

Democratie in een chip

De mogelijkheden van spintronische en plasmonische meerderheidspoorten

Intro

Terwijl de schaalverkleining van CMOS-chips tot het uiterste wordt gedreven, zoeken onderzoekers bij imec ook naar alternatieve oplossingen die de klassieke schaalverkleining achter zich laten. Zij gaan op zoek naar 'disruptieve' technologieën die goedkoper zijn, minder vermogen verbruiken, de performantie verbeteren of veel data kunnen verwerken. Met deze technologieën willen ze de bestaande CMOS-circuits niet vervangen, maar wel aanvullen in een hybride architectuur waarin verschillende technologieën thuishoren. In deze architecturen zullen de nieuwe technologieën datgene doen waarin ze goed zijn, bijv. het maken van krachtige berekeningen of het werken bij heel lage vermogens.

Eén van deze 'beyond-CMOS'-opties zijn zogenaamde meerderheidspoorten, een technologie die komaf maakt met de manier waarop we gewoonlijk circuits bouwen. In conventionele rekencircuits worden de complexe, logische bewerkingen uitgevoerd door combinaties van verschillende NAND-poorten. In deze NAND-logica is een uitkomst 'vals' alleen wanneer alle inputs 'waar' zijn. In hardware worden deze NAND-poorten gemaakt met transistoren. Meerderheidspoorten daarentegen zijn 'democratische' schakelingen waarvan de uitkomst 'waar' is wanneer meer dan 50% van hun input 'waar' is. In hun meest eenvoudige vorm gebruiken ze hiervoor drie ingangen en één uitgang. Wanneer bijv. twee inputs 'waar' zijn ('1') en een derde is 'vals' ('0'), dan is de verwachte uitkomst 'waar'. De werking van deze meerderheidspoorten wordt samengevat in een waarheidstabel, waarin alle mogelijke combinaties van de input-variabelen ('1' en '0') worden opgenomen samen met de uitkomst.

Majority Logic Gate			
Input 1	Input 2	Input 3	Output
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Waarheidstabel van een eenvoudige meerderheidspoort met drie ingangen en 1 uitgang.

Met deze meerderheidspoorten kunnen logische 'AND'- en 'OR'-bewerkingen worden uitgevoerd. Op die manier kunnen rekencircuits gebouwd worden die veel compacter en zuiniger zijn dan de conventionele NAND-circuits.

Hoewel meerderheidspoorten ook met standaard-transistoren kunnen worden gebouwd, leiden andere concepten tot efficiëntere circuits. Het team van imec bekijkt drie verschillende implementaties van meerderheidspoorten: spin-golf (of spin-wave), spin torque en plasmonische meerderheidspoorten. Deze verschillen in de manier waarop informatie gecodeerd en verwerkt wordt, en in de manier waarop informatie geconverteerd wordt vanuit de klassieke circuits (met transistoren) naar deze nieuwe circuits. En dat brengt voor elk type meerderheidspoort eigen uitdagingen en voordelen mee.

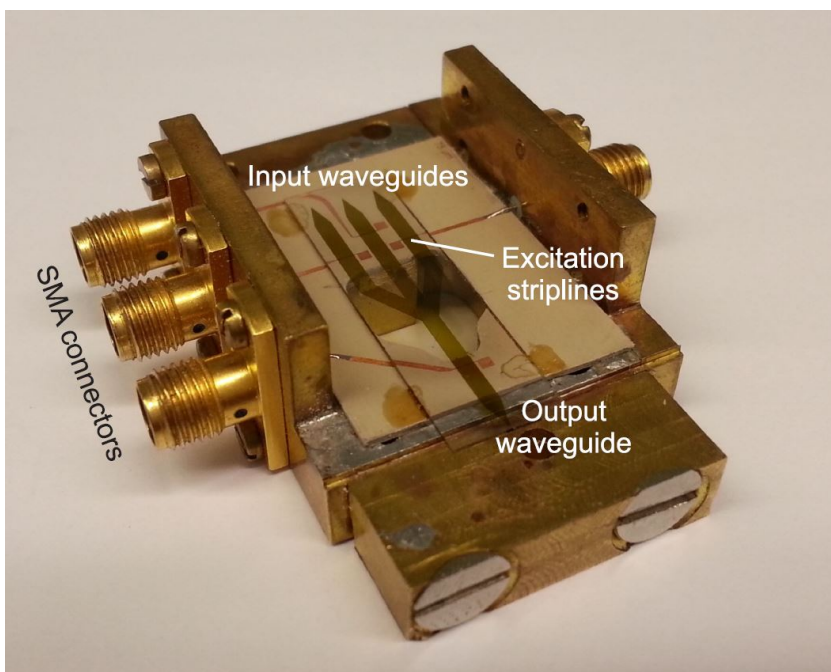
Hieronder geven Iuliana Radu en het imec exploratory device team een overzicht van de drie verschillende soorten meerderheidspoorten.

