

Erbium-microtoroïdelaser op een siliciumchip

Het belang van kunstmatig licht in onze huidige maatschappij kan moeilijk overschat worden. Niet alleen zijn we door kunstmatige verlichting verlost van het door de natuur opgelegde dag en nacht ritme, ook zijn er vele belangrijke toepassingen in de telecommunicatie, data opslag, beeldschermen en in de geneeskunde, die een grote rol spelen in ons dagelijks leven. Wat echter opvalt is dat in een aantal toepassingen de optische componenten nog steeds erg groot zijn. Voor deze toepassingen zou-



jkalkman@hotmail.com

Jeroen Kalkman (1975) haalde zijn doctoraal examen experimentele natuurkunde aan de Vrije Universiteit Amsterdam. In 2001 startte hij met zijn promotie op het FOM-instituut AMOLF, waar hij in 2005 promoveerde bij Albert Polman op het proefschrift getiteld Gecontroleerde spontane emissie in met erbium gedoteerde microfotonische materialen. Sinds eind 2005 werkt hij bij Philips Research Eindhoven aan nieuwe biomedische toepassingen.

den we met optica hetzelfde pad willen bewandelen als met elektronica: een miniaturisatie van de optische componenten zodanig dat deze eenvoudig, goedkoop en op grote schaal geproduceerd kunnen worden. Hierdoor kunnen nieuwe toepassingen ontstaan op het gebied van sensoren, verlichting, communicatie en computerrekenkracht. Daarnaast kunnen door deze miniaturisatie nieuwe fundamentele natuurkundige vragen worden beantwoord.

Jeroen Kalkman

FABRICAGE VAN MICROROROÏDEN

De interactie van licht met materie kan worden vergroot door licht goed op te sluiten. Recentelijk is er op het California Institute of Technology [1] een manier gevonden om licht goed op te sluiten in een zogeheten microtoroïde. Dit is een donutvormige ring van glas waarin licht wordt opgesloten door interne reflectie aan het glas-luchtgrensvlak. Figuur 1 laat de stappen van het fabricageproces van deze microtoroïden zien. Uit een Si-wafer waarop een dun laagje SiO₂ (glas) zit wordt met behulp van lithografische technieken een SiO₂-schijfje op een Si-voetje gemaakt (zie figuur 1a). Dit SiO₂-schijfje wordt vervolgens kortstondig verhit door middel van een infrarode laserpuls. Het laserlicht wordt in het SiO₂ geabsorbeerd waardoor het schijfje opwarmt en van de rand naar binnen

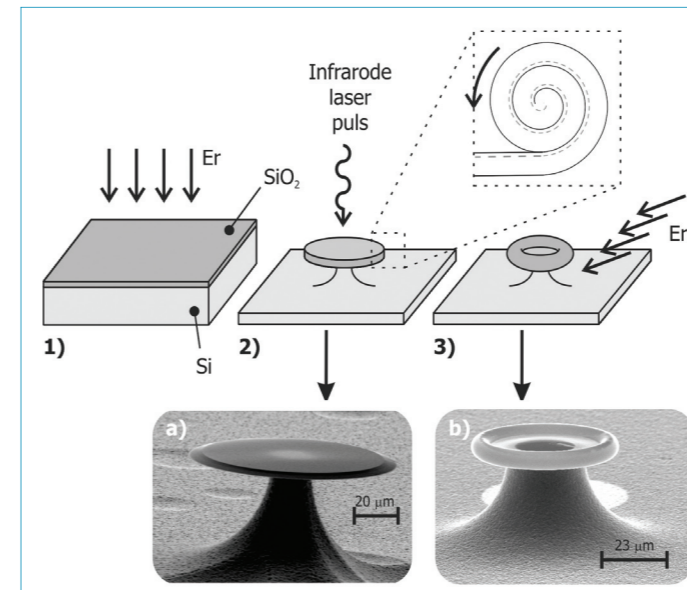
oprolt (zie inzet). Zodoende ontstaat een vrijhangende ring van SiO₂ op een Si-chip (figuur 1b). Door het verhitten en het oprollen is de oppervlakterutheid van het SiO₂ aanzienlijk verminderd. Daardoor wordt licht in de microtoroïde minimaal verstrooid aan het oppervlak en blijft het goed opgesloten binnen de microtoroïde.

