

Zomerstage op Imec

MOKE - karakterisering van zachte magnetische materialen

Nele Moelans

Periode : 7aug-14sept 2000

**Begeleider : Liesbet Lagae
Jo De Boeck**

Groep : Magneto-elektronica

1 Een zomerstage op Imec

Imec werd opgericht in 1984 door de Vlaamse regering. Nu is het uitgegroeid tot een zeer belangrijk onderzoekscentrum op het vlak van micro-elektronica.

Het onderzoek richt zich op nieuwe procestechologieën voor chips, opto-elektronische componenten, zonnecellen, sensoren, en op de ontwikkeling van nieuwe ontwerpmethoden voor geïntegreerde schakelingen. Naast onderzoek verzorgt Imec ook opleidingen voor de industrie en voor universiteiten.

Het is bewust een jong bedrijf. De gemiddelde leeftijd van de medewerkers is 32jaar. Een groot deel van de medewerkers zijn onderzoekers. Er is immers voortdurend nood aan 'nieuwe ideeën'.

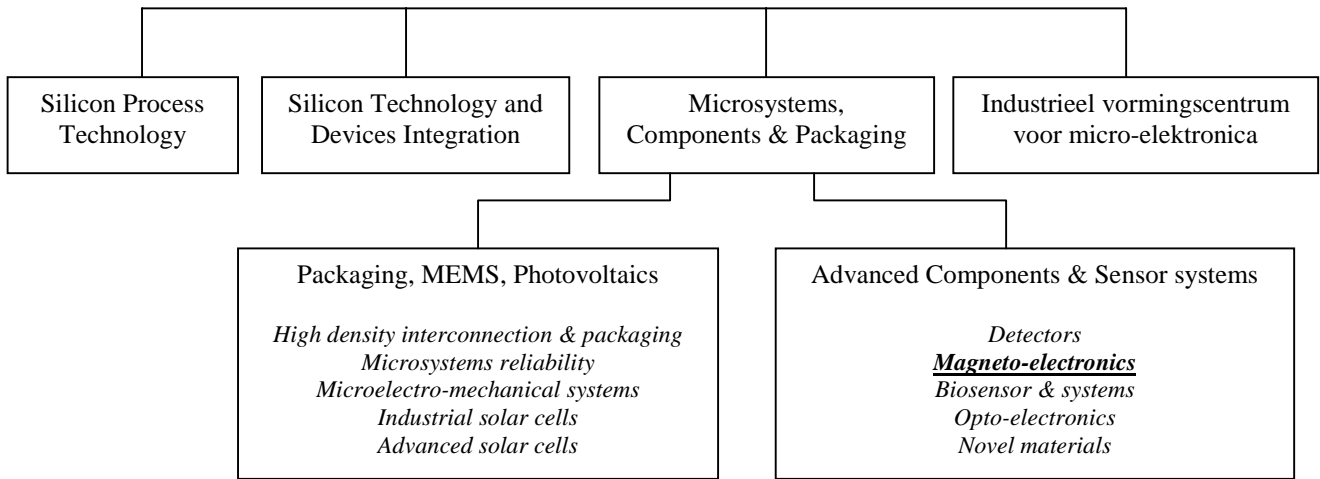
Dankzij een nauwe samenwerking met de industrie en een jaarlijkse steun van de Vlaamse regering slaagt Imec er in zijn onderzoek af te stemmen op de toekomstige industriële noden. Ook aan de samenwerking met universiteiten en studenten wordt zeer veel belang gehecht.

Om studenten kennis te laten maken met Imec wordt elk jaar een zomerstage georganiseerd. Deze stage geeft de studenten de kans om gedurende zes weken, onder begeleiding, rond een onderzoeksproject te werken. Ook buitenlandse studenten kunnen deelnemen. Aan het einde van de stage geeft elke student een presentatie in het Engels.

Ikzelf heb mijn stage gelopen in de groep magneto-elektronica. Figuur 1 geeft aan waar deze groep zich bevindt binnen de structuur van Imec. Onderzoeksthema's in deze groep zijn Magnetic random access memory (MRAM), magnetische sensoren en de ontwikkeling van nieuwe magnetische materialen zoals magnetische halfgeleiders.

Mijn dagelijkse begeleidster was Liesbet Lagae. Zij bereidt op Imec een doctoraat voor over het dynamisch gedrag van magnetische domeinen. In het kader van dit doctoraat is zij een jaar geleden gestart met een meetopstelling die, gebaseerd op het magneto-optisch Kerreffect (MOKE), de magnetisatie van een materiaal meet.

Mijn stageopdracht was zeer ruim omschreven, namelijk eerst leren werken met de MOKE-opstelling om daarna eventuele verbeteringen of verdere uitbreidingen aanbrengen. Ik heb mij vooral bezig gehouden met de karakterisering van zachte magnetische materialen. Dit was dan ook het onderwerp van mijn presentatie. Hierna volgt een uitgeschreven versie van die presentatie.



