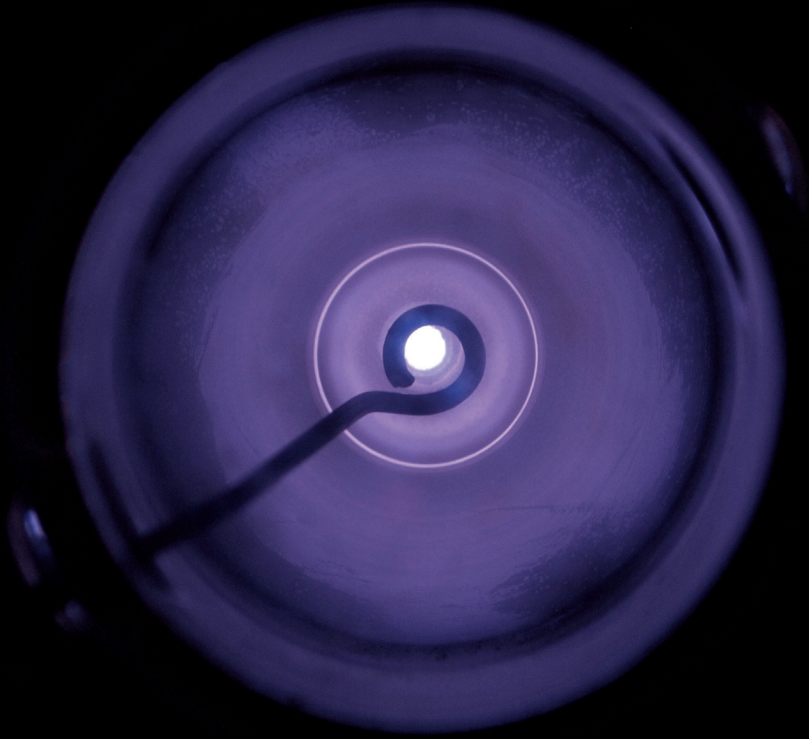


Atom lithography: Creating patterned magnetic layers



Thijs Meijer

Uitnodiging / Invitation

Voor de verdediging van het proefschrift:

Atom lithography: Creating patterned magnetic layers

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Eindhoven, op gezag van de rector magnificus, prof.dr.ir. C.J. van Duijn, voor een commissie aangewezen door het College van Promoties in het openbaar te verdedigen op maandag 23 januari 2012 om 16.00 uur

door

Thijs Meijer

Planning en locatie

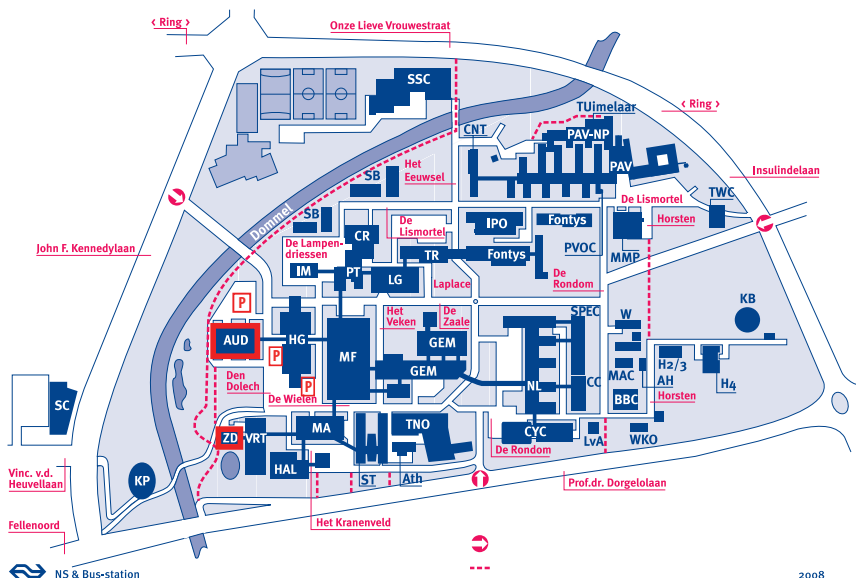
16:00 uur in Zaal 4 van het Auditorium van de TU Eindhoven

De promotiezitting bestaat uit een presentatie van ongeveer 10 minuten van mijn werk, aansluitend is de openbare ondervraging door de promotiecommissie tot exact 17:00 uur ("hora est"). Het is niet mogelijk om tijdens dit uur de zaal te betreden of te verlaten. Na de openbare ondervraging zal de promotiecommissie zich terugtrekken ter beraadslaging, waarna ze hun oordeel bekend zullen maken.

17:30 uur in cafe De Zwarte Doos: Aansluitend aan de promotiezitting bent u van harte uitgenodigd voor de borrel in cafe De Zwarte Doos, deze bevindt zich op ongeveer 100 meter van het Auditorium. De borrel zal tot ongeveer 19.00 uur duren.

Bereikbaarheid en parkeermogelijkheden:

De plattegrond van de TU Eindhoven staat hieronder, met daarop het Auditorium (AUD), de Zwarte Doos (ZD) en parkeergelegenheid (P). Parkeeren is betaald: laat vooraf weten dat je wilt parkeren (via t.meijer@tue.nl), dan zorg ik voor een gratis parkeerkaart.



Inleiding

Op 23 januari zal ik mijn proefschrift "*Atom lithography, creating patterned magnetic layers*" verdedigen. Graag wil ik u uitnodigen hierbij aanwezig te zijn.