Optische resonatoren worden gekarakteriseerd door hun kwaliteitsfactor Q . Deze Q -factor geeft de verhouding tussen de snelheid van het energieverlies en de periode van de trilling. Hoe hoger de Q -factor hoe langer de trilling nagalmt (denk bijvoorbeeld aan een trilvork). De kwaliteitsfactoren voor licht in een microtoroïde zijn typisch groter dan 100 miljoen, wat bij optische frequenties (periode $5 \cdot 10^{-15}$ s) tot een nagalmtijd van 80 nanoseconden leidt. Binnen die tijd legt het licht

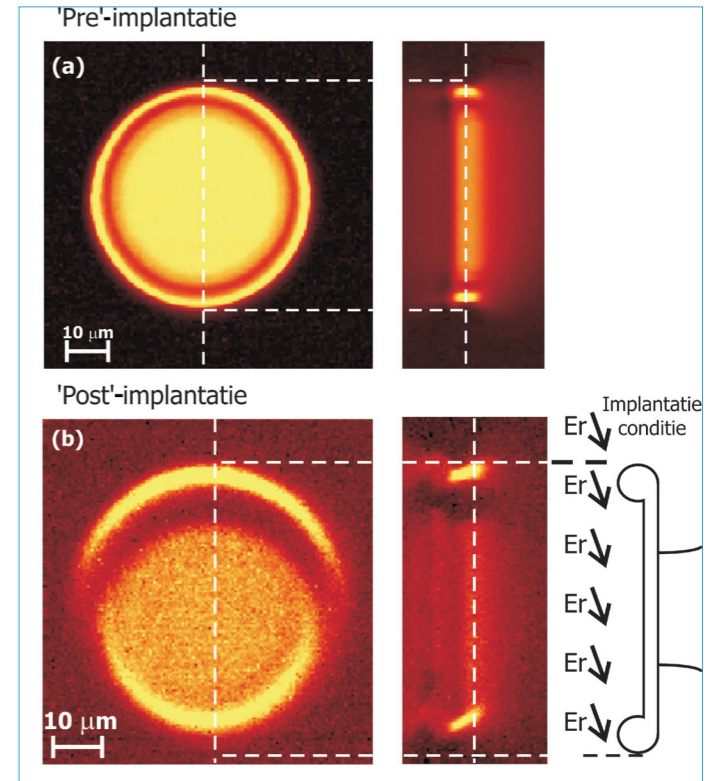
een afstand van meer dan 15 meter af en dat allemaal binnen een structuur die kleiner is dan de dikte van een menselijke haar! Door continu licht de microtoroïde in te koppelen kan de lichtintensiteit in de resonator enorm worden versterkt. Daardoor kunnen allerlei niet-lineaire processen eenvoudiger worden gerealiseerd, zoals Ramanversterking [2], parametrische optische versterking [3] en optische versterking in het infrarood [4]. Op de laatste toepassing zal ik hier verder ingaan [5].

DOTERING MET ERBIUM

De standaard golflengte voor optische telecommunicatie is in het infrarood (1,5 micrometer). De integratie van optica en elektronica op een chip vereist daarom een kleine en efficiënte infrarood lichtbron, waarbij de fabricage



Figuur 1 Fabricagemethode van toroïdale microresonatoren. 1) Het basismateriaal SiO₂ op Si kan worden geïmplantieerd met Er ('pre'-implantatie). 2) Fabricage van een SiO₂-schijfje door middel van lithografische technieken, waarna een laserpuls het schijfje laat oprollen tot een gladde torus. 3) De microtoroïde kan worden geïmplantieerd van de zijkant met Er ('post'-implantatie). Onder: elektronenmicroscopische afbeeldingen van het SiO₂-schijfje (a) en de microtoroïde (b).