Figuur 1 : De groep Magneto-elektronica binnen de structuur van Imec

2 Moke - karakterisering van zachte magnetische materialen

Tijdens mijn stage heb ik mij vooral beziggehouden met het uitvoeren van MOKE-metingen op CoNiFe-legeringen. Deze legering zal gebruikt worden in de schrijfkop van magnetisch geheugens.

Een eerste hoofdstuk gaat over zachte magnetische materialen in het algemeen. Vervolgens wordt het onderzoek een beetje gesitueerd. Daarna volgt de bereiding van de monsters en een beschrijving van de meetopstelling. Tenslotte worden enkele meetresultaten besproken.

2.1 Vele toepassingen voor zachte magnetische materialen

De belangrijkste types van magnetische materialen zijn diamagnetische, paramagnetische en ferromagnetische materialen. Diamagnetisme en paramagnetisme zijn slechts zwakke fenomenen. Vooral ferromagnetische materialen zijn vanwege hun hoge permeabiliteit belangrijk voor ingenieurstoepassingen.

Het gedrag van een ferromagnetisch materiaal in een magnetisch veld wordt beschreven door zijn hysteresislus (figuur 2).

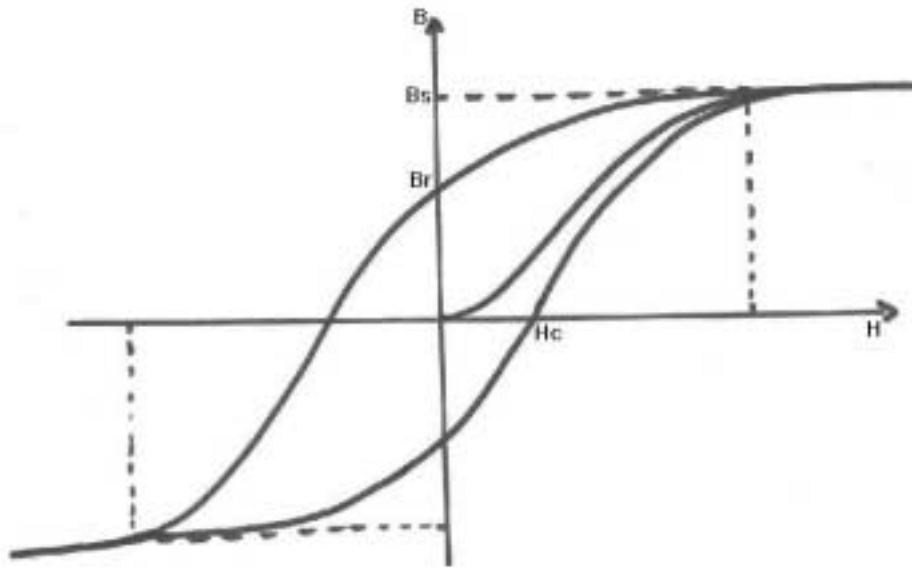
Ferromagnetische materialen met een coërciviteit lager dan 1000 A/m worden *zacht* genoemd. Deze materialen hebben meestal ook lage hysteresisverliezen. Zachte magnetische materialen worden hoofdzakelijk gebruikt in de elektrotechniek. In vele toepassingen o.a. *elektromagneten, relais, transformatoren, motoren, generatoren, ...* wenst men een hoge permeabiliteit en een lage coërciviteit, vooral om de hysteresisverliezen te beperken. Een ander, groeiend toepassingsdomein is dat van de magneto-elektronica. Enerzijds zijn er de magnetische *sensoren* en *actuatoren* waar ook een hoge permeabiliteit en een zeer lage coërciviteit worden nagestreefd. Anderzijds worden er ook zachte magnetische materialen gebruikt in de *schrijfkop van magnetische geheugens*.

Een magnetisch geheugen bestaat uit magnetische elementjes die elk twee stabiele magnetisatietoestanden hebben. De ene toestand wordt gebruikt als '0' de andere als '1'.

Het schrijven (= de geheugenelementjes in de juiste toestand brengen) gebeurt meestal inductief. Figuur 3 geeft een heel eenvoudige voorstelling van een schrijfkop. Om te schrijven wordt een stroom door de windingen gestuurd. Deze stroom induceert een magnetische flux doorheen het magnetisch materiaal en de luchtspleet. Het magnetisch veld dat zo in de luchtspleet ontstaat, brengt het geheugenbitje in de gewenste magnetisatietoestand.

Het lezen gebeurt meestal magnetoresistief.

Voor de geheugenelementjes zelf worden harde magnetische materialen gebruikt, maar in de schrijfkop wenst men een materiaal dat zo zacht mogelijk is.



