

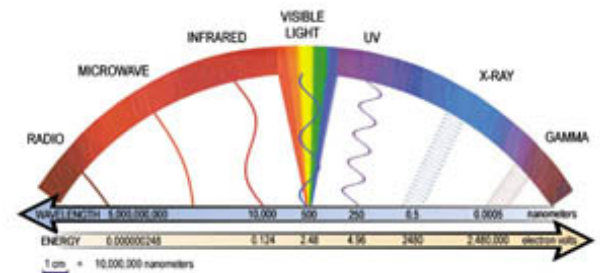
## Straling vangen in een putje

*De tandarts kijkt voortaan  
via zijn scherm in uw mond*



door rob van der berg

*Detectie van ioniserende straling is, zonder dat men er zich vaak van bewust is, onderdeel van het dagelijkse leven. Denk aan bagage-inspectie op luchthavens en diverse technieken die worden gebruikt in de medische diagnostiek. Belangrijk is niet alleen dat straling wordt gedetecteerd maar ook het*

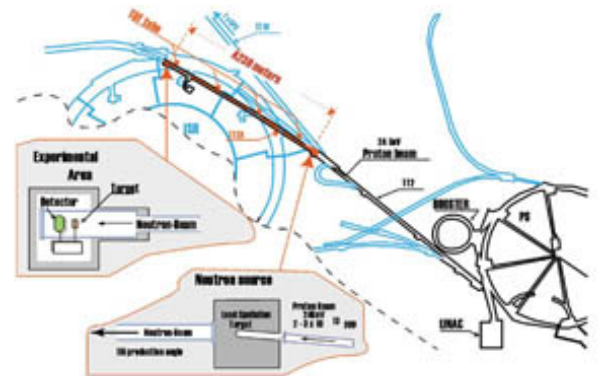


Elektromagnetisch spectrum van radiogolf tot gammastraling. (afbeelding: nasa/cxc/sao)

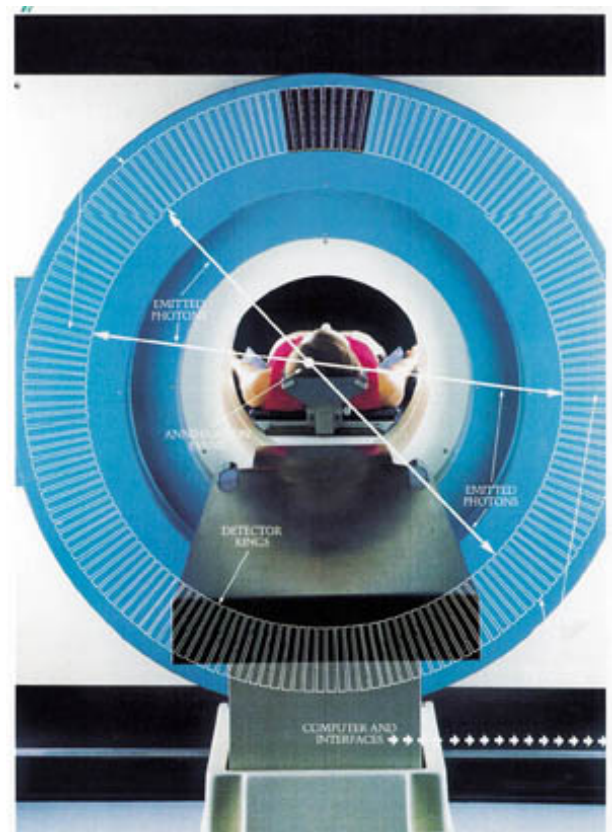


*tijdstip  
 waarop en de  
 positie zijn  
 van belang.  
 Dit laatste  
 kan  
 uitstekend  
 met sensoren  
 gebaseerd op  
 silicium  
 gefabriceerd  
 met ic-  
 technologie.  
 De meeste  
 straling  
 vliegt er  
 echter gewoon  
 dwars  
 doorheen  
 omdat silicium  
 te licht is.  
 De Franse  
 natuurkundige  
 Cédric  
 Allier,  
 promovendus  
 bij het  
 Delftse  
 Interfacultair  
 Reactor  
 Instituut,  
 combineerde  
 moderne  
 lichte Si-  
 sensoren met  
 traditionele  
 zware  
 scintillatie-  
 kristallen.  
 Weinig  
 straling en  
 toch scherp  
 beeld,  
 dankzij de  
 scintillator-  
 chip. Daarmee  
 worden  
 bijvoorbeeld  
 tussenopnamen  
 van een gebit  
 via  
 fotogevoelige  
 filmpjes  
 overbodig. De  
 tandarts kan  
 voortaan  
 rechtstreeks  
 via zijn pc-  
 scherm in de  
 mond van de  
 patiënt*

Nu nog worden opname van een gebit gemaakt met röntgenstraling en een fotogevoelig filmpje. Bij het streven naar lagere stralingsdosis, digitale bewerking en opslag, wordt druk gewerkt aan de ontwikkeling van nieuwe detectoren die werken op basis van scintillatoren. (foto: faculty of dentistry, dalhousie university, canada)



n-tof (neutron time of flight) is een Europese neutronenbron die nu bij cern (Zwitserland) wordt gebouwd. Deze neutronenbron wordt bijvoorbeeld gebruikt voor de studie van reactieprocessen die van belang zijn voor de vorming van de sterren. Hiervoor zijn geavanceerdere detectoren nodig. (bron: cern/sl/eet)



kijken.

