

Advancements in Microwave Cavity Resonance Spectroscopy

Citation for published version (APA):

Platier, B. (2020). *Advancements in Microwave Cavity Resonance Spectroscopy*. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Applied Physics and Science Education]. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Published: 26/06/2020

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Verbeteringen aan microgolf- trilholteresonantiespectroscopie

Bart Platier

Dit boek is opgemaakt met het L^AT_EX documentatiesysteem.
Drukkerij: proefschriftenprinten.nl
Ontwerp van de omslag: B. Platier


Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het strategische gezamenlijke onderzoeksprogramma over intelligente verlichting tussen de TU/e en Signify N.V.



Deze samenvatting voor leken behoort tot het proefschrift ‘Advancements in Microwave Cavity Resonance Spectroscopy’ van B. Platier (ISBN: 978-90-386-5017-3).

A catalogue record is available from the Eindhoven University of Technology Library
ISBN: 978-90-386-5018-0

Copyright © 2020 B. Platier

 <https://orcid.org/0000-0003-4524-0131>

Inleiding

De ontwikkelingen in microgolfrilholteresnantiespectroscopie, een plasmadiagnostiek, gepresenteerd in het bijbehorende proefschrift [1] hebben het mogelijk gemaakt om fysica te bestuderen die tot op heden nog niet binnen het meetbereik lag. Dit boek beoogt de verbeteringen aan de meettechniek en de maatschappelijke impact hiervan op een toegankelijke wijze over te brengen aan een algemeen publiek.

Plasma's zijn energetische gassen en essentieel voor het (voort)bestaan van de mens. Zonder plasma—en dus ook zonder de zon—zou onze planeet niets hebben om door te worden opgewarmd. Daarnaast gebruiken planten de energie van het zonlicht om te groeien en zuurstof te produceren. Andere voorbeelden van plasma's die in de natuur voorkomen zijn het Noorderlicht, bliksem en de Orionnevel. In figuur 1 worden foto's van deze plasma's getoond. Naast dat plasma's esthetische kwaliteiten bezitten, hebben ze nog meer eigenschappen die worden gebruikt in allerlei toepassingen. Enkele voorbeelden van het gebruik van plasma's worden hieronder beschreven.

Ten eerste worden de laatste decennia pogingen ondernomen om de processen die plaatsvinden in de zon na te bootsen hier op aarde. In een zeer heet plasma kunnen atoomkernen 'samensmelten' oftewel fuseren. Bij dit proces komt warmte vrij en deze energie moet worden gebruikt voor het aandrijven van een stoomturbine om elektriciteit op te wekken. De verwachting is dat het nog 50 jaar duurt om kernfusie te ontwikkelen.

Daarentegen de toepassing van plasma's in de verlichtingsindustrie is al veel verder geoptimaliseerd. Fluorescentie- en gasontladingslampen zijn voorbeelden van energiezuinige lichtbronnen. In deze lampen wordt licht geproduceerd als een gebonden elektron van een hogere naar een lagere toestand terugvalt. De processen in het plasma zorgen ervoor dat de elektronen in de hogere toestanden terecht komen. Nu na vele jaren trouwe dienst worden deze op plasma gebaseerde lampen vervangen door licht-emitterende-diodes (LEDs).

Daarnaast worden allerlei chemische reacties in de productie van bijvoorbeeld zonnecellen en halfgeleiders door plasma's versneld of verbeterd. Aan de rand van een plasma is er een sterk elektrisch veld dat relatief zware deeltjes met een positieve lading versnelt richting het nabije oppervlak. Deze 'kanonskogeltjes' worden gebruikt voor het bewerken van oppervlakken. Daarnaast hebben plasma's de eigenaardige eigenschap dat het gas koud kan zijn, terwijl er toch voldoende energie is om chemische



Figuur 1: Vier fotos van plasma's die in de natuur voorkomen: (a) de zon [2], (b) het Noorderlicht [3], (c) bliksem [4] en (d) de Orionnevel [5].

verbindingen te verbreken. Dit is bijvoorbeeld handig voor de productie van materialen die geen hoge temperatuur verdragen, zoals plastics. Ook kunnen er bedoeld of onbedoeld stofdeeltjes in een plasma groeien. Het mooie van dit proces is dat de deeltjes allemaal dezelfde grootte kunnen hebben.