Figuur 2 Afbeelding van de Er-verdeling in (a) een 'pre'-geïmplanteerde microtoroïde en (b) een 'post'-geïmplanteerde microtoroïde.

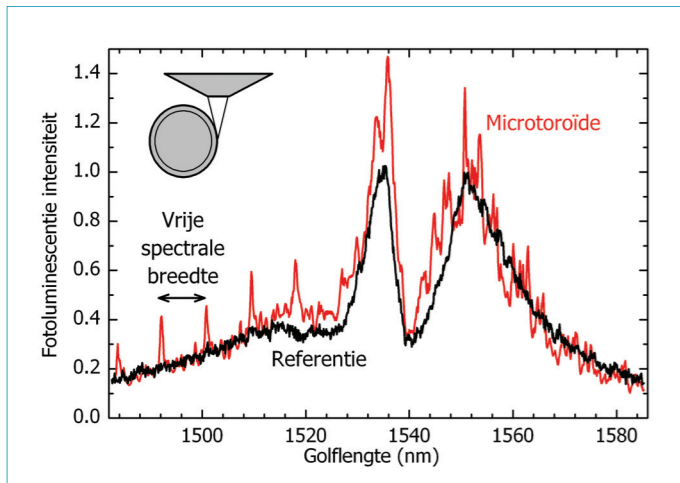
verenigbaar is met standaard Si-fabricage technieken voor computer chips. Erbium is een zeldzaam aard metaal en zendt licht uit bij de bovengenoemde 'telecomgolflengte'. Door de microtoroïden met erbium te doteren kunnen we een infrarode laserlichtbron maken die aan beide eisen voldoet. Het doteren doen we door het Er in de microtoroïde te implanteren met behulp van een ionenversneller. Hierbij worden Er-atomen geïoniseerd en vervolgens versneld door een sterk elektrisch veld. Deze zeer snelle Er-ionen dringen vervolgens tot wel een micrometer diep het materiaal in. Bij het implanteren hebben we twee strategieën gevolgd (zie figuur 1): 'pre'-implantatie (Er geïmplantieerd in het SiO₂-startmateriaal voor het begin van de fabricage) en 'post'-implantatie (Er van de zijkant geïmplantieerd in een volledig gefabri-

ceerde microtoroïde). Na de implantatie zijn de samples een uur sterk verhit om implantatieschade te verwijderen. Een eerste vraag was of de microtoroïde zijn goede optische eigenschappen zou behouden na implantatie en verhitting. Na de fabricage zijn de Q -factoren weliswaar iets afgenomen, maar zijn ze nog steeds hoog ($Q > 10$ miljoen). Een tweede vraag was hoe het Er verdeeld is in de microtoroïde en of al het Er optisch actief is gemaakt (dat wil zeggen dat het aantal implantatiedefecten voldoende is gereduceerd en dat er geen clustering heeft plaatsgevonden). Dit hebben we onderzocht door met behulp van een confocale microscoop een ruimtelijke afbeelding te maken door voor elk punt de Er-fotoluminescentie te meten. In figuur 2 is de ruimtelijke verdeling van het Er in de microtoroïde te zien voor beide im-

plantatiecondities. Zoals te verwachten valt uit de fabricageprocedure geeft het 'pre'-implanteren een Er-verdeling die gelijkmatig langs de rand van de microtoroïde is verdeeld (zie figuur 2a). De 'post'-geïmplanteerde microtoroïde heeft een Er-verdeling zoals die te verwachten is uit de implantatiegeometrie (schematisch afgebeeld aan de rechterkant van figuur 2b). Door de geringe indringdiepte zit het Er alleen op plaatsen die direct door de ionenbundel kunnen worden geraakt. Voor beide implantatiecondities is het Er goed optisch actief gemaakt in de microtoroïde.