B : magnetische inductie; B_r : remanent veld; B_s : verzadigingsveld
 H : aangelegd magnetisch veld; H_c : coërcitief veld;
 M : magnetisatie van het materiaal; M_r : remanente magnetisatie; M_s : verzadigingsmagnetisatie
 μ : permeabiliteit; μ_0 : permeabiliteit in vacuum; μ_r : relatieve permeabiliteit
 χ : susceptibiliteit

Belangrijke relatie tussen de verschillende grootheden :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$$\chi = \frac{M}{H}$$

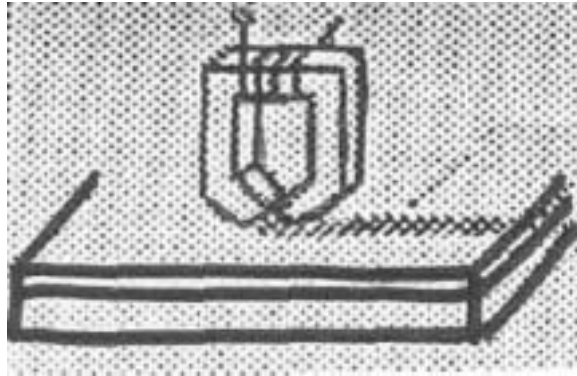
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \chi + 1$$

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0(1 + \chi)H = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

Hysteresisverliezen :

$$\int H dB \quad (= \text{oppervlakte van de hysteresislus})$$

Figuur 2 : Belangrijke eigenschappen van een ferromagnetisch materiaal



Figuur 3 : De werking van een inductieve schrijfkop

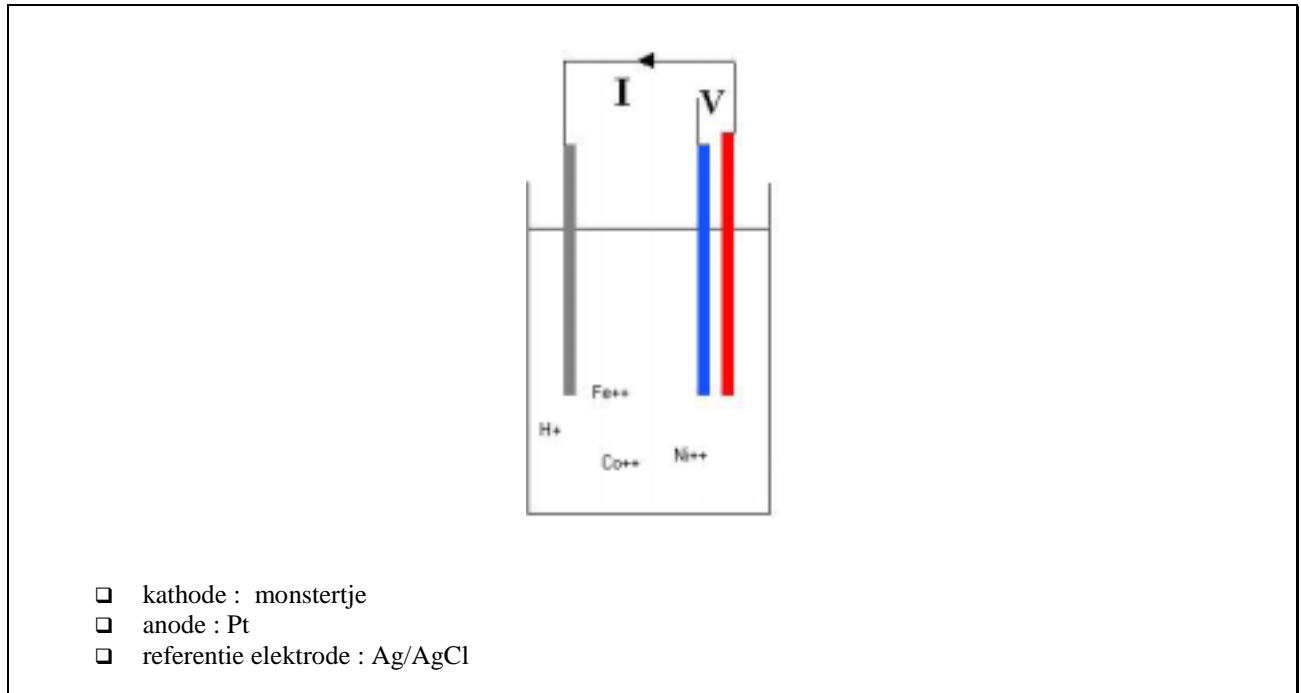
2.2 Situering van het onderzoek

Momenteel worden voor de schrijfkop van een magnetische geheugen NiFe-legeringen gebruikt. Maar men wil steeds meer informatie op minder ruimte opslaan. Als de geheugenelementjes kleiner worden en dichter bij elkaar liggen, wordt het magnetisch veld dat elk vanwege zijn burens ondervindt groter. Voor de geheugenelementjes moeten dus materialen gebruikt worden met een hogere coërciviteit opdat elk elementje de juiste magnetisatietoestand kan bewaren. De huidige schrijfkoppen zijn dan niet meer in staat deze elementjes van magnetisatietoestand te veranderen. Men weet dat bepaalde legeringsaanstellingen van CoNiFe een verzadigingsmagnetisatie hebben die wel voldoet aan de toekomstige eisen.

