en spiegel

Een lens voor elektronen kan op twee manieren worden gemaakt: met elektrische of met magnetische velden. Een elektrische lens werd onlangs vervaardigd door een groep onderzoekers van IBM (figuur 4) [5]. Een bundel elektronen komende uit een puntcontact wordt op

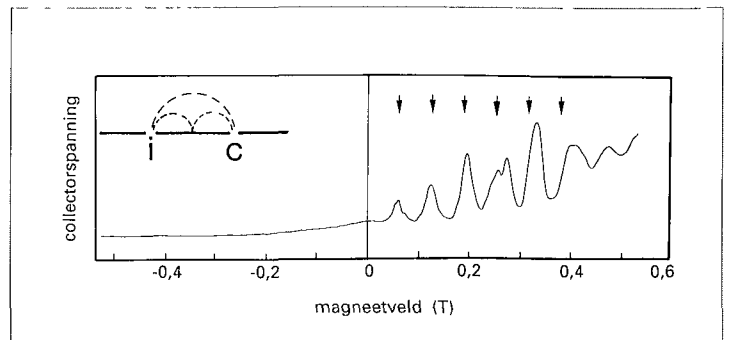
puntafstand van deze magnetische lens is instelbaar door B te variëren. In tegenstelling tot een gewone optische lens heeft deze magnetische lens meer dan één brandpunt.

De afstand tussen de brandpunten (gemeten langs de lijn die de twee puntcontacten verbindt) is de diameter van de cirkelbaan die een elektron in het magnetisch veld doorloopt.

Deze zogenaamde cyclotrondiameter D is gegeven door $D = 2mv_F/eB$. Als L een veelvoud is van D , worden de elektronen van het ene puntcontact (de injector) op het andere puntcontact (de collector) gefocus-



4. Een focuserende lens voor elektronen is hol in plaats van bol.



6. Magnetische focusering van elektronen, gedetecteerd door een serie pieken in de collectorspanning. De pijlen geven de berekende positie van de pieken weer, op veelvouden van het focuseringsmagnetisch veld B_f .

beeld een diafragma in een fototoestel. Een belangrijke eigenschap van een diafragma is de hoeveelheid licht die het gaatje doorlaat, als we het gedurende een bepaalde belichtingstijd openzetten. We spreken van het doorgelaten vermogen. Het doorgelaten vermogen, gedeeld door het ingestraalde vermogen per eenheid van oppervlak, staat bekend als de werkzame doorsnede van het diafragma. Beschouw nu het geval, dat het gaatje van alle zijden met licht van een enkele golflengte λ belicht wordt. Hoe groter het gaatje, des te meer licht het doorlaat. Het bijzondere is nu, dat deze toename niet geleidelijk gaat, maar stapsgewijs. De werkzame doorsnede van het diafragma kan slechts discrete waarden aannemen die een veelvoud zijn van $\lambda^2/2\pi$ [3]. Dit effect is onlangs op het Natuurkundig Laboratorium gemeten bij een spleetvormige ope-

een tegenoverliggende puntcontact gefocuseerd door middel van een lensvormige elektrode tussen de puntcontacten. Het elektronengas onder de elektrode heeft een lagere elektronendichtheid dan erbuiten (in het geval van een negatieve spanning op de elektrode). In de optica correspondeert dat met een lagere brekingsindex. Zoals te zien in figuur 4, is een focuserende elektrode hol en niet bol (wat een focuserende optische lens zou zijn). Het verschil ontstaat, omdat de gebruikelijke optische lens een hogere brekingsindex heeft dan de omgeving.

Ook een magnetisch veld kan elektronen focuseren. In een Philips/Delft experiment zijn twee nevenliggende puntcontacten gebruikt (figuur 5) [6]. De afstand L tussen de puntcontacten is een paar micron. Het magnetisch veld B staat loodrecht op het 2D-elektronengas. De brand-

seerd (figuur 6). Dit is het geval als B een veelvoud is van het focuseringsmagnetisch veld $B_f = 2mv_F/eL$. Steeds als een brandpunt samenvalt met de collector meten we een piek in de collectorspanning. Een grafiek van de collectorspanning als functie van B bestaat dus uit een serie pieken met periode B_f .