SPONTANE EMISSIEVERANDERING

Door het Er in een hoge Q -resonator te stoppen verandert het spontane emissiespectrum van het Er. Dit hebben we onderzocht door licht langs de rand

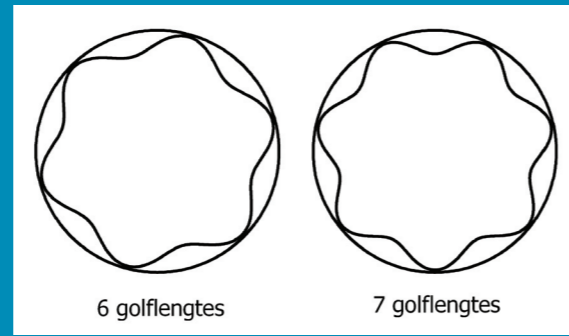


Figuur 3 Spontane emissiespectra voor Er in een referentiesample (zwart) en in een microtoroïde (rood).

van de resonator in te koppelen en het emissiespectrum te meten. Figuur 3 laat twee spontane emissiespectra zien. Eén gemeten loodrecht op een dunne laag SiO₂ en één gemeten in het vlak van de microtoroïde. De emissie van Er in het vlak van de microtoroïde laat een normaal emissiespectrum zien (zoals in de vlakke SiO₂-laag) met daarop gesuperponeerd een regelmatige verdeling van scherpe pieken. Het normale Er-emissiespectrum is het gevolg van licht dat direct naar buiten wordt uitgezonden. De scherpe pieken zijn het gevolg van licht dat naar zogeheten *whispering gallery modes* (WGM's) wordt uitgezonden (zie kader *Whispering gallery modes*) en vervolgens in het vlak van de microtoroïde verstrooit. De pieken hebben een onderlinge afstand die overeenkomt met de vrije spectrale breedte die overeenkomt met de afmetingen van de resonator. Het opnemen van een lichtbron in een structuur met afmetingen van dezelfde orde als de golflengte kan dus grote gevolgen hebben voor het spontane emissiespectrum!

INFRAROOD LASERWERKING

De laatste stap was om licht via de glasvezel in de microtoroïde te koppelen (zie kader *Lichtinkoppeling*) en te kijken of we gestimuleerde Er-emissie konden meten. De totale hoeveelheid Er-emissie gemeten aan de uitgang van de glasvezel is een maat voor het totale uitgangsvermogen. In figuur 4 staat dit uitgangsvermogen geplot als functie van het vermogen ingekoppeld in de glasvezel. Boven een zekere drempel van het ingekoppelde vermogen is er een lineaire toename van het uitgangsvermogen te zien; dit cor-