Spin-golf meerderheidspoorten: compact en ultralaag vermogen

Spin-golf meerderheidspoorten behoren tot de spintronica-familie, waarbij niet de lading van individuele elektronen maar de collectieve magnetisatie-toestand in een ferromagneet gebruikt wordt om logische bewerkingen uit te voeren. In een magnetisch materiaal kan de magnetisatie oscilleren, waardoor golven van magnetisatie ontstaan (op nanoschaal) die zich voortplanten – de zogenaamde spin-golven (spin waves) of magnons. Spin-golven hebben golflengtes van de orde van micrometer tot nanometer, en frequenties in het gigahertz- (GHz) tot terahertz (THz)-gebied. De werking van de meerderheidspoort is gebaseerd op de interferentie van (tenminste) drie van deze spin-golven. De informatie kan worden meegedragen in de amplitude of in de fase (0 of π) van de golven. Het gebruik van de fase als informatiedrager is de meest natuurlijke manier om meerderheidspoorten te laten werken. De fase van de golf na interferentie is simpelweg de meerderheid van de fases van de individuele golven vóór de interferentie.

Met spin-golf meerderheidspoorten kunnen circuits gebouwd worden die veel minder oppervlakte en vermogen verbruiken. Denk bijv. aan een één-bits-'adder', een circuit waarmee twee binaire bits worden opgeteld. In CMOS-technologie zijn er ongeveer 25 transistoren nodig om zo'n circuit te bouwen. Een equivalent golf-gebaseerd circuit heeft maar vier golfgeleiders en vijf transducers nodig om dezelfde bewerking uit te voeren (waarbij de transducers de brug vormen tussen CMOS en het spin-golf domein). Na het benchmarken van de spin-golf meerderheidspoorten ten opzichte van CMOS-circuits (door middel van micro-magnetische simulaties) besluit imec dat het spin-golf circuit gemiddeld 400 keer minder vermogen en 3,5 keer minder oppervlakte verbruikt dan CMOS circuits.

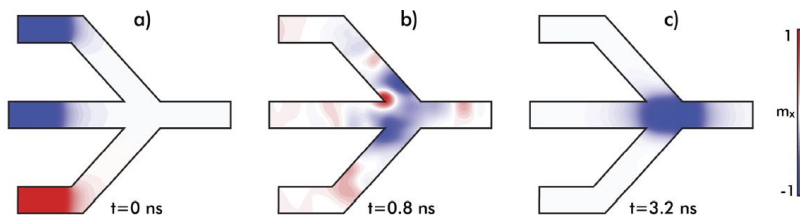
Experimentele validatie van de meerderheids-werking was tot nog toe niet voorhanden. Maar recent hebben onderzoekers van de Technical University of Kaiserslautern (Duitsland), in samenwerking met het imec-team, een eerste prototype gemaakt van een spin-golf meerderheidspoort [1]. Dit eerste prototype is erg groot en maakt gebruik van een materiaal dat moeilijk in de industrie kan gebruikt worden: yttrium-ijzer-granaat. Maar het device voldoet wel aan de basisbeschrijving van wat een meerderheidspoort moet zijn. De logische informatie wordt gecodeerd in de fase van de spin-golven, terwijl de fase van het uitgangssignaal overeenkomt met de meerderheid van de drie fasetoestanden van de spin-golven bij de ingangen.