De opdracht bestaat erin uit de CoNiFe-legeringen met een voldoende hoge verzadigingsmagnetisatie die samenstelling te vinden met een zo hoog mogelijke permeabiliteit en een zo laag mogelijke coërciviteit. Zodat er geschakeld kan worden met zo laag mogelijke stromen en zo klein mogelijke verliezen. Bovendien mag de legering geen magnetostrictie vertonen om interne spanningen te vermijden en moet de elektrische weerstand zo groot mogelijk zijn om wervelstroomverliezen te beperken.

2.3 Bereiding van de monsters via elektrodepositie

Er wordt gebruik gemaakt van een potentiostat (zie figuur 4). Dit is een systeem met 3 elektroden. De legering wordt neergeslagen aan de kathode op een silicium wafer. De anode is een Pt-elektrode. Daarnaast is er ook een referentie elektrode. Dit is een Ag/AgCl-elektrode. Een constante spanning wordt aangelegd tussen de kathode en de referentie elektrode, maar de stroom vloeit tussen de kathode en de anode. Op die manier kan de aangelegde spanning beter gecontroleerd worden. Het elektrolyet bevat de Co-, Ni- en Fe-ionen. De pH wordt geregeld door een welbepaalde hoeveelheid H_2SO_4 toe te voegen.



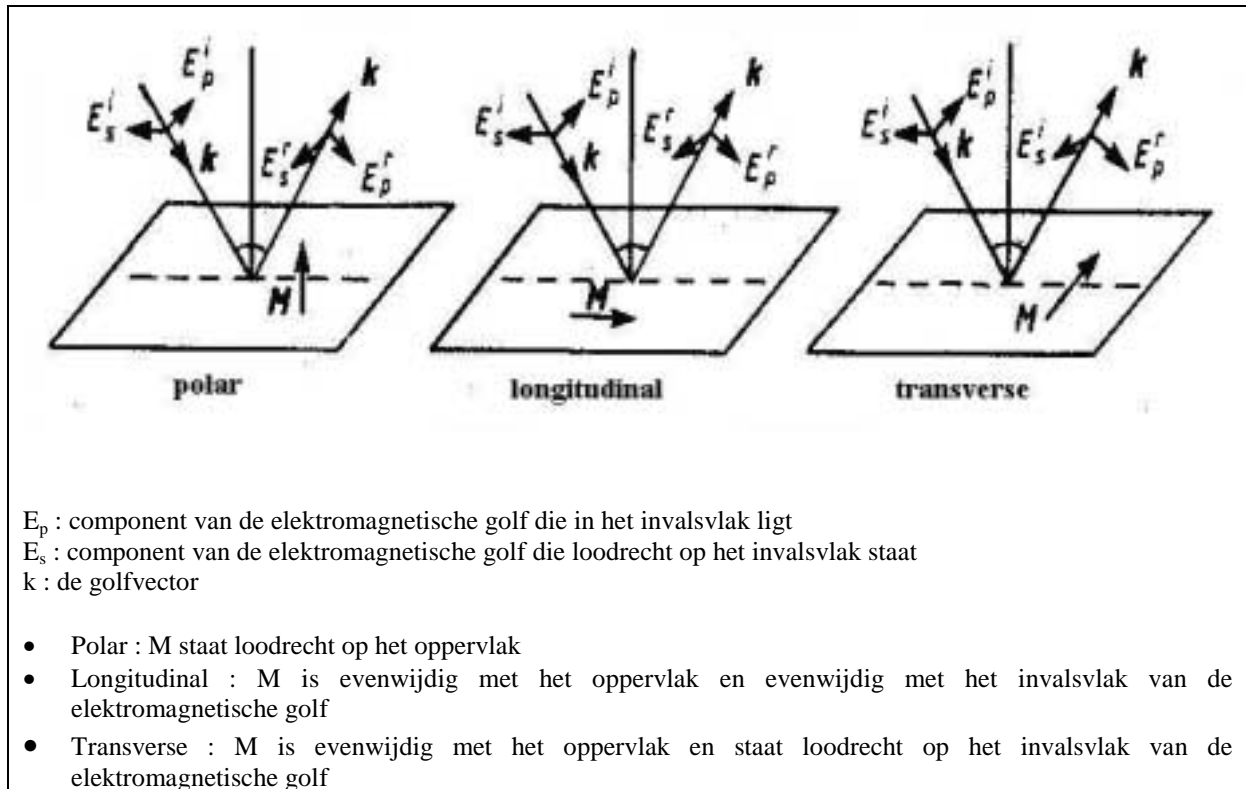
Figuur 4 : Elektrodesysteem voor de elektrodepositie van CoNiFe-legeringen op een Si-wafer

De silicium wafer wordt op een messing elektrode geplakt. Een druppeltje Ag moet zorgen voor het elektrisch contact tussen de silicium wafer en de elektrode. De rest van de elektrode wordt nauwkeurig afgeschermd. De kathode wordt in een zeepoplossing gedompeld om het siliciumoppervlak hydrofiel te maken en vervolgens in een H_2SO_4 -oplossing om eventuele oxiden te verwijderen.