Mensen worden aanhoudend omgeven door straling, maar via onze zintuigen zijn we eigenlijk heel slecht uitgerust om al die verschillende soorten – van radiogolven via ultraviolet licht tot gammastraling – waar te nemen. Alleen met behulp van geavanceerde apparatuur kunnen we in beeld brengen waar we zelf blind voor zijn: een minuscule verharding in borstweefsel, de hoeveelheid olie of gas in een diepe boorput, het vloeistofniveau in een stalen reactor, of een subatomair deeltje dat ons gedurende een fractie van een seconde een blik gunt op de ultieme bouwstenen van de materie. In veel van de hiervoor gebruikte stralingsdetectoren bevinden zich kristallen die de voor ons onzichtbare deeltjes of straling omzetten in een zichtbaar lichtflitsje. Met dergelijke scintillatoren, zoals deze kristallen worden genoemd, kunnen röntgenstralen, gammastralen of neutronen worden 'betreft'.

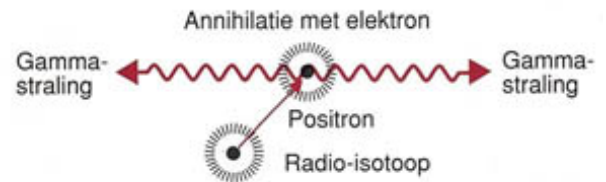
In de groep Instrumentatie Stralingsonderzoek van het Delftse Interfacultair Reactor Instituut wordt onder leiding van prof. dr. C.W.E. Van Eijk al jaren onderzoek gedaan om dergelijke kristallen en de detectoren waarin ze zitten te verbeteren: want het kan altijd gevoeliger en nog nauwkeuriger.

De Franse natuurkundige Cédric Allier, afgestudeerd aan de Universit  de Strasbourg, heeft de afgelopen vier jaar gewerkt aan een sensor waarmee de positie van een invallend neutron of gammafoton tot op de millimeter nauwkeurig kan worden bepaald. Om zoiets in miniatuur op een chip voor elkaar te krijgen, heb je een brede blik nodig. Niet alleen moet men alles afweten van scintillatoren, maar ook van chiptechnologie en van materiaalbewerking op microschaal. Het principe van de detector, daarentegen, is snel uitgelegd.

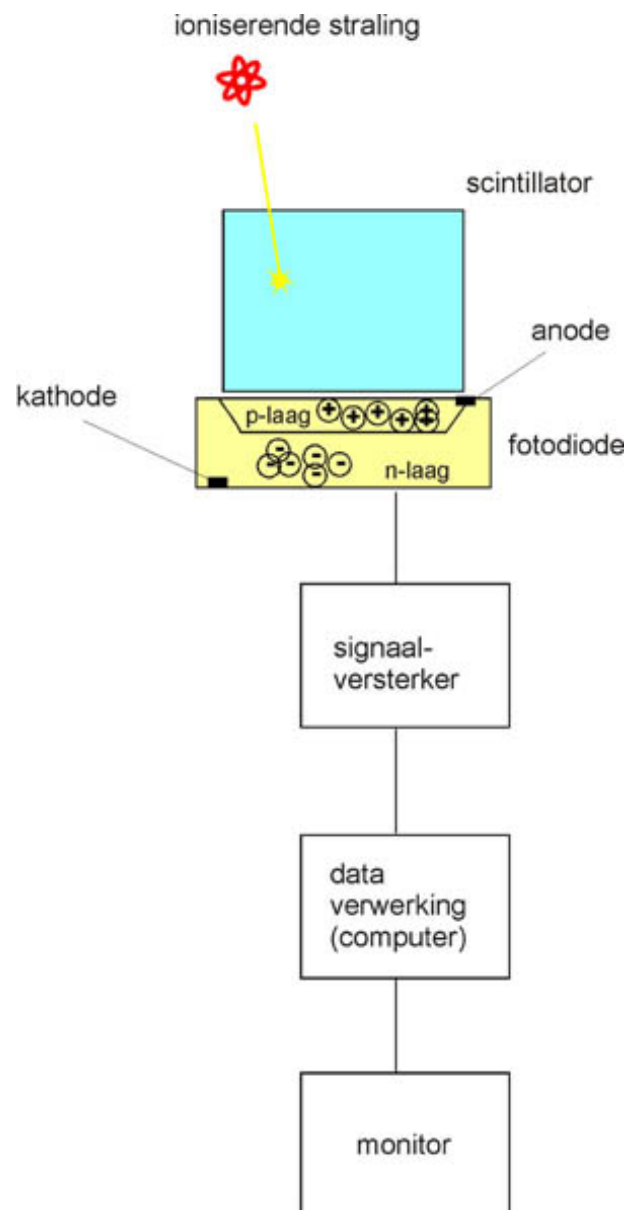
Allier: 'We wilden een tweedimensionaal matrix van scintillatie-kristallen maken, ingebed in putjes in een dunne plak silicium met in de onderkant daarvan flinterdunne fotodiodes. Alleen op de plek waar het binnenkomende deeltje in de scintillator valt, wordt een signaal door de fotodiode gegenereerd. De grootte en de onderlinge afstand van de afzonderlijke putjes of pixels bepalen in dat geval de resolutie van de detector. Het grote voordeel van het gebruik van silicium is dat de fotodiode waarmee we de lichtflitsjes moeten detecteren in de bodem van de putjes, kan worden geïntegreerd.'