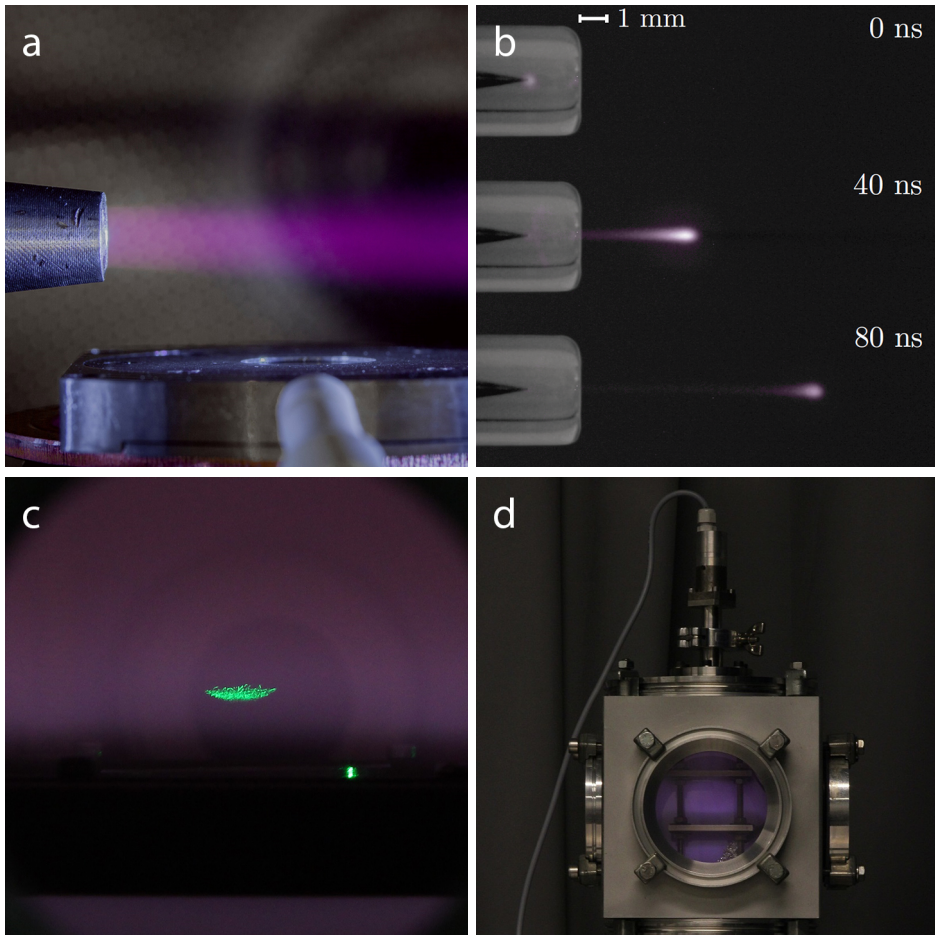
Verder worden plasma's gebruikt voor de productie van computerchips in de lithografiestap. Hierbij wordt op een lichtgevoelige laag van een wafer een patroon van elektrische schakelingen belicht. De eigenschappen van deze laag veranderen lokaal door het licht en in een volgende processtap wordt het belichte of onbelichte deel van de laag selectief bewerkt. Om nog kleinere elektrische schakelingen te maken, wordt er in de nieuwste generatie lithografiemachines licht met een hele korte golflengte (13,5 nanometer) gebruikt. Dit extreem ultraviolet licht wordt geproduceerd door een plasma. Deze extreem ultraviolet lichtdeeltjes hebben zoveel energie dat ze onderweg, van de lichtbron naar de wafer, door de machine zelf ook weer een plasma maken.

Ook zijn de eerste resultaten van het toepassen van plasma's in wondgenezing en het bestrijden van kanker veelbelovend. De hiervoor verantwoordelijke processen zijn echter nog slecht begrepen. De werking wordt toegeschreven aan een combinatie van reactieve deeltjes, elektrische lading, elektrische velden en ultraviolet licht dat in het plasma wordt gemaakt. Het is voor deze toepassing cruciaal dat het gas koud blijft, zodat de patiënt niet verbrandt.

Ten slotte kunnen plasma's zoals eerder beschreven ook zeer warm zijn. In de jaren 70 van de vorige eeuw heeft Aage Meinesz alias 'de Meesterkraker' hiervan gebruik gemaakt bij het opensnijden van bankkluisen met zijn thermische lans. Het mooie van zijn werkwijze was—naast het gebruik van plasma's—dat hij de kluisruimte altijd netjes bezemschoon achterliet.

Het behandelen van wonden met de thermische lans van de heer Meinesz zal door de hoge gastemperatuur zeer waarschijnlijk niet tot het gewenste resultaat leiden, maar dit is ook gelijk de kracht van plasma's. De eigenschappen van plasma's zijn namelijk aan te passen aan de beoogde toepassing. Om nog beter te worden in het aanpassen van deze eigenschappen is het noodzakelijk om de processen in plasma's nog beter te begrijpen door ze te bestuderen. Foto's van een viertal laboratoriumplasma's worden gepresenteerd in figuur 2.

In het volgende hoofdstuk zullen de basisbeginselen van plasmafysica uiteen worden gezet.

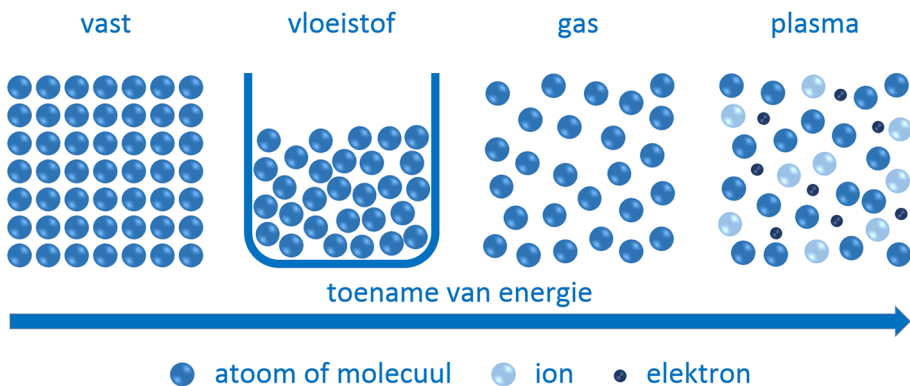


Figuur 2: Vier foto's van laboratoriumplasma's: (a) een extreem ultraviolet lichtdeeltjes-geïnduceerd plasma [6], (b) een atmosferische druk hoogspanningspuls gedreven plasma *jet* [7], (c) een plasma met stofdeeltjes die worden belicht met groen laserlicht [8] (d) een lage druk radiofrequente velden gedreven plasma [9].