Het is gebruikelijk dat de uitnodiging voor een promotiezitting vergezeld gaat van het proefschrift zelf. Het is echter mijn mening dat proefschriften, het mijne niet uitgezonderd, niet direct toegankelijk zijn voor de leek. Mijn proefschrift is geschreven in het engels en het vereist een goed inzicht in de natuurkunde om begrepen te worden. Daarom wil ik graag in deze uitnodiging, een korte, nederlandstalige samenvatting geven, die hopelijk beter toegankelijk is voor diegenen die geen natuurkunde hebben gestudeerd. Op deze wijze hoop ik iets over te brengen van wat ik de afgelopen jaren heb gedaan en wat ik heb bereikt.

Uiteraard stel ik mijn proefschrift graag ter beschikking aan iedereen die in de complete versie is geïnteresseerd. Je kan een digitale versie van het proefschrift vinden op www.thijs-meijer.nl en hier vind je ook de mogelijkheid om dit proefschrift kostenloos te bestellen.

Verder staat in deze uitnodiging ook een overzicht van de stellingen, die tijdens de promotiezitting ter sprake kunnen komen. Tevens is de officiële, engeltalige samenvatting toegevoegd zoals deze in het proefschrift staat alsmede het dankwoord van het proefschrift. Ik wens jullie veel plezier met het lezen van deze uitnodiging. Graag hoor ik jullie reactie op de nederlandstalige samenvatting: of het jullie de mogelijkheid biedt om een beeld te krijgen van het werk wat ik heb gedaan en de resultaten die ik heb bereikt. Ik hoop jullie op 23 januari te zien!

(in English)

I would like to invite you to attend my thesis defense on the 23rd of January. At the end of this booklet you will find the english summary and the acknowledgements of the thesis "*Atom lithography, creating patterned magnetic layers*" as well as the "stellingen" (theses) that go with it. You can find the full text of the thesis on www.thijs-meijer.nl, where you can also order a copy of the thesis free of charge.

Samenvatting

In 1933 deed Otto Frisch een experiment dat voor het eerst aantoonde dat licht een mechanisch effect kan hebben op atomen [1]. Schematisch is het experiment weergegeven in Figuur 1. Frisch maakte een gas van natrium atomen in een vacuüm, wat hij door enkele sleuven leidde, zodat er een bundel van natrium atomen gecreëerd werd. Deze bundel atomen werd vervolgens van de zijkant belicht met een natrium lamp. Aangezien het licht van een natriumlamp resonant is met een overgang in natrium atomen, kan een natrium atoom dit licht absorberen. In dit experiment absorbeerde een op de drie atomen een foton (een "lichtdeeltje"). Doordat een atoom dan ook de impuls van het lichtdeeltje absorbeert, wordt het atoom afgebogen van zijn oorspronkelijke pad. In Figuur 1 kun je de atomen zien als biljartballen die rechthoekig bewegen, totdat de lichtdeeltjes vanaf de zijkant als waren ze kleine knikers tegen de biljartballen schieten en zo de biljartbal-atomen iets uit koers brengen. Hoewel de atomen slechts 0.01 mm werden afgebogen van hun pad, was Frisch toch in staat om dit te meten, waarmee hij het basis concept aantoonde dat atomen en atoombundels te manipuleren zijn met licht.

Om atoombundels beter te kunnen manipuleren is er een intenser, coherent lichtveld nodig, dat vandaag de dag beschikbaar is in de vorm van lasers. Interacties tussen lasers en atomen hebben veel nieuwe ontwikkelingen binnen de natuurkunde mogelijk gemaakt, zoals laser-koeling van atomen en ionen [2,3], Bose-Einstein condensatie [4] en atoom lithografie [5]. Dit laatste is het onderwerp van dit proefschrift.

In atoom lithografie worden de interacties tussen atomen en licht gebruikt om gestructureerde deposities van atomen te maken. Deze interacties werken tussen atomen en een bijna resonant lichtveld. Een lichtveld is resonant als het licht door het atoom geabsorbeerd kan worden, waarbij het atoom van de ene toestand naar een andere toestand gaat. Waar in het experiment van Frisch de interactie gezien kon worden als de absorptie van een enkel foton en zijn impuls, zijn de interacties van atomen met een intens vrijwel resonant lichtveld veel complexer. De basis van atoom lithografie kan echter eenvoudig duidelijk worden gemaakt aan de hand van Figuur 2.

In Figuur 2a is een lamp te zien, waaruit licht komt dat door een lens gefocusseerd wordt naar een punt. Dit beeld helpt om Figuur 2b te begrijpen. Hierin is een staand lichtveld weergegeven, dat vlak boven een

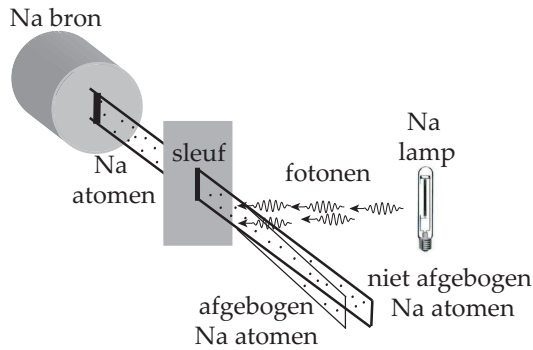


Figure 1: Schematische weergave van het experiment van Frisch [1] in 1933 om een bundel natrium (Na) atomen af te buigen door de absorptie door een atoom van een enkel foton en zijn impuls.