De samenstelling van de legering wordt gestuurd door de concentraties van de Co-, Ni- en Fe-ionen in het elektrolyt en door de aangelegde spanning. De dikte van de laagjes wordt bepaald door de duur van de elektrodepositie, maar kan niet nauwkeurig op voorhand voorspeld worden omwille van waterstofontwikkeling aan de kathode. De exacte samenstelling en dikte worden nadien nog gecontroleerd.

2.4 Het Magneto-optisch Kerreffect (MOKE)

Wanneer een elektromagnetische golf gereflecteerd wordt aan het oppervlak van een magnetisch materiaal, is er een interactie van het materiaal met de golf. Het magneto-optisch Kerreffect slaat op alle verschijnselen die hiermee te maken hebben. Meestal is het een zwak verschijnsel. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen drie configuraties (figuur 5) op basis van de oriëntatie van de magnetisatie.



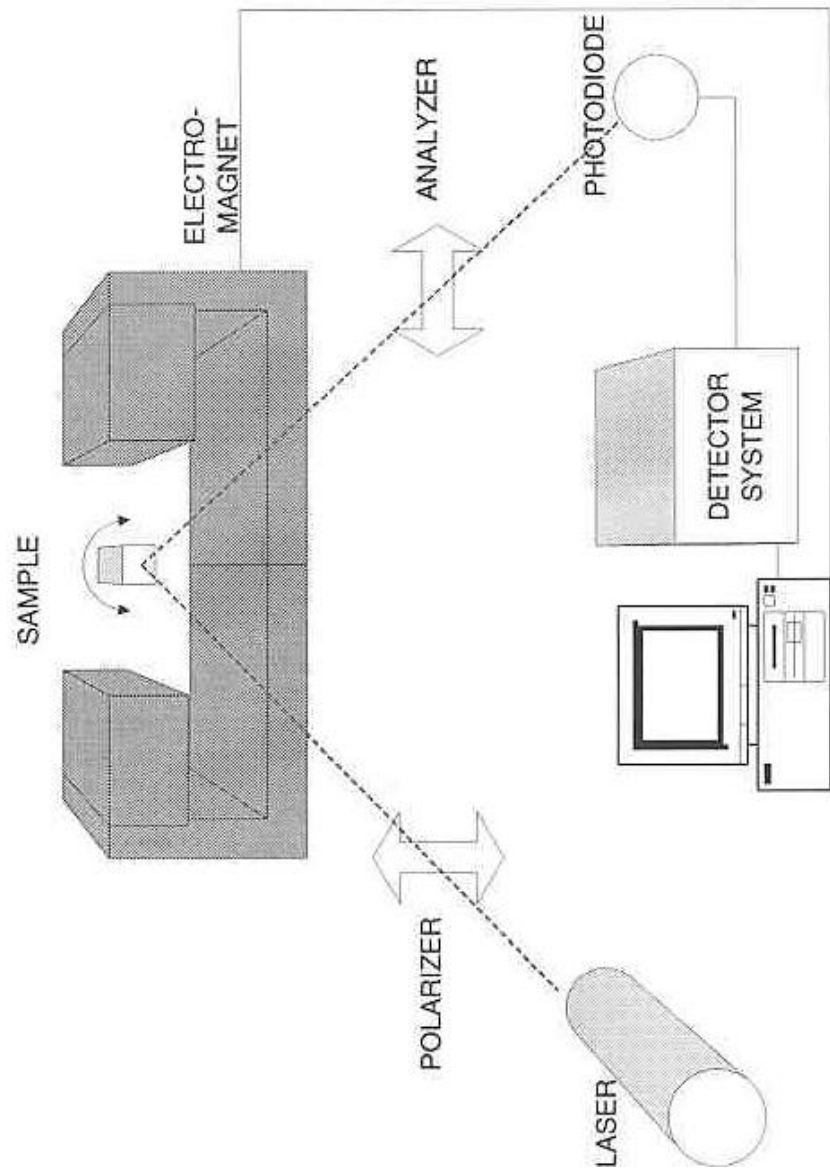
Figuur 5 : De drie configuraties op basis van de oriëntatie van de magnetisatie

Eén van de gevolgen van het magneto-optisch Kerreffect is dat het polarisatievlak van een lineair gepolariseerde golf roteert over een kleine hoek die evenredig is met de magnetisatie.

$$M \sim \Theta$$

Deze rotatie kan gemeten worden in de polaire of in de longitudinale configuratie.