Plasma's

Plasma wordt wel eens—naast vast, vloeibaar en gas—de vierde toestand van materie genoemd. Een schematische representatie van de vier toestanden wordt gegeven in figuur 3. De overgang van vast naar vloeibaar en vervolgens van vloeibaar naar gas wordt bereikt door het toevoegen van energie. Vaak wordt dit gedaan in de vorm van warmte. Om van een gas een plasma te maken wordt er veelal gebruik gemaakt van elektrische energie. In dit onderzoek werd er eveneens gebruik gemaakt van een bijzondere bron van energie: extreem ultraviolet licht. De toegevoegde energie wordt gebruikt om het gas te ioniseren. Om dit proces goed te kunnen uitleggen, zal eerst een korte beschrijving van een gas worden gegeven.

Een gas is een verzameling van heel veel atomen of clusters van atomen die een chemische verbinding met elkaar zijn aangegaan, ook wel moleculen genaamd. Deze atomen en moleculen bewegen in een gas vrij van elkaar. Een atoom wordt in het Rutherford-Bohr model beschreven als een positieve kern met daaromheen draaiend een aantal negatieve elektronen. De totale negatieve lading van alle elektronen samen is gelijk aan de positieve lading van de kern, waardoor het atoom in zijn geheel geen



Figuur 3: Een schematische weergave van de vier toestanden van materie; vast, vloeibaar, gas en plasma. De pijl geeft de richting tussen de toestanden aan waarin energie moet worden toegevoegd om de overgang te laten plaatsvinden.

lading heeft.

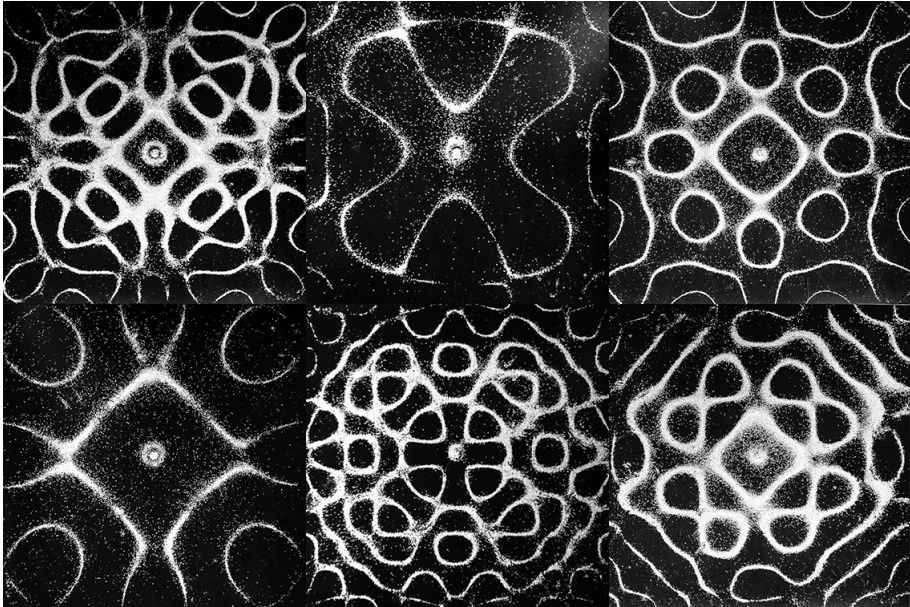
Bij ionisatie van een atoom of molecuul worden een of meer van de gebonden elektronen losgemaakt en zo ontstaan er een of meer vrije elektronen en een ion. In een plasma is typisch een op de miljoen atomen of moleculen geïoniseerd. De vrije elektronen spelen een zeer belangrijke rol in het bepalen van de eigenschappen van plasma's. Door te botsen met atomen of moleculen in het gas kunnen de elektronen het gas verder ioniseren of energie geven om bijvoorbeeld chemische reacties in gang te zetten. De term elektronendichtheid wordt gebruikt om het aantal elektronen per volume-eenheid aan te duiden, terwijl de botsingsfrequentie aangeeft hoe 'vaak' een elektron gemiddeld per tijdseenheid botst en dus de bovengenoemde processen in gang kan zetten. Om het begrip en de toepassing van plasma's te verbeteren, is het essentieel om de dynamiek van de elektronen te bestuderen.

De meettechniek

Door de toenmalige dreiging van een mondiaal militair conflict en de daaruit voortkomende behoefte aan radarsystemen is er in de jaren 30, 40 en 50 van de vorige eeuw veel onderzoek verricht naar microgolfstraling. Deze straling heeft veel overeenkomsten met zichtbaar licht, echter de frequentie van zichtbaar licht is duizend tot een miljoen keer hoger. Een van de vindingen uit deze periode is een meettechniek genaamd microgolftrilholteresonantiespectroscopie, waarmee met behulp van microgolfstraling fundamentele eigenschappen van materialen kunnen worden bepaald. De Engelse benaming voor deze meettechniek is *Microwave Cavity Resonance Spectroscopy* (MCRS).