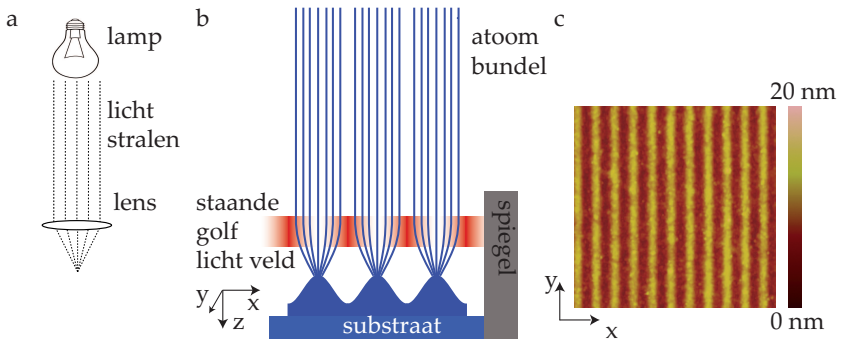


Figure 2: Schematische weergave van atoom lithografie. a) Als referentie het beeld van licht wat gefocusserd wordt door een lens. b) Een staande lichtgolf, vrijwel resonant met een atomaire overgang, vormt een rij lenzen die een atoombundel focussen tot lijnen op een substraat met een onderlinge afstand van een halve golflengte ($\lambda/2$). c) AFM hoogtebeeld van een $2 \times 2 \mu\text{m}$ gebied met atoom lithografische lijnen.

substraat is gepositioneerd. Dit staande lichtveld wordt gemaakt door een laser exact haaks op een spiegel te laten vallen, zodat deze terugreflecteert op zichzelf. Een bundel atomen valt van boven haaks in op het staande lichtveld, weergegeven door de paden die de atomen afleggen. De interacties van het lichtveld met de atomen focuseren de atomen naar de knopen of buiken van het staande lichtveld, afhankelijk van de precieze golflengte van het licht. In Figuur 2b worden de atomen gefocuseerd naar de knopen in het lichtveld, waar de intensiteit nul is. Feitelijk werkt het staande lichtveld dus als een serie lenzen, die de atomen focuseert. De gefocuseerde atoombundels worden op het substraat gedeponneerd, waar ze lijnstructuren vormen. De periodiciteit van de lijnstructuren is exact gelijk aan de helft van de golflengte van het licht, $\lambda/2$. Deze golflengte, λ , is typisch enkele honderden nanometers, zodat met atoom lithografie nanostructuren gecreëerd kunnen worden. Aangezien de golflengte van het licht zeer goed bepaald is, is ook de periodiciteit van de structuren zeer goed gedefinieerd. In Figuur 2c is als voorbeeld een AFM (atoomkrachtmicroscopie) hoogtebeeld te zien van een $2 \times 2 \mu\text{m}$ groot oppervlak van ijzer, gestructureerd met atoom lithografie. Lijnen met een onderlinge afstand van 186 nm zijn duidelijk te herkennen. Atoomlithografie is dus een nanotechnologie, die de mogelijkheid biedt om nanostructuren te maken die bijvoorbeeld gebruikt zouden kunnen worden in computerchips, geheugens in computers of andere nanostructuren.

Het eerste experiment met atoom lithografie werd gedaan in de jaren '90 met de elementen natrium [5] en chroom [6]. In dit proefschrift worden experimenten met ijzer atomen beschreven. IJzer is een magnetisch materiaal, zodat magnetische nanostructuren gemaakt kunnen worden. IJzer heeft echter een aantal nadelen ten opzichte van natrium en chroom. Zoals gezegd is er voor atoom lithografie licht nodig wat bijna resonant is met een atomaire overgang, wat voor ijzer betekent dat licht met een golflengte van $\lambda = 372.0$ nm nodig is. Voor dit golflengtegebied zijn echter geen commerciële lasers beschikbaar. Daarom is een speciaal lasersysteem ontworpen aan de TU Eindhoven om toch een stabiele laser te maken in dit golflengte gebied [7]. Op de voorkant van de kافت staat een onderdeel hiervan: een doorkijk in een gascel waarin ijzer en argon gas oplichten. Metingen aan absorptie van het laserlicht in deze gascel worden gebruikt om de golflengte van het lasersysteem stabiel te houden.

Naast dit technische probleem heeft de resonante overgang van ijzer bij $\lambda = 372.0$ nm het probleem dat deze overgang niet gesloten is. In een gesloten overgang gaat het atoom tijdens absorptie en emissie van licht

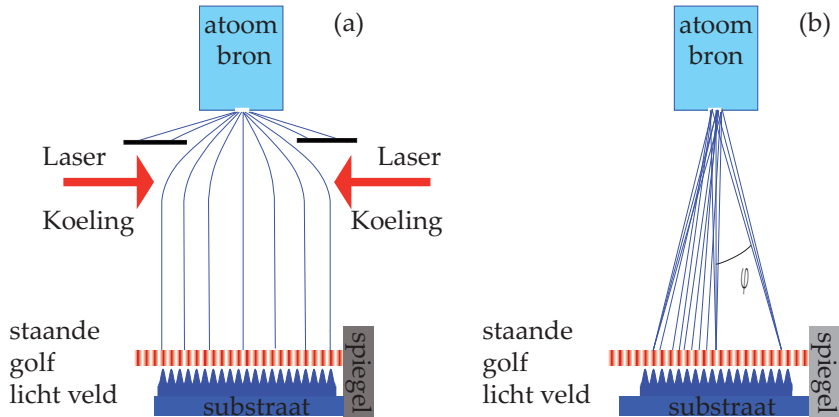


Figure 3: *Schematische weergave van atoom lithografie met (a) een laser ge-coelde atoombundel, waarbij een globaal gecollimeerde bundel wordt gecreëerd of met (b) geometrische koeling, waar lokaal op het lichtveld een gecollimeerde bundel wordt gecreëerd.*