Prototype van een spin-golf meerderheidspoort (op grote schaal).

Het imec-team tracht momenteel deze circuits te verkleinen tot enkele nanometers groot. Deze geschaalde circuits hebben ook efficiënte transducers nodig. Daarom gaat het imec-team actief op zoek naar nieuwe transducers, bijv. transducers gebaseerd op spin orbit torque of op het magneto-elektrisch effect. Deze laatste bestaat uit piëzo-elektrische en 'magnetostrictieve' ferromagnetische lagen, en koppelt spannings-signalen aan magnetische signalen – met een mechanische spanning (strain) als tussenstap. Deze magneto-elektrische transducers beloven efficiënter te werken voor circuits in het sub-micrometer-gebied. Maar de beoogde afmetingen (sub-micrometer) en resonantiefrequenties (GHz) maakt de ontwikkeling van deze piëzo-elektrische actuatoren (als nano-elektromechanische systemen of NEMS) erg uitdagend.

Recent stelde imec op basis van modellering het eerste ontwerp op nanoschaal voor van een spin-golf meerderheidspoort. De meerderheidspoort heeft een totale oppervlakte van slechts $0,05 \mu\text{m}^2$, en maakt gebruik van magneto-elektrische cellen (zie de figuur hieronder). Imec werkt momenteel aan een experimentele demonstratie. Als erkenning voor dit ambitieuze project kreeg een multi-nationaal consortium, bestaande uit negen onderzoeksteams en gecoördineerd door imec, een Europees Horizon 2020-FET-Open onderzoeks-grant 'CHIRON', om deze devices te demonstreren.

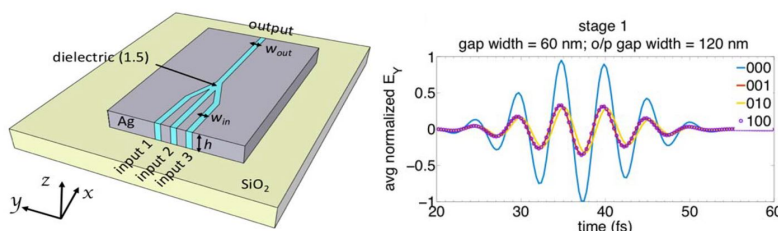


Simulatie van de werking van een spin-golf meerderheidspoort op nanoschaal. (a) Bij $t=0\text{ns}$, worden de ingangen op '10' gezet; (b) bij $t=0,8\text{ns}$; en (c) bij $t=3,2\text{ns}$, wordt de uitgangsmagnetisatie gestabiliseerd in de '1'-toestand, wat een correctie detectie is van het meerderheidsresultaat.

Totale oppervlakte van de poort is ongeveer $0,05 \mu\text{m}^2$.