Het principe van deze meettechniek zal hieronder worden uitgelegd aan de hand van een trommel. Zodra er energie wordt overgedragen aan het vel, bijvoorbeeld door er op te slaan, gaat het vel trillen. De toonhoogte, ook wel frequentie genoemd, van de trilling en dus van het geproduceerde geluid hangt onder meer af van de afmetingen van de trommel. De rand van de trommel legt restricties op aan de frequenties die kunnen worden aangeslagen. De ‘toegestane’ frequenties worden ook wel resonantiefrequenties genoemd en horen bij een zogenaamde staande golf. Bij iedere resonantiefrequentie hoort een ander profiel van deze staande golf. Door wat zand op een trommel te leggen, worden deze profielen zichtbaar gemaakt. Het zand zal zich namelijk verzamelen op de plekken die (bijna) niet trillen, want de zandkorreltjes worden ‘weggestoten’ op de plaatsen waar de trilling het grootst is. In figuur 4 is dit principe toegepast op een trillende plaat voor een zestal resonantiefrequenties. Daarnaast gaat er energie verloren bij het trillen en houdt de trommel (gelukkig) een keer op met geluid maken.

Er wordt bij het bestuderen van plasma’s geen gebruik gemaakt van een trommel, maar van een trilholte voor microgolfstraling die omsloten is met metalen wanden. De wanden weerkaatsen de microgolven die met behulp van een antenne in de trilholte worden gebracht. Als de frequentie van het aangelegde veld een resonantiefrequentie is, wordt er een staande golf gevormd in de trilholte. Veranderingen van de resonantiefrequenties kunnen worden gebruikt om de eigenschappen van bijvoorbeeld plasma’s te bepalen. De aanwezigheid van vrije elektronen doet de trilholte namelijk kleiner lijken voor de microgolven, waardoor de resonantiefrequenties hoger worden. Deze veranderingen van de resonantiefrequenties zijn kleiner wanneer de vrije elektronen ‘vaker’ botsen.



Figuur 4: Foto's van zand op een resonerend oppervlak dat zich verzameld heeft op de plekken die (bijna) niet trillen [10]. Het patroon hangt af van de aangelegde resonantiefrequentie.

In de praktijk is het mogelijk om een staande golf in de trillholte op te wekken met een frequentie die in de buurt ligt van de resonantiefrequentie. Hoe hoger de verliezen in de trillholte, des te breder de band van frequenties waarmee het verkrijgen van resonantie mogelijk is. Door gebruik te maken van dit uitgangspunt worden de verliezen die de microgolven in de trillholte ondervinden bepaald. Met de informatie over de verliezen worden de bijdragen van de elektronendichtheid en de botsingsfrequentie aan de verschuiving van de resonantiefrequentie gescheiden.

De gemeten elektronendichtheid en botsingsfrequentie zijn een gemiddelde waarde over de gehele trillholte waarbij de plekken met een grote uitslag van 'het vel' zwaarder wegen dan die met een kleine uitslag. Dit principe is toegepast in een nieuwe variant van de meettechniek waarmee door slim te meten de locatie van de vrije elektronen wordt bepaald.

Deze en andere verbeteringen aan de meetmethode, gepresenteerd in dit boekje en het bijbehorende proefschrift, maken het mogelijk om met een grotere nauwkeurigheid eigenschappen van een bredere diversiteit aan plasma's te bestuderen.