van de ene toestand naar een andere toestand en weer terug. In een niet gesloten overgang, kan het atoom ook in (vele) andere toestanden terecht komen, waarna het geen interactie meer heeft met het lichtveld. Dit is vooral een probleem omdat voor atoom lithografie veelal ook een tweede techniek wordt gebruikt, namelijk laser-koeling. Dit is een techniek waar met lasers de transversale snelheid van de atoombundel omlaag gebracht wordt om de bundel beter parallel te maken. Een parallel bundel wordt beter gefocuseerd op het substraat in atoom lithografie, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 3a. Voor laser-koeling is herhaalde absorptie en emissie nodig. In het geval dat een atoom geen gesloten overgang heeft, is laser-koeling niet goed toe te passen, omdat atomen in een andere toestand terecht kunnen komen en vervolgens niet gefocuseerd kunnen worden in het atoom lithografische proces.

Dit is lang een fundamenteel probleem geweest voor atoom lithografie van ijzer en andere materialen zonder gesloten overgang [8]. In Eindhoven [9] is echter gevonden dat als de bron van de bundel klein is (bijvoorbeeld 1 mm) en ver van het lichtveld staat (bijvoorbeeld 1 m), dat dan lokaal op het lichtveld de bundel wel goed gecollimeerd is, zoals te zien is in Figuur 3b. Hierin is echter ook direct te zien dat de atoombundel nu niet langer overal haaks op het lichtveld valt, maar lokaal een offset hoek, φ , heeft. In

hoofdstuk 3 van het proefschrift wordt beschreven wat de effecten zijn op de vorming van structuren van de geometrische collimatatie. Lijnstructuren met een periode van 186 nm zijn gevonden met een hoogte tot 7 nm op een laag ijzer die gemiddeld 15 nm dik is, over een gebied van $400 \mu\text{m} \times 6 \text{ mm}$. Uit de grootte van dit gebied is af te leiden dat de locale offset hoek φ over 8 mrad mag veranderen, wat een orde groter is dan de lokale collimatiehoek van de atoombundel. De offset hoek φ beïnvloedt geometrie van de structuren: met grotere φ worden lijnen lager, breder, verandert de positie ten opzichte van het lichtveld en wordt een scheefheid van de lijnen geïntroduceerd.

De lokale geometrie van de lijnen is gemodelleerd met een theoretisch Monte Carlo model voor de deeltjesbanen van de atomen in het lichtveld. De resultaten zijn vergeleken met de experimenten. Hieruit is gebleken dat de hoogste en smalste gemodelleerde lijnstructuren in de experimenten significant verbreed worden door oppervlakte diffusie van atomen op het substraat, zodat de structuurbreedte op SiOx substraten verbreed tot minimaal 80 nm. Aangezien de nieuwste generatie computerchips al structuren gebruikt met een breedte van 22 nm, is dat een ernstige limiet op toepassingen van atoom lithografie. Uit de modellering is ook gebleken dat in atoom lithografie iedere "lens" van het lichtveld feitelijk de geometrie van de atoom bron afbeeldt op het substraat. Het staande lichtveld in Figuur 2 kan gezien worden als een reeks lenzen, die de atoombundel focuseren tot een reeks lijnen op het substraat. Dat biedt de mogelijkheid om met atoom bronnen die niet uit een enkele ronde opening bestaan, maar die een patroon bevatten, deze (complexere) patronen na te maken op het substraat op lengteschalen kleiner dan de golflengte van het licht.

De reden om ijzer te gebruiken in atoom lithografie, was de mogelijkheid om magnetische nanostructuren te maken. Echter, in eerdere experimenten in Eindhoven [7] en Nijmegen [10], heeft atoom lithografische structurering van ijzer nooit een duidelijk effect opgeleverd in de magnetische eigenschappen. Daarom is eerst een aantal referentie experimenten uitgevoerd, die in Hoofdstuk 4 beschreven worden.

Allereerst zijn ongestructureerde lagen van ijzer (Fe), nikkel (Ni) en ijzer-nikkel legeringen $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ onderzocht. Deze lagen zijn allemaal ferromagnetisch, maar hun magnetisch moment is verminderd ten opzichte van de literatuurwaarden. Dit wordt veroorzaakt door verontreinigingen die in het materiaal komen gedurende de depositie. Doordat de atoombron ver van het substraat staat, is de depositiesnelheid laag, zodat verontreinigingen in het materiaal niet voorkomen kunnen worden.

Een tweede referentie experiment is gedaan om de invloed van lijnstructuren op de magnetische eigenschappen te onderzoeken. Met behulp van interferentielithografie is een periodieke lijnstructuur gemaakt in een polymeerlaag op het substraat. Daarop zijn vervolgens dunne lagen van $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ gedeponerd. Doordat het ijzer onder een andere hoek ten opzichte van de lijnstructuur is gedeponerd dan het nikkel, zijn er door schaduweffecten magnetische lagen gecreëerd die zowel in geometrie als in elementaire compositie periodiek veranderen. Deze periodieke modulatie van de $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ compositie is gemeten met SEM-EDX op submicrometer lengte schalen. Op basis van theorie en literatuur is de verwachting dat deze magnetische lijnstructuren een anisotropie vertonen, waarbij een zogenaamde magnetische makkelijke as bestaat parallel aan de lijnen. Dit is inderdaad gemeten.