Plasmonische meerderheidspoorten: snelheidskampioenen

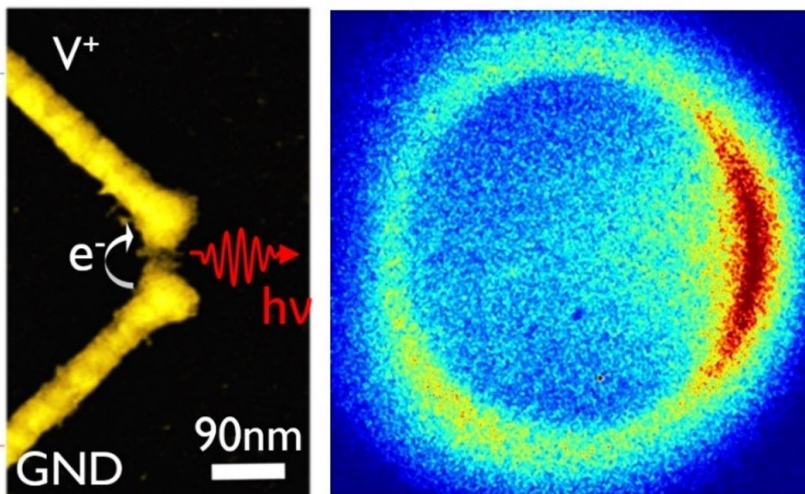
Recent kwam een nieuw type golf-gebaseerde meerderheidspoort in de kijker: de plasmonische meerderheidspoort. In dit circuit zijn de hoofdrolspelers plasmonen, die kunnen voorgesteld worden als golven in het vrije-elektron-gas van een metaal. Deze golven planten zich voort in plasmon-golfgeleiders (wat niets meer is dan isolerende materialen die gesandwiched zijn tussen metaalstrips), die als bouwblok kunnen gebruikt worden voor een meerderheidspoort. (Zie onderstaande figuur voor een schets van een plasmonische meerderheidspoort.) Net als bij spin-golven is de werking van de plasmonische meerderheidspoort gebaseerd op de interferentie van voortbewegende plasmonen. Zij dragen de informatie in hun fase bij frequenties die de THz overschrijden – zowat drie grootte-orde sneller dan elektronica gebaseerd op CMOS. Hoewel ze minder energie-efficiënt zijn, lijken ze erg geschikt voor snelle bewerkingen en voor berekeningen waarbij een hoge 'throughput' cruciaal is.



Plasmonische meerderheidspoort: (links) schematische voorstelling en (rechts) output van een meerderheidspoort (enkelvoudige fase), die '0' als output heeft.

Recent hebben onderzoekers van imec en Georgia Institute of Technology (VS) plasmonische meerderheidspoorten ontworpen, op basis van elektromagnetische simulaties [2]. Een meerderheidspoort (enkelvoudige fase of single stage) produceert zijn output bij een extreem lage vertraging van slechts 50 fs. Dat is ordes van grootte sneller dan conventionele logische schakelingen waarbij transistoren worden gebruikt. Bij het bouwen van logische circuits is het belangrijk om een 'cascade' van componentjes te kunnen maken, en de berekening te kunnen doorgeven van de ene fase (stage) naar de volgende. Het voorgestelde ontwerp bevat drie niveaus van 'cascading stages' zonder significant verlies van de veldintensiteit van de plasmonen – een primeur.

Eén van de grote experimentele uitdagingen is het 'op chip' opwekken en injecteren van plasmonen in plasmon-golfgeleiders. Imec werkt momenteel aan zo'n component. Recent kon het team een dergelijke plasmonbron-op-chip experimenteel aantonen. Deze bron werkt zeer snel, compatibel met 'high-throughput'-berekeningen [3]. In het hart van deze plasmonbron bevindt zich een antenne-gekoppelde tunnel-junctie (zie figuur hieronder), die tunnelende elektronen op een heel gecontroleerde manier in plasmonen converteert. De component kan zowel passief als actief 'getuned' worden, en kan licht uitzenden in één enkele richting. In een volgende fase werkt het team aan de koppeling van deze componentjes met plasmon-golfgeleiders.



(Links) Imecs ultrakleine antenne-gekoppelde tunnel-junctie, die licht in één richting uitzendt (rechts).

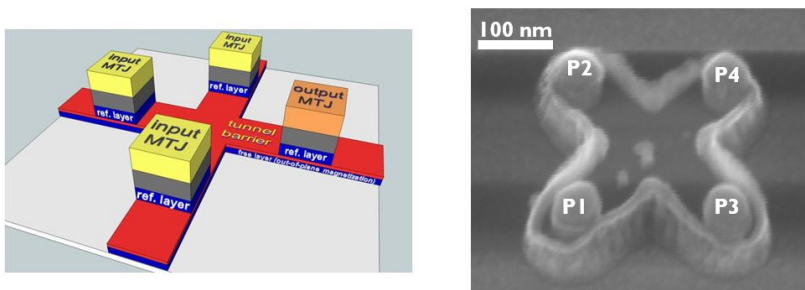
De weg naar een experimentele demonstratie van een volledige plasmonische meerderheidspoort is echter nog lang. Eén van de belangrijke componentjes die vandaag nog ontbreken, is een circuit dat toelaat om het analoge uitgangssignaal van het golf-gebaseerde circuit te converteren naar een digitaal signaal dat compatibel is met een CMOS-gebaseerd circuit. Deze analoog-naar-digitaal convertor moet echter ook een conversie maken van THz (de werkingsfrequentie van het plasmonische circuit) naar GHz (de werkingsfrequentie van standaard CMOS), en mag hierbij niet veel energie verbruiken.