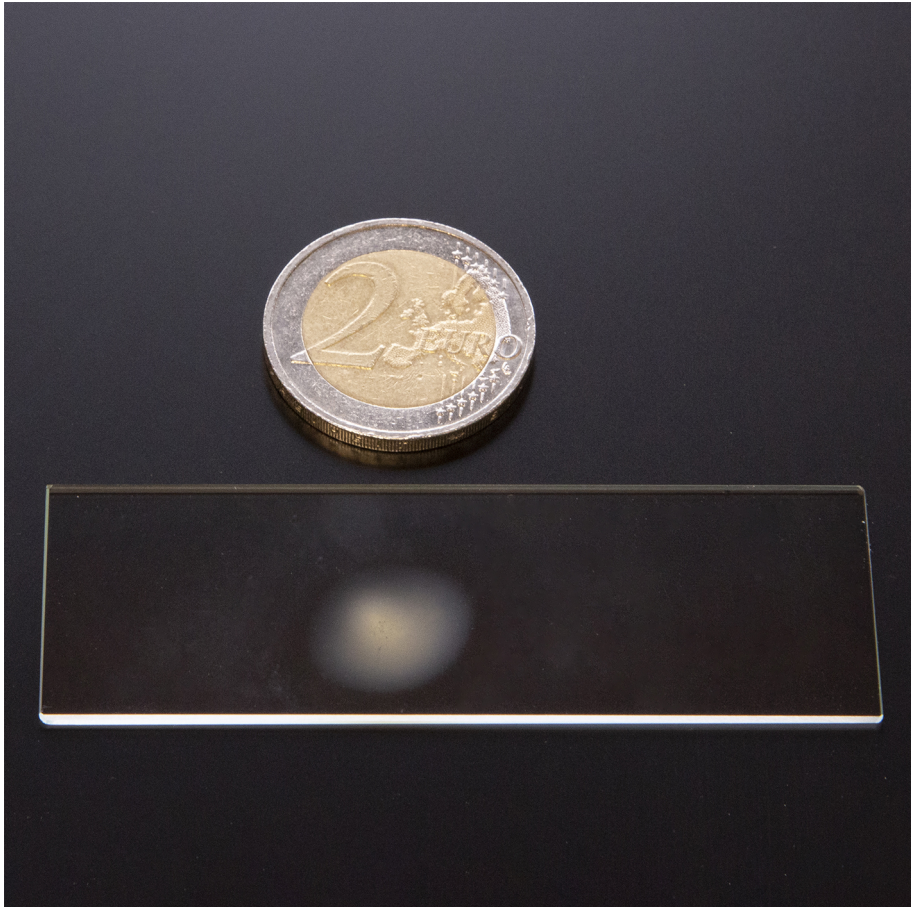
Het onderzoek

In lampen wordt gebruik gemaakt van optische elementen om het geproduceerde licht op de gewenste plek te krijgen. Naast breking in een lens en reflectie aan een spiegel, kan licht worden gestuurd door middel van verstrooiing aan een kleine deeltje. Doordat LED-lampen minder warm worden dan conventionele lampen is het mogelijk om andere materialen en productieprocessen te gebruiken voor deze optische elementen. Een van de mogelijke nieuwe productiemethoden hiervoor is de groei van kunststof stofdeeltjes in een plasma. In vacuümcondities is het groeien van stofdeeltjes al veel gedaan en microgolfrilholteresnantiespectroscopie is hierbij succesvol ingezet om zowel het plasma als het groeiproces te bestuderen. Echter, deze lage druk condities zijn suboptimaal voor een industrieel proces.

Dit onderzoek heeft als doel om de transitie te maken van lage druk naar hoge druk voor zowel de productie van kleine stofdeeltjes voor verlichtingstoepassingen als voor microgolfrilholteresnantiespectroscopie.

De doelen van dit project zijn opgedeeld in twee onderzoekslijnen:

- De eerste onderzoekslijn richt zich op het verbeteren van de meettechniek. Naast theoretisch werk voor de transitie van lage naar atmosferische druk, zijn algemene verbeteringen ontwikkeld. Deze zijn door middel van experimenten gedemonstreerd op een modelplasma: een extreem ultraviolet lichtdeeltjesgeïnduceerd plasma.
- De tweede onderzoekslijn focust zich op de experimentele stap van lage druk naar atmosferische druk voor zowel de meetmethode als het groeien van stof. Microgolfrilholteresnantiespectroscopie is succesvol geïmplementeerd op twee veelgebruikte atmosferische druk plasmabronnen. Daarnaast is de verbeterde resolutie getoond door een studie naar de akoestische golven geproduceerd door een atmosferische druk plasma. Verder zijn stofdeeltjes succesvol gegroeid in een atmosferische druk radiofrequente velden gedreven plasma *jet*. In figuur 5 is een foto te zien van een verzameling van stofdeeltjes geproduceerd in een atmosferische druk plasma *jet* en vervolgens gedeponneerd op een glazen substraat.



Figuur 5: Een verzameling van stofdeeltjes geproduceerd in een atmosferische druk plasma *jet* en vervolgens gedeponerd op een glazen substraat.

De resultaten

De verbeteringen aan de meettechniek die in dit promotieonderzoek zijn ontwikkeld, worden hieronder beschreven aan de hand van enkele types plasma's die zijn onderzocht samen met de opgedane inzichten.

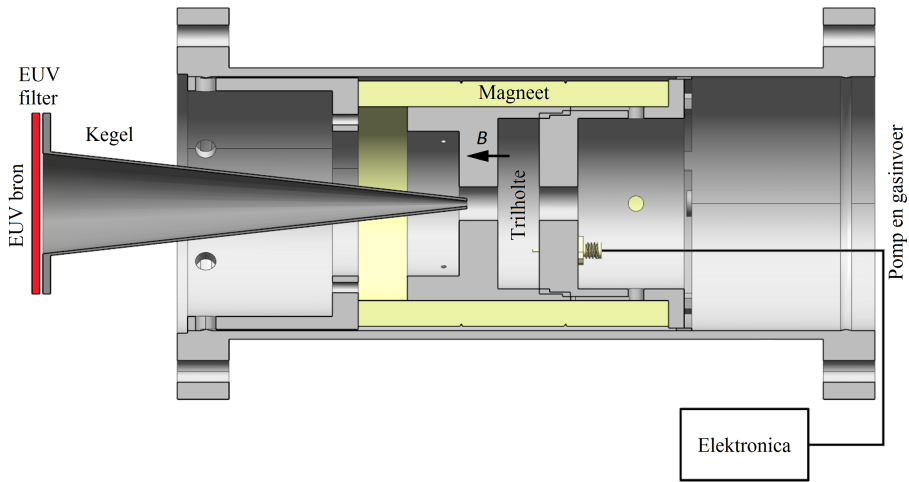
Onderzoekslijn 1

Algemene verbeteringen aan de meettechniek zijn nieuwe beschrijvingen van de experimentele limieten voor het gebruik van de meettechniek en de precisie waarmee de eigenschappen van de resonantie kunnen worden bepaald [11]. De spreiding in de bepaling van de resonantiefrequentie is nu kleiner dan 1 deel op 5 miljard [11]. Om deze cijfers in perspectief te plaatsen: met deze precisie zou de fout in het meten van de lengte van een marathon kleiner zijn dan de dikte van spinrag.