In hoofdstuk 5 zijn de magnetische eigenschappen van atoom lithografische ijzerstructuren beschreven. Deze structuren zijn gemeten met MOKE (Magneto-Optisch Kerr Effect) microscopie, een techniek die de lokale magnetisatie van dunne lagen zichtbaar maakt. Hiermee is het mogelijk om in één blikveld de magnetisatie van gestructureerde en ongestructureerde delen van een substraat te bekijken, zodat voor het eerst een magnetische signatuur van de structurering zichtbaar is gemaakt.

De anisotrope effecten van de atoom lithografisch lijnstructuren zijn gemeten in lagen van gemiddeld 15 nm dik en in lagen van gemiddeld 30 nm dik, waarbij dus ook de hoogte van de lijnen verandert. De hoekafhankelijke coërciviteit is gemeten, dit is een maat voor de stabiliteit van een magnetische structuur, namelijk de grootte van het externe veld die benodigd is om de magnetisatie van de structuur naar 0 te brengen. In de 15 nm dikke lagen is geen anisotropie van de lijnstructuren gevonden, maar wordt de coërciviteit isotroop verhoogd. Dit betekent dat de lijnstructuren in deze lagen meer lijken op een isotrope vergroting van de ruwheid, dan op directionele lijnstructuren. In de lagen met een dikte van 30 nm zijn wel anisotrope magnetische effecten gevonden. Deze effecten omvatten gedrag dat wijst op de verwachte magnetische makkelijke as in de richting van de lijnen, maar daarnaast is ook een onverwachte verhoging van de coërciviteit gevonden haaks op de lijnen. Dit fenomeen is verbazingwekkend en kan mogelijk verklaard worden doordat magnetische domeinwanden (de wanden die twee verschillende gemagnetiseerde gebieden scheiden) vastgepind worden langs de richting van de lijnen en daarmee de coërciviteit verhogen.

In hoofdstuk 5 worden tenslotte ook de eerste resultaten getoond van

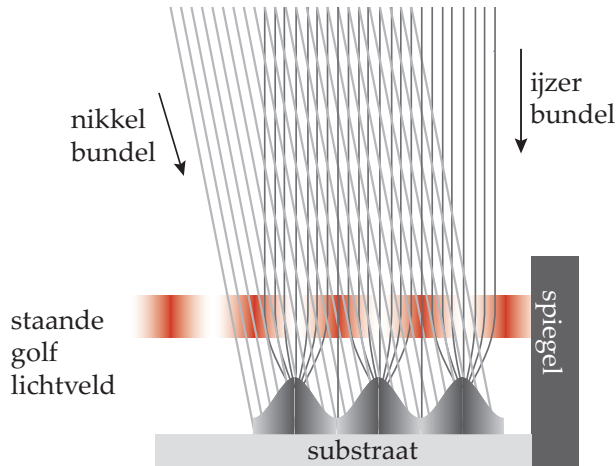


Figure 4: *Schematische representatie van co-depositie van Fe_xNi_{1-x} , waarbij ijzer wordt gestructureerd middels atoom lithografie, terwijl nikkel uniform wordt gedeponeerd.*

codepositie van Fe_xNi_{1-x} , een unieke mogelijkheid van atoom lithografie, schematisch weergegeven in Figuur 4. IJzer en nikkel worden simultaan gedeponeerd, waarbij het ijzer wordt gestructureerd door het lichtveld wat resonant is met de overgang in ijzer, terwijl het nikkel geen interactie heeft met het lichtveld en uniform wordt gedeponeerd. Hierdoor wordt een legering gemaakt die periodiek verandert van compositie. Een eerste magnetische analyse van deze structuren geeft aan dat deze structuren anisotroop zijn, waar zowel de coërciviteit als de vorm van de magnetische domeinwanden bepaald wordt door de hoek van het extern aangelegde magneetveld ten opzichte van de lijnstructuren.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 gekeken naar de mogelijkheden om andere lichtvelden te maken, die een atoombundel van $10 \mu\text{m}$ diameter kunnen comprimeren of focuseren tot een 100 nm grote bundel. Een dergelijke kleine bundel kan gebruikt worden als “nano-pen” om nanostructuren te schrijven op een substraat. Een dergelijke “nano-pen” biedt de vrijheid om iedere structuur anders te maken, terwijl de meeste technieken om nanostructuren te maken alleen repetitief eenzelfde structuur kunnen maken. In Figuur 5 worden twee mogelijkheden weergegeven. Om deze systemen te modelleren is een Monte Carlo model gebruikt. Dit model rekent onder andere de effecten mee van de divergentie van de

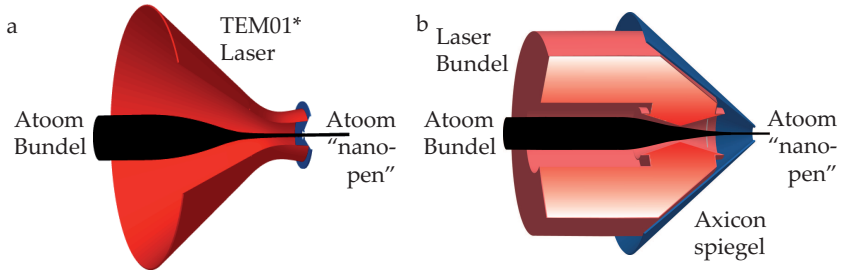


Figure 5: Schematische weergave van opties om atoombundels te comprimeren of focuseren tot 100 nm atoombundels: (a) een blauw verstemde, holle laser bundel (TEM01*) waar atomen naar de lage-intensiteit worden gefocuseerd (b) een rood verstemde laserbundel gefocuseerd in een axicon spiegel, waar atomen naar de hoge intensiteit op de hartlijn worden gefocuseerd.