### Natte methode

Allereerst moest dus in een plak silicium van een halve millimeter dik een regelmatig patroon van putjes worden aangebracht, van minder dan een millimeter in het vierkant en met een bodem van niet meer dan  en tienduizendste millimeter dikte. Zoveel is namelijk minimaal nodig om een fotodiode te fabriceren. Dat gebeurde bij dimes, de experimentele chipfabriek van de tu Delft. Nu is het eigenlijk geen enkel probleem om silicium weg te etsen. Dat kan op de «natte», chemische manier met behulp van een basische oplossing of door gebruik te maken van een



Bij een Positron Emissie Tomografie-camera (pet) wordt gekeken naar stofwisselingsprocessen in het lichaam. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschijnsel dat er twee gamma- kwanta tegelijkertijd en in tegengestelde richting worden uitgezonden wanneer een elektron met een positron annihileert («reageert»). Om bijvoorbeeld de doorstroming van het hart in beeld te brengen, moet de patiënt een radioactief drankje innemen. Door daarna de straling te meten, kan met zo'n 500.000 annihilaties een beeld worden gevormd van de hartstreek.



plasmabundel (de «droge» methode). Omdat het silicium niet overal mag verdwijnen, moest er een patroon worden aangebracht met behulp van fotolithografische technieken, zoals die in de chipsindustrie gemeengoed zijn. Daarna probeerde Allier om met een oplossing van kaliumhydroxide het silicium op te lossen. Maar daarbij stuitte hij op problemen.

'Het was moeilijk te bepalen wanneer je moet stoppen en de wafer uit het etsbad moet halen. Bovendien was het moeilijk om de putjes precies de juiste rechthoekige vorm te geven, omdat een siliciumkristal niet in alle richtingen even snel oplost.'

### Radicalen

Na een aantal vruchteloze pogingen besloot hij een beroep te doen op een andere expertise van dimes waar men ook ruime ervaring heeft met het plasma-etsen. Daarbij worden met behulp van een radiofrequente gasontlading moleculen van het reactieve zwavelhexafluoride en van zuurstof gedeeltelijk ontdaan van hun elektronen en in kleinere stukken ('radicalen') opgebroken. Wanneer het silicium wordt blootgesteld aan de reactieve brokstukken waaruit dit plasma bestaat, maken de radicalen atomen los uit het kristal. Daardoor wordt het kristal atoomlaag voor atoomlaag uitgehold. Bij dimes was men echter niet gewend om diepe structuren te maken.

Allier: 'Dat lijkt misschien heel eenvoudig, maar er zijn een heleboel parameters die een rol gaan spelen wanneer je dieper wilt gaan. Zo raken de wanden op bepaalde plaatsen elektrisch geladen, waardoor de plasmabundel wordt afgebogen. Verder heeft de samenstelling van het gasmengsel waaruit het plasma wordt gevormd grote invloed op de vorm van de wanden. Wanneer de verhoudingen niet goed zijn, komen de wanden scheef te staan of worden ze juist naar beneden toe afgerond.'

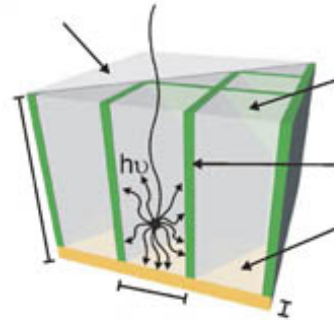
Het grootste probleem was echter de vorming van het zogenoemde 'zwarte silicium', dunne pilaartjes die ontstaan wanneer door vervuiling aan het oppervlak het etsproces plaatselijk wordt tegengehouden. Bij dimes lukte het niet goed om het diepe etsen onder de knie te krijgen, daarom werd een beroep gedaan op de 'concurrent', het instituut mesa van de Universiteit Twente. Daar slaagde ir. Meint de Boer er uiteindelijk in om na een jaar van vallen en opstaan de putjes zo goed als volmaakt te krijgen.