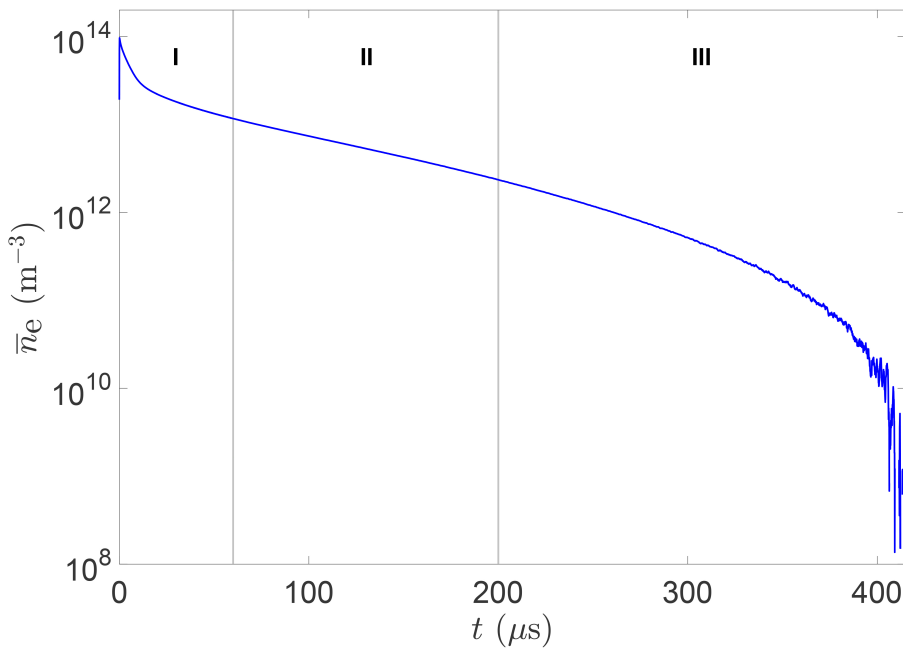
Hoogenergetische lichtdeeltjes-geïnduceerde plasma's hebben een verhoogde aandacht gekregen met de opkomst van extreem ultraviolet lithografie. Dankzij het sequentieel meten van verschillende resonantiefrequenties is het mogelijk om de positie, afmetingen en intensiteit van een plasma en daarmee van het hoogenergetisch licht dat het plasma creëerde te bepalen [12, 13]. Verder is er gebruik gemaakt van computersimulaties om de imperfecties van de trillholte mee te nemen in de omzetting van de verschuiving in de resonantiefrequentie naar een elektronendichtheid van het plasma en dus ook van de eigenschappen van de lichtbundel.

Met de toevoeging van een sterk magneetveld kunnen de vrije elektronen in de trillholte worden opgesloten. Hiermee kan deze meettechniek zelfs worden toegepast op erg lage gasdrukken en voor bundels bestaande uit weinig lichtdeeltjes [14]. Een schematische weergave van de trillholte, magneet en elektronica die hiervoor zijn gebruikt is te zien in figuur 6.

Naast de twee al bekende vervalregimes van dit type plasma, is er een derde vervalregime geïdentificeerd en onderzocht [15]. Gedurende de periode van het derde vervalregime is er nog zo weinig plasma dat de elektronen de ionen steeds minder goed 'voelen' en daardoor steeds minder afgeremd worden waardoor het verval van de elektronen versnelt. Dit is te zien in figuur 7, waarbij gebruik gemaakt wordt van Romeinse cijfers (I-III) om de drie vervalregimes aan te duiden. Fase III is het in dit werk geïdentificeerde regime.



Figuur 6: Een schematische weergave van de trilholte, elektronica en magneet die gebruikt zijn om de extreem ultraviolet (EUV) lichtdeeltjes-geïnduceerde plasma's te onderzoeken.



Figuur 7: De elektronendichtheid \bar{n}_e gedurende de drie vervalregimes van een extreem ultraviolet lichtdeeltjes-geïnduceerd plasma. Het derde regime is ontdekt in dit onderzoek.