inkomende atoombundel, de magnetische substructuur van de atomen, evenals de mogelijkheden van laser-koeling en de gevolgen van spontane en gestimuleerde diffusie van atomen in het lichtveld. In experimenteel realistische omstandigheden blijkt het slechts mogelijk te zijn om in een holle bundel die zogenaamde blauw verstemd is (dan is de golflengte van het lichtveld iets kleiner geworden en dus richting het blauw verschoven, Figuur 5a) een atoombundel te comprimeren tot een formaat van $FWHM = 0.55 \mu\text{m}$, terwijl in het rood verstemde axicon veld (Figuur 5b) een formaat $FWHM = 0.31 \mu\text{m}$ mogelijk is. In het laatste geval echter wordt er ook rondom de gefocuseerde bundel nog veel achtergrond materiaal gedeponereerd, de gefocuseerde bundel deponeert slechts 25 maal meer atomen per oppervlak in de achtergrond eromheen, wat praktische toepassing moeizaam maakt. De limiterende factor van alle gevallen, is de zogenaamde gestimuleerde diffusie van de atomen in het lichtveld, als gevolg van absorptie en spontane emissie, tezamen met de beperkte interactietijd die de atomen hebben als ze door het lichtveld bewegen. Een dergelijke "nano-pen" is daarom alleen mogelijk als de inkomende atoombundel traag en monochromatisch gemaakt wordt. Dit zou complexe en kostbare opstelling vereisen en is daarom een serieuze complicatie voor een eventuele praktische toepassing van het idee van de "nanopen".

Referenties:

- [1] R. Frisch, Z. Phys. A. **86**, 42, (1933)
- [2] D.J. Wineland, R.E. Drullinger, F.L. Walls, Phys. Rev. Lett. **40**, 1639, (1978)
- [3] S. Andreev, V. Balykin, V. Letokhov, V. Minogin, JETP Lett. **34**, 442, (1981)
- [4] M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman, E.A. Cornell, Science **269** (5221), 198, (1995)
- [5] G. Timp, R.E. Behringer, D.M. Tennant, J.E. Cunningham, M. Prentiss, K.K. Berggren, Phys. Rev. Lett. **69** (11), 1636 (1992)
- [6] J.J. McClelland, R.E. Scholten, E.C. Palm, R.J. Celotta, Science **262**(5135), 877, (1993)
- [7] B. Smeets, Magnetic nanostructures by atom optics. Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology (2005)
- [8] D. Meschede, H. Metcalf, J.Phys. D **36**(3), R17 (2003)
- [9] B. Smeets, P. van der Straten, T. Meijer, C.G.C.H.M. Fabrie, K.A.H. van Leeuwen, Appl. Phys. B, Lasers Opt. **98**, 697, (2010)
- [10] G. Myszkiewicz, J. Hohlfeld, A.J. Toonen, A.F.V. Etteger, O.I. Shklyarevskii, W.L. Meerts, T. Rasing, E. Jurdik, Appl. Phys. Lett **85** (17), 3842 (2004)



Stellingen

1: In contrast to common belief, laser cooling is not a requirement for atom lithography.

This thesis, chapter 3 and J.Phys.D **36** (3) R17 (2003)

2: A comparison works best if both elements considered are seen simultaneously.

This thesis, chapter 5

3: While atom lithography allows for large scale nanopatterning, it never worked for patterning on the true nanoscale.

This thesis, chapter 6 and references therein.

4: While bottom-up self-organisation is one of the major achievements in science, it seems that in society or politics this notion is not yet common. Nature, **437**, 671-679, (2005) and personal experience

5: Scientists are often moved by the beauty of symmetry, but it is asymmetry that can get things really moving.

Nature Mat., **10**, 51-55, (2011)

Nature Phys., **5**, 606-612, (2009)

6: The “Land of the Innovator” is always under construction.

M. Reeves and M. Deimler, HBR, 07 (2011)

7: If little things can make a big difference, it is wise to investigate the effects of nanomaterials thoroughly.

Toxicological Sciences **101** (1) 4-21 (2008)

8: It is odd to note that in the era of ubiquitous social networks, scientific letters still have no addressee.

9: To get scientific results in the newspapers it seems best to make them up.

News coverage on e.g. Diederik Stapel

10: A thesis is written for the purpose of promotion.

11: European policies in the field of education and finance share the risk that they end up in just printing diplomas or money respectively.

1: In tegenstelling tot wat veelal gedacht wordt, is laser koeling geen vereiste voor atoomlithografie.

Dit proefschrift, hoofdstuk 3 en J. Phys. D. **36** (3) R17 (2003)

2: Een vergelijking van twee objecten werkt het beste als je deze tegelijkertijd bekijkt.

Dit proefschrift, hoofdstuk 5

3: Hoewel atoomlithografie goed is in nano-structurering op grote schaal, is het nooit groot geworden in structurering op de echte nanoschaal.

Dit proefschrift, hoofdstuk 6 met referenties.

4: Bottom-up zelf-organisatie is een van de grootste wetenschappelijke prestaties, maar in de maatschappij en de politiek is dit begrip nog niet ver doorgedrongen.