De p -piek in figuur 6 ontstaat ten gevolge van elektronen die $(p - 1)$ maal weerkaatst zijn door de wand tussen de beide puntcontacten. Voor focusering is het noodzakelijk dat deze weerkaatsing zuiver spiegelend is.

Het feit dat in het experiment een serie focuseringspieken wordt waargenomen, is dus een bewijs voor spiegelende weerkaatsing. Dit is een uitzonderlijke situatie: in metalen is de weerkaatsing van elektronen aan een wand in het algemeen diffuus in plaats van spiegelend. Diffuse weerkaatsing

van licht treedt bij voorbeeld op als een spiegel beslagen is. Voor spiegellende weerkaatsing is het nodig dat de wand geen oneffenheden bevat op de schaal van de golflengte. Door de grote golflengte van elektronen in het 2D-elektronengas is aan deze eis eenvoudig te voldoen. In een metaal echter, is een zuivere spiegel voor elektronen, door de 100 keer kleinere golflengte, bijna niet te realiseren.

Collimator en prisma

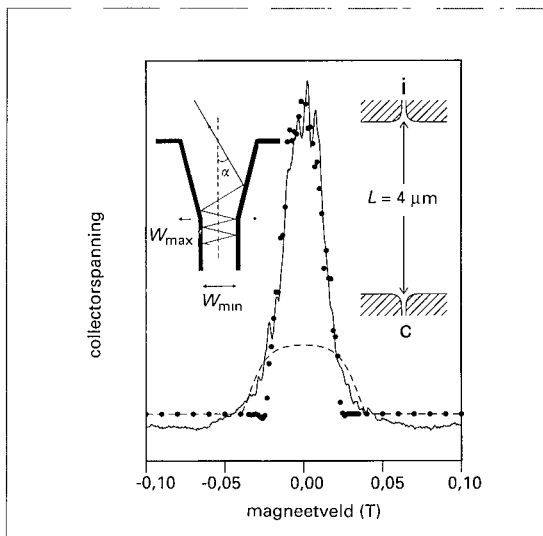
In de optica is een collimator een element dat de openingshoek van een lichtbundel verkleint. Een punt

eenstorten, kunnen we de openingshoek bepalen. In het afgebeelde experiment bleek $\Delta\alpha = 65^\circ$. Deze vrij zwakke collimatie zorgt toch voor een grote versterking van de collectorspanning, vergeleken met een niet gecollimeerde bundel (vergeleijk de getrokken met de onderbroken lijn in figuur 7). In dit experiment is de gecollimeerde bundel gestuurd door een magnetisch veld. Bundelsturing is ook mogelijk met elektrische velden, zoals is gedemonstreerd door onderzoekers van AT & T (figuur 8) [9]. Zij fabricerden wat men het elektronische analogon van een prisma zou kunnen

Wat in elk geval van blijvende waarde is, en wat een belangrijke motivatie was voor het onderzoek, is het nieuw verkregen inzicht in de elektrische geleiding op nanometerschaal.

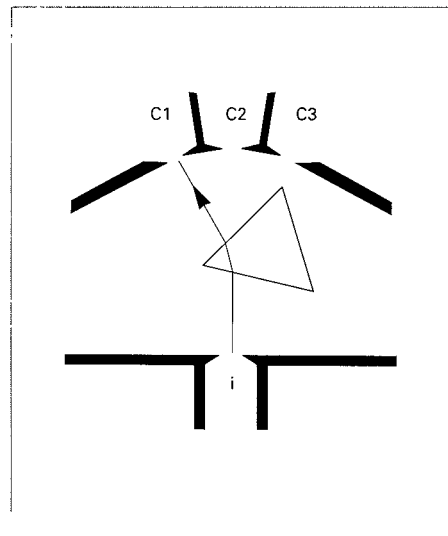
Literatuur

1. Van Wees, B.J., Van Houten, H., Beenakker, C.W. J., Williamson, J.G., Kouwenhoven, L.P., Van der Marel, D. en Focon, C.T., Physical Review Letters 60, blz. 848-85- (1988).
2. Wharam, D.A., Thornton, T.J., Newbury, R., Pepper, M., Ahmed, H., Frost, J.E.F., Hasko, D.G., Peacock, D.C. Ritchie, D.A. en Jones, G.A.C., Journal of Physics C21, blz. L209-L214 (1988).