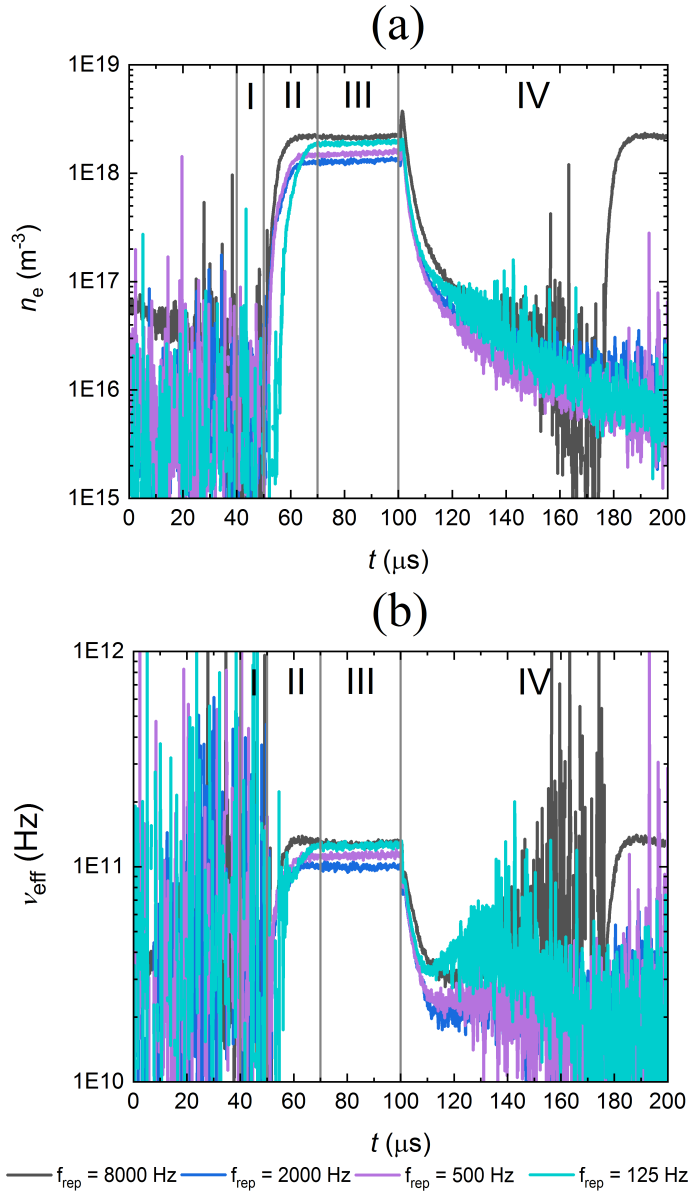
Onderzoekslijn 2

In het verleden is de meettechniek alleen gebruikt om plasma's op lage druk te bestuderen. In deze lage druk plasma's kunnen de botsingen van de elektronen vaak worden verwaarloosd. Dit heeft twee voordelen: enkel het meten van de verschuiving van de resonantiefrequentie is dan voldoende om de elektronendichtheid te bepalen en daarnaast is de verschuiving bij plasma's waarbij de elektronen niet vaak botsen veel groter dan wanneer de elektronen vaak botsen.

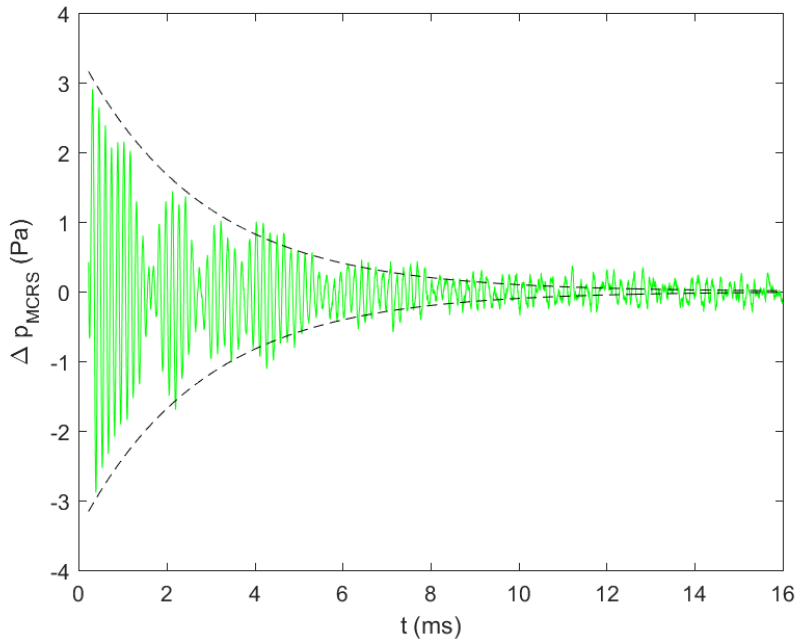
Plasma *jets* zijn plasma's opgewekt in een stromend gas door elektrische energie toe te voegen. Atmosferische druk plasma *jets* worden gebruikt voor bijvoorbeeld het bewerken van materialen. Ook hebben deze plasma's veel potentieel laten zien in medische toepassingen zoals het genezen van wonden en het bestrijden van kanker. Zowel de elektronendichtheid als de botsingsfrequentie van de elektronen zijn bepaald van zowel hoogspanningspulsen [16] als radiofrequente velden gedreven [17] plasma *jets*. In figuur 8 wordt het verloop van de eigenschappen van een radiofrequente velden gedreven plasma *jet* getoond. De verandering van de resonantiefrequentie door het plasma in deze experimenten was ongeveer even groot als de verandering veroorzaakt door een toename van de temperatuur van de trilholve van 0.01°C [17]. Om deze reden zijn temperatuur gecorrigeerde schijnbare frequenties geïntroduceerd. Met deze experimenten is gedemonstreerd dat de meettechniek geschikt is gemaakt voor het bestuderen van hoge druk plasma's.

Verder zijn akoestische golven die zijn opgewekt door gasopwarming in een plasma *jet* bestudeerd. Hiervoor is het meetprincipe van microgolfrilholteresontiespectroscopie omgedraaid. De eigenschappen van een bekend gas zijn gebruikt voor het bepalen van het absolute drukverschil en frequenties van het geluid [18]. Het verloop van het drukverschil na een korte plasmapulsvordt weergegeven in figuur 9. Uit deze studie is gebleken dat de frequentie van het geproduceerde geluid wordt gedicteerd door de lengte van de geometrie van de plasmabron. Bovendien is getoond dat deze drukgolven sterk genoeg zijn om biologische weefsels te beïnvloeden. Dit suggereert dat relatief zwakke akoestische golven wellicht een rol kunnen spelen in het genezingsproces in medische toepassingen.