### Resistent

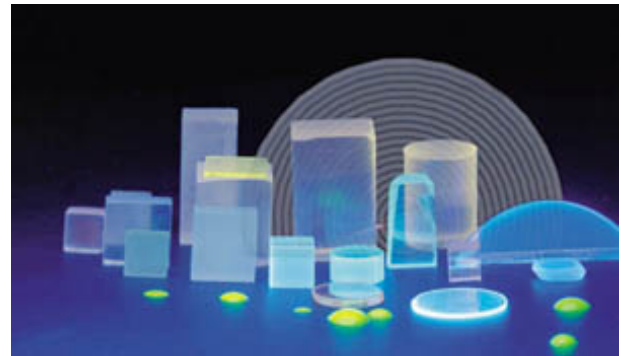
Maar daarmee was men er nog niet.

Allier: 'We moesten er zeker van zijn dat tijdens het etsen de fotodiode op de bodem niet werd aangetast. Om dat echt te kunnen uitsluiten, hebben we een truc bedacht. We hebben twee «op elkaar geplakte» siliciumwafers gebruikt. Op het grensvlak van de twee siliciumlagen bevindt zich een dun oxydelagje dat resistent is tegen de plasmabundel. Daardoor hoefden we niet meer op te letten of we niet te diep zaten. We konden gewoon doorgaan tot we op de laag stuitten waar de twee wafers aan elkaar vastzaten.'

Stralingsmeting met een scintillator met een fotodiode. Het licht dat na absorptie van straling wordt gegenereerd valt op de fotodiode, een lichtgevoelig halfgeleidermateriaal. Een aantal elektronen in de diode worden aangeslagen en migreren naar de kathode. De achtergelaten gaten worden ingenomen door elektronen uit de anode. Het aantal elektronen is een maat voor de straling die op de scintillator is gevallen.



Basisontwerp voor de geminiaturiseerde neutronen-, gamma-, of röntgenstralendetector van Cédric Allier op een chip. De hokjes, gevuld met scintillatoren elk met onderin een minuscule fotodiode, hebben een vloeroppervlak van slechts 1 mm<sup>2</sup>.



Scintillatoren zijn kristallen die licht geven (luminesceren) wanneer er ioniserende straling opvalt. De luminescentie van deze kristallen kan variëren van het ultraviolette tot het rode deel van het zichtbare spectrum, afhankelijk van het soort kristal waarvan de scintillator is gemaakt. Er zijn thans zo'n twintig soorten kristallen in gebruik in commerciële toepassingen.

De onderste wafer werd zodanig gepolijst dat nog maar tien micron overbleef en vervolgens werden bij dimes met een standaardmethode de fotodioden in de onderste laag gefabriceerd.

Het vullen van de putjes met scintillatiemateriaal was daarna eigenlijk niet echt moeilijk meer. Door het materiaal vanuit een voorraadvat te laten verdampen en neer te laten slaan in de putjes, werd het in kristallijne vorm aangebracht. Het bleek echter even goed mogelijk om de putjes te vullen met een fijn poeder en dit vervolgens met een soort gel te fixeren.

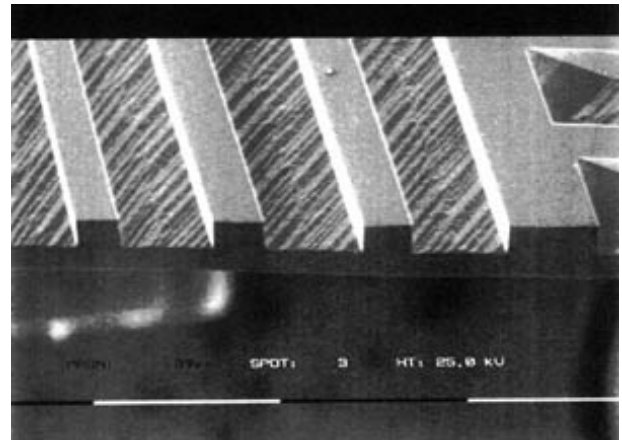
### Theoretische onderbouwing

Hoewel Allier nauw betrokken was bij al dit experimentele werk kon hij veel aan anderen uitbesteden en had hij de gelegenheid om zich bezig te houden met een theoretische onderbouwing van zijn ontwerp. Want het stond nog lang niet vast dat het ook echt zou werken.