7. Een gecollimeerde bundel elektronen wordt door puntcontact i in een 2D-elektronengas geïnjecteerd, en door een puntcontact c gedetecteerd. De afbuiging van de bundel door een zwak magnetisch veld uit zich in het ineenstorten van de collectorspanning. De getrokken lijn en de zwarte punten zijn gemeten en berekend. De gestippelde lijn is de berekende collectorspanning voor een niet-gecollimeerde bundel.

8. Afbuiging van een bundel elektronen door middel van een gate-elektrode, die als een prisma voor elektronen werkt.



contact werkt als een collimator voor elektronen. De werking berust op het toetereffect (figuur 7). Als het puntcontact aan de uitgang langzaam breder wordt, van een minimale breedte W_{min} tot een veel grotere maximale breedte W_{max} , dan zal de bundel elektronen die het puntcontact verlaat, een openingshoek $\Delta\alpha$ hebben die ongeveer wordt gegeven door:

$$\Delta\alpha = 2W_{\text{min}}/W_{\text{max}} [7].$$

Op het Natuurkundig Laboratorium is collimatie van elektronen aangehouden door gebruik te maken van twee puntcontacten achter elkaar (figuur 7) [8]. Het ene puntcontact injecteert een gecollimeerde bundel elektronen in het 2D-elektronengas, die door het andere puntcontact gedetecteerd wordt. Een zwak magnetisch veld (loodrecht op het elektronengas) buigt de bundel af. Door te meten welke veldsterkte nodig is om de collectorspanning te doen in-

noemen. De werking van dit element berust op hetzelfde principe als de reeds besproken elektrische lens. Dezelfde groep onderzoekers toonde aan dat twee bundels van elektronen elkaar loodrecht kunnen kruisen zonder wederzijdse wisselwerking, geheel analoog aan twee lichtbundels. In principe biedt dit de mogelijkheid tot integratie van meer dan één elektrisch signaal in hetzelfde element, met verwaarloosbare overspraak.

Tenslotte

De elementaire bouwstenen van de elektronen-optica zijn gerealiseerd: diafragma, lens, spiegel, collimator en prisma. Maar de weg naar een praktisch werkende schakeling is lang en vol hindernissen. In het bijzonder de lage temperatuur, noodzakelijk voor de goede werking van de huidige experimenten, vormt een obstakel voor de toepassing.

3. Van Houten, H. en Beenakker, C.W.J., artikel in: "Analogies in Optics and Micro-Electronics", onder redactie van W. van Haeringen en D. Lenstra (Kluwer, Dordrecht, 1990).
4. Montie, E. A., Cosman, E.C., 't Hooft, G.W., Van der Mark, M.B. en Beenakker, C.W.J., artikel ter publikatie aangeboden aan Nature.
5. Sivan, U., Heiblum, M., Umbach, C.P. en Shtrikman, H., Physical Review B41, blz 7937-7940 (1990).
6. Van Houten, H., Van Wees, B.J., Mooij, J.E., Beenakker, C.W.J., Williamson, J.G. en Focon, C.T., Europhysics Letters 5, blz. 721-725 (1988).
7. Beenakker, C.W.J. en Van Houten, H., Physical Review B39, blz. 10445- 10448 (1989).
8. Molenkamp, L.W., Staring, A.A.M., Beenakker, C.W.J., Eppenga, R., Timmering, C.E., Williamson, J.G., Harmans, C.J.P.M. en Focon, C.T., Physical Review B41, blz. 1274-1277 (1990).
9. Spector, J., Stormer, H.L., Baldwin, K.W., Pfeiffer, L.N. en West, K.W., Applied Physics Letters 56, blz. 2433-2435 (1990).