Nature, **437**, 671-679, (2005)

eigen ervaring

5: Hoewel wetenschappers vaak door symmetrie bewogen worden, kan juist assymetrie echt iets in beweging brengen.

Nature Mat., **10**, 51-55, (2011)

Nature Phys., **5**, 606-612, (2009)

6: Het "Land van de Innovator" is altijd onder constructie.

M. Reeves and M. Deimler, HBR, 07 (2011)

7: Als kleine dingen een groot verschil kunnen maken, is het verstandig de effecten van nanomaterialen goed te onderzoeken.

Toxicological Sciences **101** (1) 4-21 (2008)

8: Het lijkt vreemd dat in een tijdperk waarin sociale netwerken overal aanwezig zijn, in de wetenschap "Brieven" nog altijd geen geadresseerde hebben.

9: Om je wetenschappelijke resultaten in de krant te krijgen, lijkt het de beste optie om deze te verzinnen.

Verlaggeving omtrent e.g. Diederik Stapel

10: Een proefschrift wordt geschreven ter promotie.

11: Het Europese beleid betreffende onderwijs en financiën, heeft het gemeenschappelijke risico dat op enig moment de personen worden aangezet om respectievelijk diploma's of geld te drukken.

Summary

Atom lithography: creating patterned magnetic layers

Atom lithography is a technique to structure layers of atoms during deposition, using interactions of near-resonant light fields with neutral atoms. The basic scheme uses a standing wave light field, aligned just above a substrate, while a beam of atoms impinges perpendicularly on the standing wave light field. The interaction of the light field and the atoms focuses the atoms towards the crests or troughs of the standing wave intensity, dependent on the tuning of the light field. The focused atoms are subsequently deposited on the substrate, resulting in an array of lines, whose periodicity is determined by the wavelength of the light field. The standing wave light field can therefore be seen as an array of lenses, focusing the atom beam into an array of lines. The first experiments on atom lithography were performed in the 1990s with sodium and chromium. In this thesis experiments with iron are described, which is a magnetic element and thus allows for the creation of magnetic nanostructures.

To focus atom beams into structures using atom lithography, well-collimated atom beams are required. The most common technique to create collimated atom beams is transverse laser cooling, but iron has no closed optical transition suitable for laser cooling. Fortunately Smeets and Te Sligte found that even then atom lithography of iron is possible. If the standing wave light field is considered to be an array of lenses, the focusing of the atom beam on a single lens is determined by the local collimation of the atom beam at that position. This local collimation is determined by the geometry of the beam source and the distance of the beam source to the standing wave lens. Using a small beam source (e.g. 1 mm diameter) positioned far from the standing wave (e.g. 1 m), the geometrically collimated atom beam is suitable for atom lithography.

Chapter 3 shows what the implications of geometric collimation are on the structure formation in atom lithography. The geometric effects that locally collimate the atom beam on the sample also introduce local offset angles of the atom beam with respect to the focusing light field. Structure formation has been observed with lines of up to 7 nm high on a background layer of 15 nm average height, over areas of up to $400 \mu\text{m} \times 6 \text{ mm}$. This indicates that the offset angles can vary over an 8 mrad range, which is

more than an order of magnitude larger than the local angle of collimation. The offset angle influence the local geometry of the deposited structures: an increasing offset angle decreases the local line height, increases the width and creates a skewness in the local line shape.

The local geometry of the lines has been modelled with a Monte Carlo particle tracking model and the results were compared to experiments. It was found that the highest and narrowest lines suffer from significant broadening due to surface diffusion in experiments, limiting the achievable structure width of iron on SiO_x samples to about 80 nm. We have also found that in atom lithography without laser cooling, each standing wave lens is effectively imaging the source geometry onto the substrate. We therefore propose using structured atom beam sources to image more complex patterns on sub-wavelength scales in a parallel way.

The reason to use iron in atom lithography, is the option to create magnetic nanostructures. However, in previous experiments no clear magnetic signature of the atom lithographic structuring of iron was found. Therefore in Chapter 4 firstly the magnetic properties of unstructured layers of iron (Fe), nickel (Ni) and Fe_xNi_{1-x} are investigated. These layers are all ferromagnetic, but with a reduced magnetic moment compared to bulk values due to contaminations and crystal growth effects. As a reference for periodic atom lithography structures, periodic line structures are created with interference lithography in a polymer layer and onto these structures thin layers of Fe_xNi_{1-x} are shadow deposited, thereby creating a layer periodically modulated in both height and elemental composition. This periodic modulation in composition has been observed with SEM-EDX on sub-micron scales. The structures showed a clear magnetic anisotropy with an easy axis along the direction of the lines, in accordance with expectations.

In Chapter 5, the magnetic properties of atom lithographic iron line structures are presented. Using MOKE microscopy, direct comparison of structured and unstructured parts of a sample is possible, which allows for the observation of clear magnetic signatures due to the atom lithographic structuring. In layers of an average thickness of about 15 nm, no anisotropy is induced by the line structures, while a magnetic easy axis along the direction of the lines is expected. The line structures introduce an isotropic increase in the coercivity of the layers, indicating that the line structures can be considered as isotropic corrugations instead of directional line structures. For layers of 30 nm average thickness and thus higher line structures, a clear magnetic anisotropy is observed for the highest line

structures. This anisotropy can be seen as a magnetic easy axis along the direction of the lines, as expected for line structures. However, we also observe a sharp increase in coercivity for applied fields perpendicular to the lines. This phenomenon is intriguing and may be explained by a pinning of head-to-head domain walls along the direction of the lines.