Een ander effect is ellipticiteit : een lineair gepolariseerde golf wordt elliptisch gepolariseerd. De intensiteit van de golf verandert ook.



figuur 6 : De MOKE-opstelling op Imec

2.5 De meetopstelling

Figuur 6 geeft een schematische weergave van de meetopstelling op Imec.

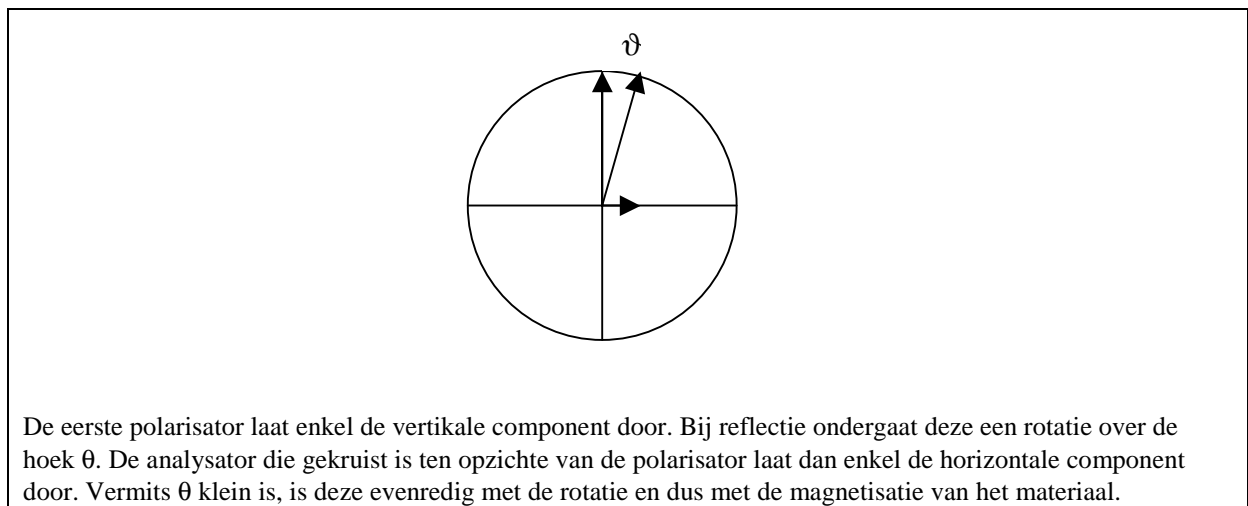
Er wordt gemeten in de longitudinale configuratie.

Het monstertje wordt geplaatst tussen de polen van een elektromagneet. De magneet wordt aangestuurd door een stroombron. Omdat de magneet zelf ook hysteresis vertoont, bestaat er geen eenduidig verband tussen de aangelegde stroom en het magnetisch veld dat aanwezig is tussen de polen van de magneet. Daarom wordt op één van de polen een Hall-sensor geplaatst die het exacte veld meet.

Een He-Ne laser dient als lichtbron. De straal wordt lineair gepolariseerd door een polarisator. Na reflectie op het monsteroppervlak gaat de straal door een analysator. De analysator is een polarisator die gekruist opgesteld staat ten opzichte van de eerste polarisator. De hoeveelheid licht dat door de analisator geraakt is evenredig met de rotatiehoek Θ (figuur 7). Dit licht zal gedetecteerd worden door een fotodiode.

Ergens in het lichtpad staat een chopper om het licht te moduleren. De lock-in die verbonden is met de detector en met de chopper demoduleert het signaal.

De volledige meting is computergestuurd met Labview, een grafische programmeertaal.