Spin torque meerderheidspoorten: eenvoudig om circuits te maken

Net als spin-golf meerderheidspoorten behoren ook spin torque meerderheidspoorten tot de spintronica-familie. In een spin torque meerderheidspoort is de informatie vervoerd in magnetische domeinmuren – interfaces die gebiedjes met verschillende magnetisatie-richting van elkaar scheiden. Door kwantum-interacties tussen elektronen ('exchange') kunnen deze domeinmuren zich voorplanten en met elkaar interageren, waarbij de meerderheids-magnetisatie-richting wint.

De meerderheidspoort zelf bestaat uit een kruisvormige vrije laag die gemeenschappelijk is aan vier magnetische tunneljuncties (3 inputs, 1 output). De magnetisatie-richting van de 3 'input' vrije lagen wordt geschakeld door middel van spin transfer torque, dat aangebracht wordt door een stroom doorheen elk van de magnetische tunneljuncties. De toestand waarin de 'output' zich bevindt, wordt gemeten volgens het principe van tunneling magnetoresistance.

Eerder kon imec de werking van de spin torque meerderheidspoorten valideren met micromagnetische simulaties. Ondertussen zijn ook de eerste poorten gebouwd op 300nm wafers (zie figuur hieronder), en kon een deel van de waarheidstabel worden aangetoond. Verwacht wordt dat, op basis van materiaal- en procesoptimalisaties, de volledige functionaliteit van het circuit binnenkort zal kunnen worden aangetoond.



Spin torque meerderheidspoort: (links) schematische voorstelling en (rechts) geïntegreerde poort.

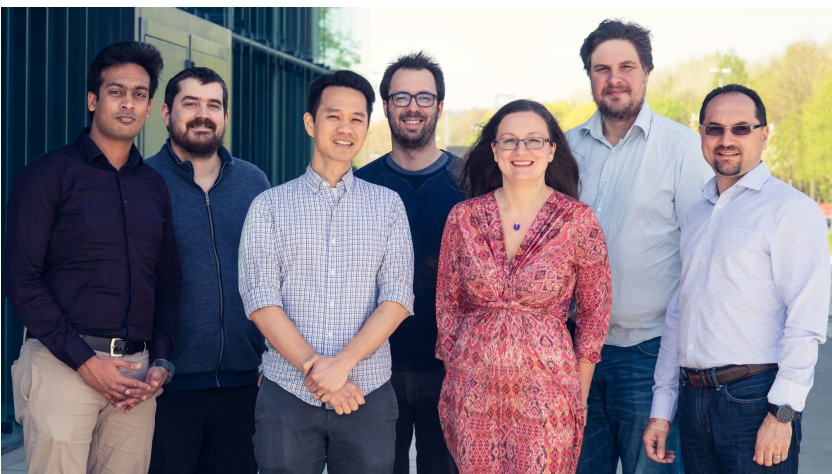
Spin torque meerderheidspoorten zijn in het algemeen erg compact en zouden geschikt kunnen zijn voor toepassingen die weinig energie vragen. Toch verbruiken ze meer energie dan spin-wave gebaseerde poorten. Een groot voordeel van deze spin torque meerderheidspoorten in vergelijking met golf-gebaseerde circuits is dan weer het 'gemak' waarmee circuits kunnen worden ontworpen. Circuits bestaan meestal uit meerdere reken-fases (stages), en – zoals hierboven vermeld – is 'cascading' tussen de componentjes nodig om logische circuits van betekenis te maken. In hardware betekent dit dat de output van de ene reeks componenten naar de input van de volgende reeks gaat. Golf-gebaseerde meerderheidspoorten maken gebruik van de interferentie van golven, maar deze golven kunnen ook gemakkelijk terug'vloeien' in het circuit. En dat maakt het ontwerp van circuits met meerdere fases erg moeilijk. Spin torque meerderheidspoorten steunen op de interactie tussen domeinmuren. Domeinmuren hebben minder kans om terug te vloeien in het circuit. Op basis van modelwerk heeft imec speciale implementaties voorgesteld waardoor de kans op terugvloeien bij spin torque meerderheidspoorten nog verder verkleind wordt.