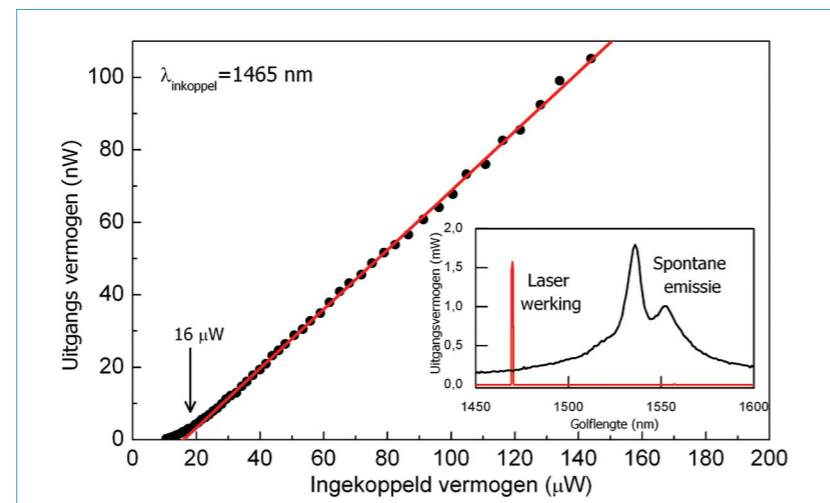


Whispering gallery modes

De optische modi in microtoroïden zijn zogeheten *whispering gallery modes*, genoemd naar de rondgaande akoestische golven in de befaamde fluistergalerij van de St. Pauls kathedraal in Londen [6]. Kijken we in het vlak van de resonator dan zijn de optische modi te beschrijven door een golf die langs de rand van de resonator loopt, waarbij een mode resonant is als de fase van de golf na één rondgang gelijk is. Dit is schematisch linksboven weergegeven voor een lichtstraal die na 6 hele golflengtes langs de rand van de resonator weer in fase is. Een volgende resonante golflengte is rechtsboven weergegeven en heeft 7 hele golflengtes langs de rand van de resonator. De resonantieconditie is $2\pi R = m\lambda$, met R de straal, λ de golflengte, en m een geheel getal. Hier is eenvoudig uit af te leiden dat de vrije spectrale breedte wordt gegeven door $\lambda_{\text{VSB}} = \lambda^2 / 2\pi R$. Dit is de spectrale afstand tussen de optische modi die als pieken te zien zijn in figuur 3. Het feit dat de resonator vrijwel twee dimensionaal is, zorgt ervoor dat resonante modi met een inclinatie ten opzichte van het resonatorvlak vrijwel niet bestaan.

respondeert met gestimuleerde emissie. Onder het drempelvermogen is er voornamelijk spontane emissie, maar bij overschrijding van het drempelvermogen verandert het emissiespectrum van het spontane Er-emissiespectrum (zwarte lijn in de inzet van figuur 4) naar het gestimuleerde emissiespectrum (rode lijn). Daarbij komt vrijwel al het vermogen in één WGM terecht komt. Deze resonante mode van de

microtoroïde is optimaal voor laserwerking. Zowel voor de 'pre'- als de 'post'-geïmplanteerde microtoroïde hebben we laserwerking geobserveerd. De drempelvermogens waren respectievelijk 16 en 125 μW . Voor de 'post'-geïmplanteerde microtoroïden is het drempelvermogen iets hoger doordat deze doteringsmethode iets meer absorptieverliezen geeft. De record lage drempel inkoppel



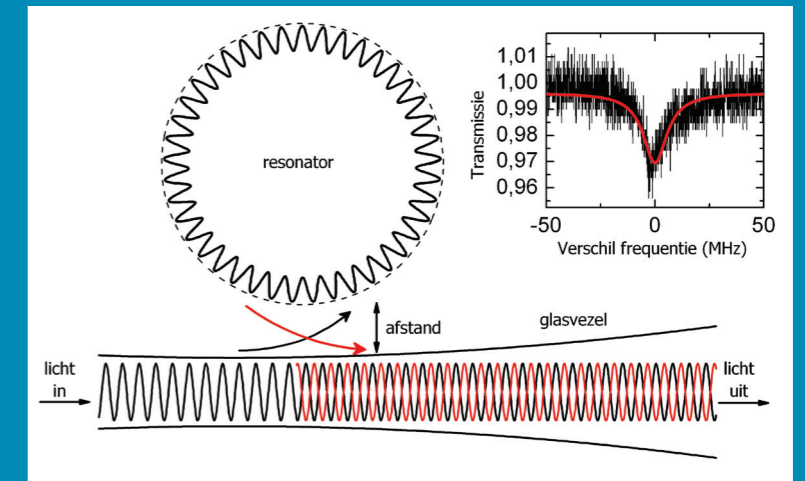
Figuur 4 Uitgangsvermogen tegen ingekoppeld vermogen voor een 'pre'-geïmplanteerde microtoroïde. In de inzet staan twee emissiespectra: een gemeten boven het drempelvermogen (rood) en een referentiemeting (zwart).