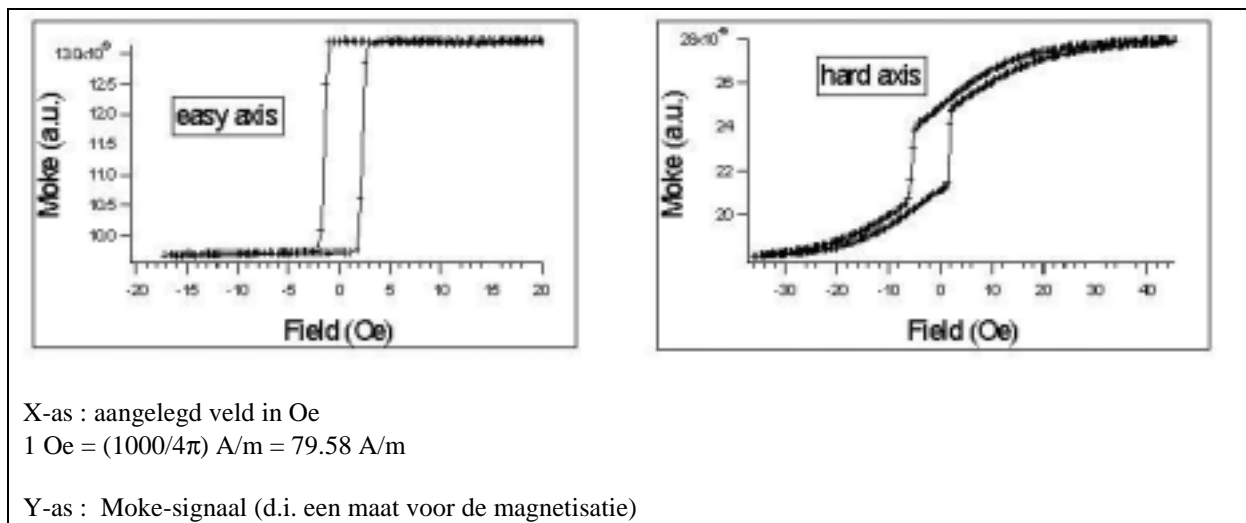


Figuur 7 : De werking van de polarisator en de analysator

Om een hysteresislus te bekomen wordt het veld tussen de polen van de elektromagneet eerst opgedreven tot een veldsterkte H_{\max} . Om juiste hysteresislussen te bekomen is het zeer belangrijk dat H_{\max} voldoende groot gekozen wordt. Het monster moet zeker verzadigd zijn. Vervolgens daalt het veld, in stapjes, van H_{\max} tot $-H_{\max}$ om daarna terug te stijgen van $-H_{\max}$ tot H_{\max} . In elk stapje wordt het MOKE-sigitaal gemeten. Op het einde wordt het veld terug naar nul gebracht.

Figuur 8 toont twee hysteresislussen bekomen via MOKE-metingen. Langs de X-as wordt het magnetisch veld (gemeten met de Hall-sensor) uitgezet, langs de Y-as het signaal van de lock-in. De grootte van het signaal is een maat voor de magnetisatie, maar er kan geen absolute waarde aan toegekend worden.

2.6 Karakterisering van de CoNiFe-legeringen



Figuur 8 : Karakterisatie van een CoNiFe-legering

De magnetische eigenschappen van de CoNiFe-legeringen werden bepaald met behulp van het MOKE-principe. Dit leidde tot de volgende bevindingen.

De magnetisatie-eigenschappen van de CoNiFe-legeringen vertonen uni-axiale anisotropie (figuur 8). Voor een veld volgens de voorkeursrichting van de magnetische momentjes (= de zachte as) heeft het materiaal een hoekige hysteresislus. Voor een veld loodrecht op de voorkeursrichting (= de harde as) is de hysteresislus meer afgerond. Deze uniaxiale anisotropie had men eigenlijk niet verwacht. De monstertjes zijn immers amorf en bij de bereiding ervan is geen uitwendig veld aangelegd. Er is wel een concentratiegradiënt vanwege het roeren tijdens de elektrodepositie. Dit kan de anisotropie verklaren. Hier ligt echter de zachte as volgens de concentratiegradiënt. Meestal is dat de harde as.

De monstertjes met een samenstelling van 10-30% Ni , 50-70% Co en 20-40 % Fe hebben een lage coërciviteit, tussen 160 en 180 A/m.

Ondanks de lage coërciviteit en de hoge initiële permeabiliteit zijn er hoge velden nodig om de monstertjes volledig te verzadigen.

Sommige hysteresislussen zijn asymmetrisch. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het verband tussen θ en M niet echt lineair is. Er geldt eigenlijk dat

$$\theta = k_1 M + k_2 M^2 + k_3 M^3 + \dots$$

met voor de meeste materialen k_1 veel groter dan de andere k 's. Misschien kan k_2 voor CoNiFe bereid via elektrodepositie niet verwaarloosd worden. Dit fenomeen is reeds bekend voor NiFe-legeringen.

De hoekige lussen, de lage coërciviteit en de hoge verzadigingsmagnetisatie zijn alvast veelbelovende eigenschappen. De monstertjes zijn wel moeilijk te verzadigen. Dit is een belangrijk minpunt. Het verschijnsel van de asymmetrische lussen, is niet van belang voor het gebruik in schrijfkoppen maar het kan wel interessant zijn dit verschijnsel verder te onderzoeken. Er zijn nog vele andere parameters die bepalen of CoNiFe ooit in de schrijfkop van magnetische geheugens zal gebruikt worden. Er zullen ook nog andere experimenten uitgevoerd worden.

2.7 Mijn bijdrage tot het onderzoek

Vooreerst heb ik de CoNiFe-monstertjes gekarakteriseerd. Zo kon er gericht gezocht worden naar de samenstelling met de laagste coërciviteit.

De MOKE-opstelling op Imec was nooit eerder gebruikt voor het meten van zulke zachte magnetische materialen. Hierdoor stootte ik regelmatig op limieten van de opstelling. Telkens ik een beperking tegenkwam, heb ik geprobeerd de meetopstelling aan te passen. Dit heeft vooral geleid tot een verbetering van de nauwkeurigheid.