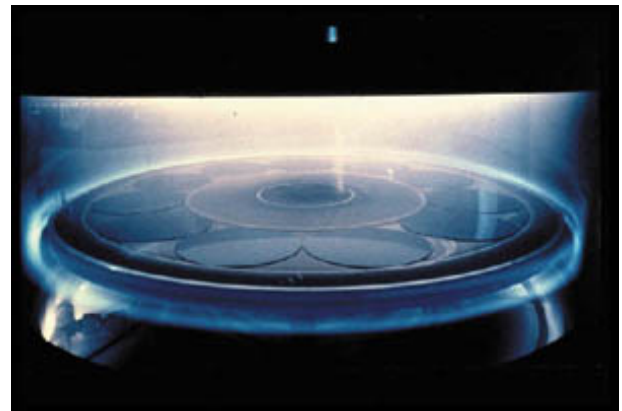
Allier: 'We wisten eigenlijk niet eens of het mogelijk was om een binnenkomend neutron of gamma foton af te stoppen in een laagje scintillatiemateriaal van maar een halve millimeter dik. De energie van een invallend deeltje moet over die kleine afstand worden geabsorbeerd. Een gammafoton moet daarvoor in de scintillator een zwaar atoom raken en daaruit een elektron vrijmaken. Dit schiet dan met grote energie het kristal in en genereert op zijn beurt een stroom aan elektronen en (positieve) gaten. Wanneer die recombineren, komt er energie vrij in de vorm van een lichtflitsje. Datzelfde gebeurt uiteindelijk nadat een neutron is opgevangen door een atoomkern, al worden de elektrongat-paren in dat geval gecreëerd door energierijke brokstukken van het kernverval dat door het neutron in gang wordt gezet.

Afhankelijk van de samenstelling van het scintillatiemateriaal zijn er echter talloze nevenreacties mogelijk. Gelukkig is er veel bekend over de waarschijnlijkheid waarmee elk van die reacties optreedt. Die kennis is onder andere vergaard door onderzoekers van cern, het internationale laboratorium bij Genève waar met versnellers onderzoek wordt gedaan naar subatomaire deeltjes. Voor detectie van de bij botsingen ontstane deeltjes worden namelijk ook scintillatiedetectoren gebruikt. Allier kon daarom dankbaar gebruik maken van een computerprogramma om te simuleren wat er in zijn kristallen gebeurde. Hij gebruikte daarvoor de Monte-Carlomethode.

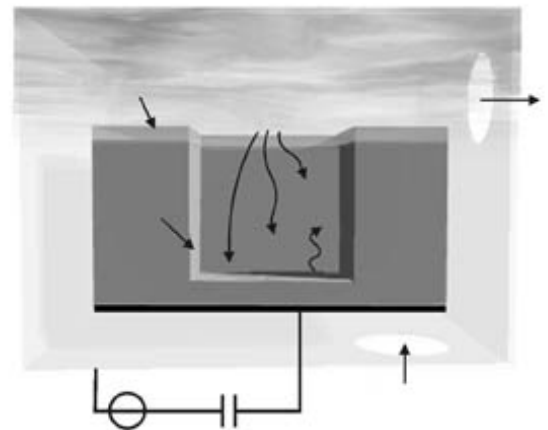
Allier: 'De interactie van een invallend neutron of gamma foton in onze detector is een statistisch proces. Je laat daarom in de computer neutronen of gamma's een voor een los op een blokje scintillatiemateriaal. Als je dat een heleboel keer herhaalt, krijg je een beeld van wat er kan gebeuren.' Voor gamma-fotonen in een energiegebied van 50 tot 70 keV – een voor medische toepassingen belangrijk gebied – bleek de halve millimeter dikke laag ruim voldoende te zijn om vijftig tot negentig procent van alle inkomende fotonen te detecteren. Simulaties wezen verder uit dat zelfs wanneer de putjes met poeder zouden worden gevuld (hetgeen niet erg



sem-opname van de resultaten van de zogeheten natte etsmethode (een oplossing van kaliumhydroxide) om relatief diepe gaten in silicium te maken met een rechte wand. Helaas was de bodem op deze manier niet goed vlak te krijgen.



Siliciumwafers in een plasma-etsmachine. (foto: bell labs, the research and development arm of lucent technologies)



Schematische weergave van de opstelling voor de zogeheten droge etsmethode, waarbij de chip in een plasma wordt gebracht. De daarop volgende chemische en fysische reacties zorgen ervoor dat het silicium wordt weggeëtsd met een snelheid van  $5 \mu\text{m}$  per minuut.

efficiënt zou zijn vanwege het grote verschil in dichtheid tussen een kristal en een poeder), de absorptie voor neutronen meer dan voldoende zou zijn.

### Verloren licht

Tenslotte rekende Allier ook nog uit wat er gebeurt met de lichtflitsjes die uiteindelijk ontstaan. Niet alle fotonen zullen immers de fotodiode bereiken, omdat ze worden geabsorbeerd aan de wanden van het putje of in het scintillatiemateriaal zelf. De helft van het licht gaat in principe al verloren, omdat het aan de bovenkant ontsnapt. Maar dat kan eenvoudig worden voorkomen door daar een reflecterend materiaal aan te brengen.