In Chapter 5, we also report on the first results of co-deposition of $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$, where the Fe is structured into lines using atom lithography, while the Ni is deposited uniformly, thereby creating an alloy of modulating composition. Magnetic analysis of these structures indicates that these structures are anisotropic, both the coercivity and the shape of domain walls is dependent on the angle of the applied field relative to the line structures.

Finally in Chapter 6, we investigate the possibilities to focus a thermal beam of atoms into a single 100 nm spot using light fields, thereby creating a nanopencil suitable for deposition of nanostructures. A Monte Carlo particle tracking program was developed to model the all optical focusing or funneling of 10 μm sized atom beams to a 100 nm spot. This model included effects of initial beam divergence, magnetic substructure, laser cooling, and spontaneous as well as stimulated diffusion and it was applied to a number of promising light field configurations. The best results obtained for experimentally realistic settings are a beam focused to a full width at half maximum of $FWHM = 0.55 \mu\text{m}$ in a blue detuned hollow beam where atoms are focused towards the dark center, or a $FWHM = 0.31 \mu\text{m}$ in a red detuned axicon light field, where atoms are focused towards the maximum intensity at the heart line. However, in the latter case the focused beam has a flux only 25 times larger than the background flux, which is unpractical for applications. The limiting factors of all schemes are heating due to stimulated diffusion and the limited interaction time available for a thermal beam of atoms. A nanopencil could be possible if it were based on the focussing of a slow and / or monochromatic atom beam, but this would seriously complicate the practical application of such a device.

Acknowledgements

After several years of working on atom lithography, this thesis has now nearly reached its completion, needing only these words of gratitude to be finished. First of all I would like to thank you, the reader of this text, for your interest, but most of all I would like to spend this page to thank those that have made it possible for me to achieve this result and who have supported me all these years while working at the Eindhoven University of Technology.

I would like to thank the FOM, who have both funded my project allowed me to enter the academic world, but who also were always very supportive about my work for Validus Technology. However, the real scientific support came most of all from my promotor, Ton van Leeuwen and co-promotor, Edgar Vredenburg, thank you for the many hours of discussion on atom lithography and Edgar, thank you for your practical hands-on help on many occasions. Of course I would also like to thank the other member of the reading committee, Wim Vassen, Markus Oberthaler and Bert Koopmans, whom I would like to thank especially for the discussions on magnetism.

During the project I also had the support of a wonderful Dutch-Ozzie connection: Corine, thank you for your help on the deposition sources and for creating the link to Australia. Josh, your support and especially your infinite patience with the fiber coupling have always been a great example that any laser setup will work eventually! Furthermore I would like to thank the students that worked with me: Jan-Pieter, Taco, Remy, Joep and Cornee. I hope you all enjoyed working with me, you have surely always been inspiring to me!

The scientific work in this thesis would have never been possible without the technical support of both the technicians of the group: Louis van Moll, Jolanda van de Ven, Eddy Rietman, Harry van Doorn, Ad Kemper and Iman Koole. I would also like to mention specifically Frans van Setten for his help with the electronic control systems, it significantly improved the quality of the setup!

The work of this thesis is of course not only on atom lithography, but also has elements of surface characterisation magnetism and interference lithography. Fortunately I had the chance to work with the M2N group for the surface characterisation. Martijn Kemerink, thank you for

letting me use your AFM equipment and I would also like to thank Simon Mathijssen and Erik Roeling for their help with the AFM and the wonderful discussions on atom lithography and many other things. At the FNA group I had the opportunity to do the magnetic characterisation of the samples and have discussions on the magnetic properties. Beatriz Barcones Campo, Reinoud Lavrijssen, Mark Hoeijmakers and especially Jeroen Franken thank you very much for your help! Finally I would also like to thank An Prenen at the Chemistry department for her help in creating samples with interference lithography.

Off course the work of a Ph.D. is not only in direct scientific cooperation, but also in working together in a group and at the CQT group I had wonderful Ph.D. colleagues: Gabriel, Stefan, Nicola, Adam, Xavier, Kenian, Maarten, Merijn, Thijs, Willem, Walter, Peter en Peter, Wouter, Maikel and Rick. Stefan, Nicola, you were perfect room mates, always in for either a joke or a good discussion; Gabriel, thank you for getting me to Amsterdam more often; Rick thanks for all the great hiking trips; and all of you: thank you for the good times and I wish you all the very best! This wish is also extended to the permanent staff of CQT: Jom, Servaas, Seth, Peter, Jaap and Betty. Betty, thank you for all the practical help on ever so many things!

Now I come to those that may have not added so much to my academic career, but certainly to my experiences of the last years. The times with Validus Technologies, starting up a company, consisted often of trial-and-error experiments, but have most of all shown me the life outside academia. Nico, Robert, I am very happy that at my graduation you will be my paronyms, our cooperation has been a great experience. Also to all others that have worked at Validus, it was nice to work with you! Xiao and Kenny, it was a pleasure coaching your graduation projects and I'm happy to see that you have both gave your career a good start.

Now at the end I would like to thank all my friends, at Rust Roest, Attila and elsewhere, who have had to listen to some occasional physics frustration but still allowed me to retain a life outside of work. I would like to thank my family, my parents, Jan, Judith, Irene, Roland and Maud: thank you for being there for me. Also to the Koekoek family, thank you for making me feel always at home! En tenslotte is er nog maar een over, Mariëtte, bedankt voor al je ondersteuning, je scherpe observaties en heldere commentaar, maar bovenal voor je liefde.

Thijs Meijer, Eindhoven, december 2011