Ik heb o.a. het programma uitgebreid zodanig dat er gewerkt kan worden met een variabele stapgrootte. Enerzijds wilden we immers een hoge nauwkeurigheid bij lage velden. Dit vraagt een kleine stapgrootte. Anderzijds moesten we tot hoge velden gaan om de monstertjes volledig te verzadigen. Dit gebeurt best met een grote stapgrootte om de tijdsduur van de meting te beperken.

Daarnaast heb ik een vuistregel opgesteld waarmee men snel de wachttijd tot het uitlezen van het Moke-sigitaal kan schatten. Na het verhogen of verlagen van de stroom in elke stap, moet er namelijk even gewacht worden vooraleer het MOKE-sigitaal uitgelezen kan worden. Men dacht dat deze wachttijd vooral bepaald werd door de tijdsconstante van de lock-in. Door de vele metingen die ik heb uitgevoerd en het vergelijken van die metingen heb ik gemerkt dat er ook rekening moet gehouden worden met de tijd die de elektromagneet en het monstertje nodig hebben om te stabiliseren. De wachttijd wordt dus bepaald door de tijdsconstante en door de stapgrootte.

Bij deze kleine lussen met een lage coërciviteit werd het ook duidelijk dat de Hall-sensor niet helemaal correct gekalibreerd was. Hiermee moest rekening gehouden worden bij het interpreteren van de resultaten. In de toekomst zal de huidige Hall-sensor opnieuw gecalibreerd worden en zal de Moke-opstelling eventueel uitgerust worden met een tweede Hall-sensor. Eén met een betere resolutie.

Bovendien stelde zich het probleem van de asymmetrische lussen. Zijn de lussen asymmetrisch om wille van een onvoldoende resolutie of zit er meer achter? De vorm van de lussen verandert niet wanneer ze worden opgemeten met verschillende stapgroottes. We vermoeden dus dat het niet aan de resolutie ligt.

2.8 Besluit

Via dit project heb ik kunnen kennis maken met de elektrodepositie van magnetische materialen en met het magneto-optisch Kerreffect als karakteriseringsmethode.

Elektrodepositie is snel, gemakkelijk en goedkoop. Bovendien is het mogelijk monsters met uitstekende magnetische eigenschappen te bekomen.

Via het Moke-principe is het mogelijk zeer zachte magnetische materialen te karakteriseren. De methode heeft ook een goede veldresolutie. Een belangrijk minpunt is wel dat de meting indirect is. De absolute grootte van de magnetisatie kan niet bepaald worden. Bovendien kan het verband tussen M en θ ingewikkeld zijn.

3 Persoonlijke evaluatie van de stage

Ik heb gekozen voor een stage op Imec, in de eerste plaats om meer te weten te komen over micro-elektronica. Vooral de onderwerpen in de groep magneto-elektronica spraken mij aan. Magnetisme vind ik een interessant onderwerp. Bovendien komt de materiaalkunde regelmatig aan bod in deze groep.

De zomerstages op Imec zijn goed georganiseerd en zeker aan te raden als een eerste stage. Er is een intensieve begeleiding en als student krijg je de kans om met veel verschillende aspecten van onderzoek in contact te komen. De eerste dag krijgt iedereen gezamenlijk een inleiding die bestaat uit meer informatie over Imec en zijn activiteiten, een cleanroom training, uitleg over de productie van chips, transistoren,... Voor de rest van de stage worden de studenten verdeeld over de verschillende onderzoeksgroepen en krijgt elke student een persoonlijke begeleider. Het aantal studenten wordt beperkt tot 20 à 30 en er wordt gestreefd naar 50% buitenlandse studenten. Op die manier kan elke student uitgebreid en aangepast aan zijn noden en interesses begeleid worden. Tijdens de pauzes kan hij wel kennis maken met studenten van andere universiteiten en andere landen. De studenten mogen ook deelnemen aan allerlei activiteiten, georganiseerd op Imec, zoals een demo over een meettoestel of presentaties gegeven door mensen van Imec zelf of van buitenaf. Op het einde moet elke student een presentatie geven voor de medestagestudenten. Bij de voorbereiding van die presentatie wordt raad gegeven en de presentaties worden becommentarieerd.

Persoonlijk heb ik erg goede herinneringen aan de stage. Ik heb veel gezien en heb kunnen kennismaken met onderzoek en met mensen die onderzoek doen. Ik vond het leuk en boeiend om te zien hoe deze mensen te werk gaan. Daar heb ik ongetwijfeld veel van geleerd. Vooral over de werking van magnetische geheugens ben ik veel te weten gekomen. Zelf moest ik wel alleen maar metingen uitvoeren, maar ik ben steeds betrokken geweest bij de interpretatie ervan. Mijn begeleidster heeft mij ook veel verteld over de structuren binnen Imec, de samenwerking en verhoudingen van Imec met de industrie en de universiteiten,... Het bijwonen van presentaties en demo's was ook heel interessant.