Allier: 'We konden berekenen dat we zo'n dertig procent van alle fotonen ook echt kunnen detecteren. Dat zou in de toekomst nog een factor twee beter kunnen door de wanden van het putje te bekleden met aluminium. Ook moeten we de elektronische ruis in de fotodiode nog beter gaan onderdrukken. Op dit moment ligt de experimentele detectielimiet voor gammafotonen dan ook bij de 250 keV, en dat is nog te hoog voor medische toepassingen.'

De detector zou nu al wel kunnen worden ingeschakeld bij het onderzoek van materialen met behulp van neutronen of de structuurbepaling van allerlei biologisch interessante moleculen. Volgens prof. C.W.E. van Eijk, de directe begeleider van Allier wordt er op dit moment op verschillende plaatsen in de Verenigde Staten, Japan en Europa gewerkt aan nog intensere neutronenbundels en, parallel daaraan, aan de ontwikkeling van nieuwe instrumentatie om de energie en de positie van neutronen nauwkeurig en efficiënt te kunnen vaststellen. 'Want je kunt wel intensere bundels maken,' zegt Van Eijk, 'maar je zult ook moeten blijven schaven aan de ontwikkeling van detectoren.'

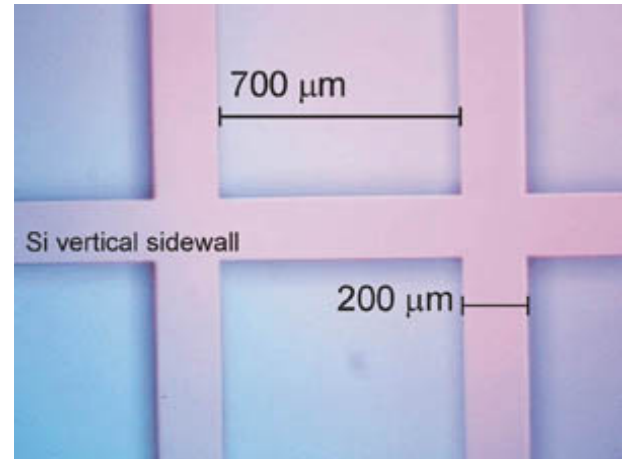
Voor nader informatie over dit onderwerp kunt u contact opnemen met

ir. Cédric Allier,  
tel. +33 4 76.41.82.32,  
e-mail: philippe.allier@u-grenoble3.fr ,  
of met prof. C. van Eijk,  
tel. (015) 278 6559,  
e-mail: vaneijk@iri.tudelft.nl,  
of met dr. P. Dorenbos,  
tel. (015) 278 1336,  
e-mail: dorenbos@iri.tudelft.nl,  
fax (015) 278 6422

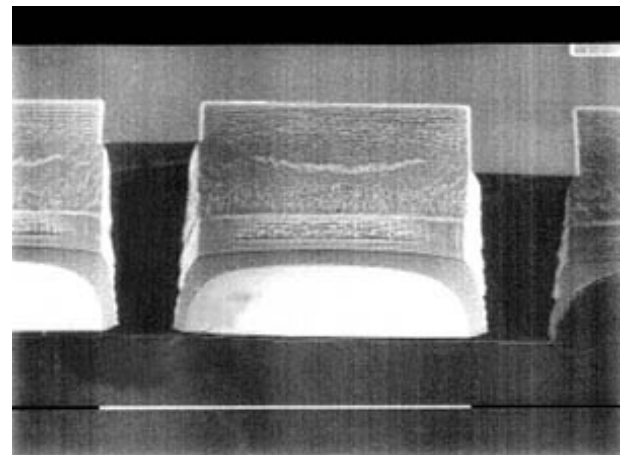
Op het ontwerp van Allier is een patent aangevraagd.



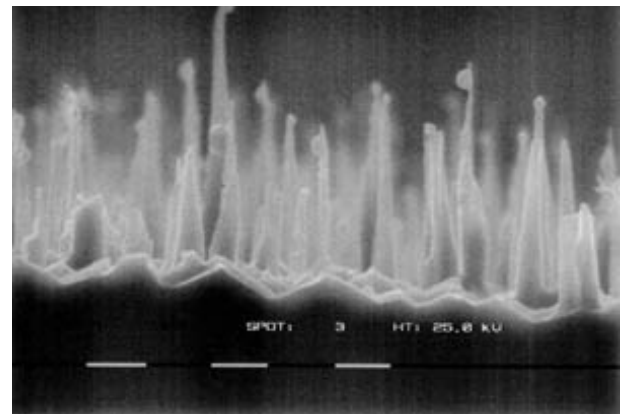
Afhankelijk van de samenstelling van het plasma en de temperatuur van de silicium wafer (die tot  $-100^{\circ}\text{C}$  wordt gekoeld) worden verschillende etsprofielen verkregen.