vermogens danken deze lasers aan hun bijzonder lage optische verliezen. Samenvattend hebben we dus de succesvolle fabricage van Er-gedoteerde microtoroïde lasers op een Si-chip laten zien, waarbij de spontane emissie van Er is beïnvloed door Er in een microtoroïde te plaatsen. Naast de mogelijkheden die dit biedt voor het toepassen van deze Er-gedoteerde lasers in geïntegreerde optische schakelingen, kunnen deze microresonatoren ook een uitstekend platform zijn voor het onderzoeken van de meest uiteenlopende optische effecten!

Het werk in dit artikel is tot stand gekomen met medewerking van Tobias Kippenberg (Caltech), Bumki Min (Caltech), Albert Polman (AMOLF), Anna Tchebotareva (AMOLF) en Kerry Vahala (Caltech).

REFERENTIES

1. D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, and K. J. Vahala, *Nature* 421, 925 (2003)
2. T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, D. K. Armani, and K. J. Vahala, *Opt. Lett.* 29, 1224 (2004)
3. T. J. Kippenberg, S.M. Spillane, and K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* 93, 083904 (2004)
4. A. Polman, B. Min, J. Kalkman, T. J. Kippenberg, and K. J. Vahala, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1037 (2004).
5. J. Kalkman, A. L. Tchebotareva, T. J. Kippenberg, B. Min, K. J. Vahala, and A. Polman, *J. Appl. Phys.* 99, 083103 (2006)
6. L. Rayleigh, *Scientific Papers* 5, 617 (1912)



Figuur 5 In- en uitkoppeling geometrie van de microtoroïde glasvezelcombinatie. De inzet laat een transmissiemeting zien, een fit (rode lijn) geeft de Q -factor van de resonator.

Lichtinkoppeling

Het feit dat het licht goed in de resonator is opgesloten maakt het per definitie moeilijk om het erin te krijgen. Een truc om dit toch voor elkaar te krijgen is door middel van een taps toelopende glasvezel (zie figuur 5). De kern van een glasvezel wordt dun uitgetrokken, waarbij het dunne deel vlak bij de resonator wordt gebracht. Het licht wordt door de glasvezel heen gestuurd en zal bij het bereiken van het verdunde stuk van de glasvezel buiten de kern treden waardoor de effectieve golflengte afneemt. Bij een bepaalde dikte zal deze golflengte precies passen bij een resonante golflengte van de resonator en kan er licht van de glasvezel naar de resonator worden gekoppeld. Na een volledige rondgang en terugkoppeling in de glasvezel is het licht 180 graden uit fase met het inkomende licht. Na het rondgaan van het licht in de resonator kan het licht weer terugkoppelen naar de glasvezel, eveneens met een 900-fase-sprong. Het licht is dus 1800 uit fase met het inkomende licht. Er is één afstand (de kritische koppelingsafstand) waarbij er een perfecte balans bestaat tussen het efficiënt inkoppelen (efficiënter met de glasvezel dichtbij de resonator) en het extra verlies van de resonator door de nabijheid van de glasvezel (meer verlies met de glasvezel dichtbij de resonator). Bij die optimale afstand is de lichtintensiteit in de resonator zoveel versterkt dat de fractie die daarna in de glasvezel terugkoppelt even groot is als de hoeveelheid licht in de glasvezel, maar precies uit fase. De transmissie door de glasvezel is dan nul. Bij een iets grotere of kleinere afstand is er een kleiner minimum in de transmissie. Door de transmissie te meten voor verschillende frequenties is een minimum te zien ten gevolge van de koppeling van licht naar een resonator mode. Een fit van de transmissie tegen de frequentie geeft vervolgens de intrinsieke Q (Q zonder het koppelingsverlies door de nabijheid van de glasvezel) van de resonator.