Besluit

In dit artikel gaven we een overzicht van de status, de uitdagingen en voordelen van drie types meerderheidspoorten: spin-golf en plasmonische meerderheidspoorten (waarvan de werking gebaseerd is op golven), en spin torque meerderheidspoorten. Met deze 'beyond-CMOS'-technologieën kunnen zuinige en compacte aritmetische circuits gebouwd worden, die komaf maken met de manier waarop we gewoonlijk logische circuits bouwen. Verwacht wordt dat ze, eens matuur, specifieke functies zullen uitvoeren in een hybride architectuur – elk volgens hun eigen sterkte. Terwijl spin-golf meerderheidspoorten compact en erg zuinig beloven te zijn, is de belangrijkste troef van de spin torque meerderheidspoort het 'gemak' waarmee circuits in meerdere fases kunnen worden gebouwd. Op langere termijn beloven de plasmonische meerderheidspoorten ingezet te kunnen worden voor toepassingen die een extreem hoge 'throughput' en snelheid vragen, en waarvoor energie-efficiëntie van ondergeschikt belang is.

Acknowledgements

Dit werk kwam tot stand dankzij de gezamenlijk inspanning van het imec exploratory device team. Van links naar rechts: Surya Gurunaryanan, doctoraatsstudent, werkt aan elektrisch gedreven nanofotonica-componenten en -circuits; Odysseas Zografos, R&D Engineer, werkt aan simulaties en benchmarking van spin-golf-circuits, en aan benchmerking van spin torque meerderheidspoorten; Danny Wan, Senior R&D Engineer, richt zich op de fabricatie van spin torque meerderheidspoorten; Adrien Vayssset, Researcher, richt zich op het micromagnetisch modelleren van spin torque majority gates; Iuliana Radu, Distinguished Member of Technical Staff, leidt de beyond-CMOS activiteiten van imec; Christoph Adelman, Principal Member of Technical Staff, verricht onderzoek naar materialen en componenten voor spintronische logica en interconnects; en Florin Ciubotaru, Senior Researcher, werkt aan de ontwikkeling van logische, RF- en sensorcomponenten die gebaseerd zijn op magnetische spin-gerelateerde fenomenen.



Referenties

- [1] 'Experimental prototype of a spin-wave majority gate', T. Fischer et al., Applied Physics Letters 110, 152401 (2017)
- [2] 'Proposal for nanoscale cascaded plasmonic majority gates for non-Boolean computation', Dutta S. et al., Scientific Reports 2017, 7, 17866
- [3] 'Electrically driven unidirectional optical nanoantennas', Gurunaryanan S. et al., Nano Lett. 2017, 17, 7433-7439

Meer weten?

- Wil je graag één van de hierboven vermelde papers ontvangen? Laat het ons weten via [deze link](#).
- Voor meer informatie over de 'FET-Open research and innovation actions', bezoek [de website](#).



Biografie Iuliana Radu

Iuliana Radu is Distinguished Member of Technical Staff at imec, where she is leading the Beyond CMOS activities. Prior to joining the Logic Program at imec in 2013, she was a Marie Curie and FWO fellow at KU Leuven and imec. Her work at imec and KU Leuven includes devices using the metal to insulator transition, ionic and electronic transport in functional oxides and devices with graphene and other 2D materials. Iuliana has received a PhD in Physics from MIT in 2009 where she worked on the Fractional Quantum Hall effect and searched for non-abelian quasiparticles. She has received a MSc and a BSc in Physics from University of Bucharest.