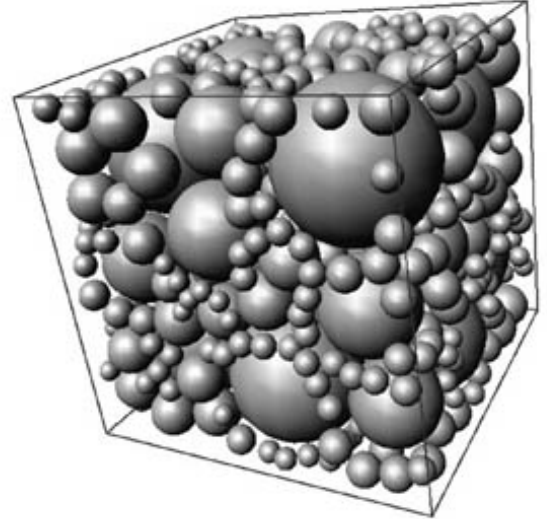
Bovenaanzicht van de chip van Allier. De  $700\ \mu\text{m}$  brede putjes zijn gefabriceerd met de droge methode. De zijwanden zijn slechts  $200\ \mu\text{m}$  breed.



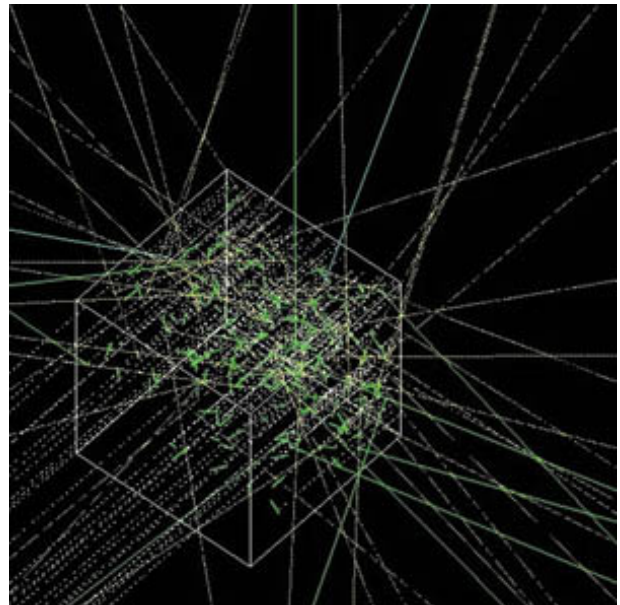
sem-opname van de opengezaagde chip. Het lichte deel op de bodem is de  $10\ \mu\text{m}$  dunne fotodiode.



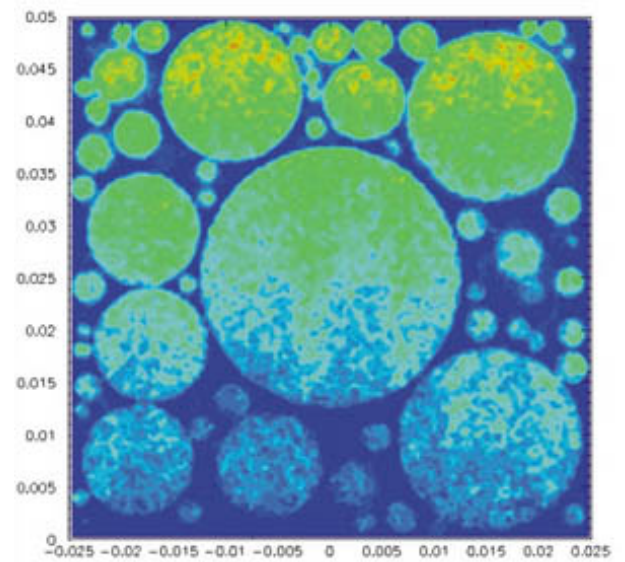
sem-opname van het zogeheten zwarte silicium op de bodem van een geëtste wafer. De harige bodem ontstaat door brokstukjes van verwijderd materiaal die tijdens het proces op de bodem terugvallen en het etsen lokaal verhinderen. De onder de brokjes ontstane piekjes (tussen 10 en 50  $\mu\text{m}$  hoog) zijn voor deze toepassing ongewenst, omdat verder etsen onmogelijk wordt.



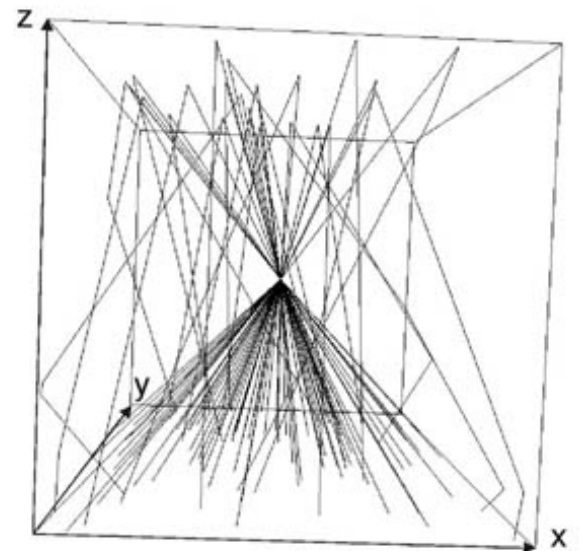
Met een zelfgemaakt programma maakte Allier een simulatie van de opbouw van het scintillator-poeder in de putjes van de chip.



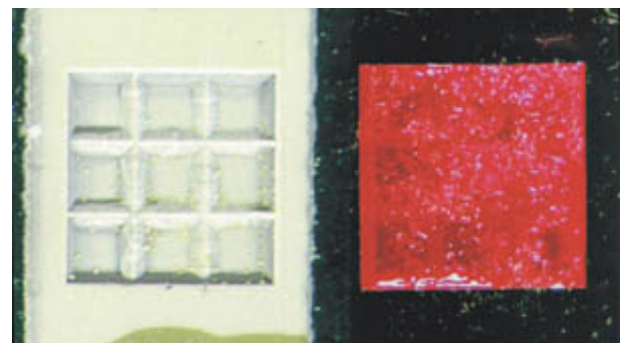
Vervolgens liet hij het programma Monte-Carlo deze simulatie doorrekenen om de interactie tussen de invallende neutronen en het poeder te kunnen bestuderen.



In de laatste opname is te zien hoe de neutronen door het scintillatorpoeder worden geabsorbeerd.



Simulatie van de reflectie van het licht dat vrijkomt wanneer neutronen of gammastralen worden geabsorbeerd door de scintillatoren. Uit de resultaten blijkt dat veel licht door de wanden wordt geabsorbeerd en dus niet door de fotodiode kan worden opgevangen. Dat probleem kan worden opgelost door een laagje aluminium op de silicium wanden aan te brengen.

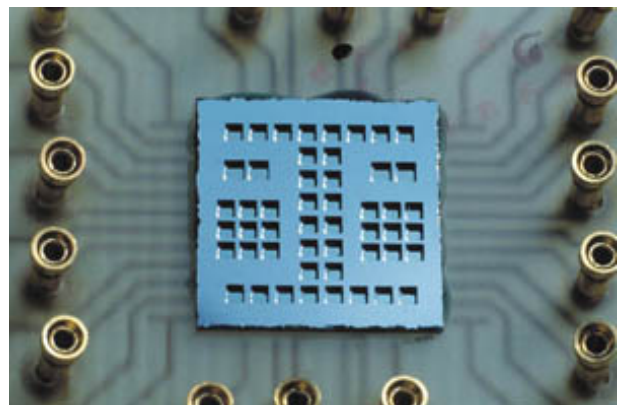




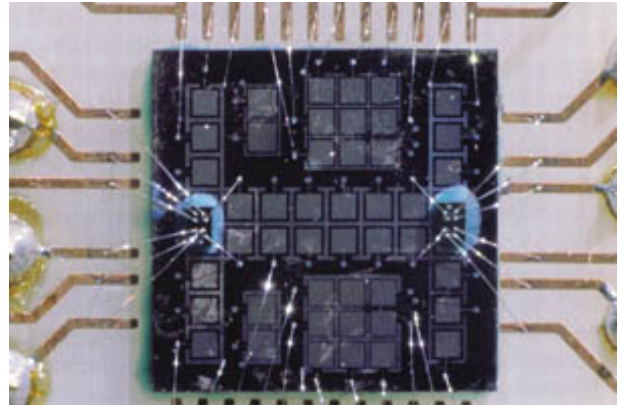
Detector met een matrix van 3 x 3 meetputjes, gevuld met scintillatoren (CsI(Tl)) voor de detectie van gammastralen. De kristallen zijn door de firma Trixell in Grenoble in de putjes in- en opgedampt met een speciaal procedé. (links) Neutronendetector met een matrix van 3 x 3 meetputjes, gevuld met scintallorpoeder  $6\text{Li}6158\text{Gd}(\text{BO}_3)_3 (\text{Ce}^{3+})$ . Het poeder is vermengd met een gel (van geheime samenstelling) die het licht van de scintillatoren omzet in rood licht, omdat fotodiodes veel gevoeliger zijn voor rood licht. Deze detector is met succes getest met de neutronenbundel van het iri. (rechts)



Het prototype van de gammastralendetector gekoppeld aan een signaalversterker. Het analoge signaal wordt elektronisch bewerkt en daarna geconverteerd naar een digitaal signaal zodat het met een computer kan worden verwerkt.



De detectorchip (1 cm<sup>2</sup>) op een printplaatje met de gevoelige kant naar boven gericht. De putjes zijn nog niet met scintillatoren gevuld.



Aan de onderkant van de chip zijn de 50 fotodioden zichtbaar. Afhankelijk van het diode-ontwerp, werken de chips met een spanning die varieert tussen de 15 en 100 volt.