Daarnaast heeft de auteur bijgedragen aan onderzoek naar ultrakoude plasma's [19], een vergelijking tussen twee microgolfdiagnostieken [20], een studie naar het verval van extreem ultraviolet lichtdeeltjes-geïnduceerde plasma's [21] en een analyse van de elektrische lading van stofdeeltjes in een plasma [22].



Figuur 8: De (a) elektronendichtheid n_e en (b) botsingsfrequentie ν_{eff} van een radiofrequent veld gedreven plasma voor verschillende repetitiefrequenties f_{rep} . Tussen 50 en 100 μs werd elektrische energie toegevoegd om het plasma te maken.



Figuur 9: Het verloop van het drukverschil Δp_{MCRS} veroorzaakt door een korte plasmapulst.

Conclusie

De verbeteringen aan de plasmadiagnostiek microgolfrilholteresontiespectroscopie gepresenteerd in dit boekje en het bijbehorende proefschrift hebben het mogelijk gemaakt om fysica te bestuderen die nog niet eerder binnen het meetbereik lag.

Theoretisch werk aan de diagnostiek is verricht met het oog op de transitie van lage naar atmosferische druk. Dit werk heeft inzicht gegeven in de mogelijkheden van de plasmadiagnostiek op atmosferische druk. Daarnaast is de nauwkeurigheid in het bepalen van het resonant gedrag significant verbeterd.

Extreem ultraviolet lichtdeeltjes-geïnduceerde plasma's zijn erg belangrijk voor de halfgeleiderindustrie. Van dit type plasma is er een nieuw vervalregime geïdentificeerd en onderzocht. Ook is er een methode geïntroduceerd voor het bepalen van de eigenschappen van een ioniserende lichtbundel welke gebruikt kan worden om bijvoorbeeld de belichting van wafers te verbeteren. Verder is deze methode door het toevoegen van een krachtig magneetveld geoptimaliseerd voor het meten aan ioniserende bundels die weinig plasma maken.

Op atmosferische druk zijn de elektronendichtheid en botsingsfrequentie bepaald van plasma's opgewekt met radiofrequente velden en hoogspanningspulsen. Deze experimenten hebben naast deuren geopend voor volgende experimenten op hoge druk ook tot een beter begrip van de vervalprocessen geleid. Deze plasma's induceren ook akoestische golven die zijn onderzocht door het meetprincipe van microgolfrilholteresontiespectroscopie om te draaien. Dit heeft geresulteerd in het begrip dat de geometrie van de plasmabron de frequentie van het geluid bepaalt. Verder is aangetoond dat de geluidsdruk geproduceerd in een plasma *jet* hoog genoeg kan zijn voor een mogelijk actieve rol in het genezingsproces in medische toepassingen.

Bovendien is succesvol stof geproduceerd in een plasma *jet* op atmosferische druk. Hiermee is een eerste stap gezet in het produceren van optische elementen voor bijvoorbeeld LED-lampen met behulp van dit type plasma.

Dankzij dit onderzoek is het begrip van plasma's vergroot en is microgolfrilholteresontiespectroscopie een breed inzetbare meetmethode geworden voor het bestuderen van een groot scala aan fysische processen binnen en buiten plasma's.

Bibliografie

- [1] B. Platier. *Advancements in Microwave Cavity Resonance Spectroscopy*. Eindhoven University of Technology, 2020.
- [2] NASA Goddard Space Flight Center. NASA’s SOHO Sees Sun Popping Out All Over, 2010.
- [3] <https://pxhere.com/nl/photo/1561187>. Noorderlicht, 2018.
- [4] G. Lo Savio. Folgore sullo Scoglio di Patti, 2013.
- [5] F. Zijp and T. W. Tukker. de Orion nevel, 2010.
- [6] T. H. M. Van De Ven. EUV-plasma.
- [7] M. Van Der Schans. *Experiments on the physics of pulsed plasma jets*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2018.
- [8] B. Platier. Dusty plasma, 2016.
- [9] B. Platier. RF plasma, 2014.
- [10] C. Smith. Chladni Plates, 2013.
- [11] B. Platier, T. J. A. Staps, P. M. J. Koelman, M. Van Der Schans, J. Beckers, and W. L. IJzerman. Probing collisional plasmas with MCRS; opportunities and challenges. *Applied Sciences (in preparation)*.
- [12] J. Beckers, F. M. J. H. Van De Wetering, B. Platier, M. A. W. Van Nindhuijs, G. J. H. Brussaard, V. Y. Banine, and O. J. Luiten. Mapping electron dynamics in highly transient EUV photon-induced plasmas: a novel diagnostic approach using multi-mode microwave cavity resonance spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(3):034004, jan 2019.
- [13] B. Platier, F. M. J. H. Van De Wetering, M. A. W. Van Nindhuijs, G. J. H. Brussaard, V. Y. Banine, O. J. Luiten, and J. Beckers. Addendum to ‘Mapping electron dynamics in highly transient EUV photon-induced plasmas: a novel diagnostic approach using multi-mode microwave cavity resonance spectroscopy’. *Journal of Physics D: Applied Physics (submitted)*, mar 2020.

-
- [14] B. Platier, R. Limpens, A. C. Lassise, T. T. J. Oosterholt, M. A. W. Van Ninhuijs, K. A. Daamen, T. J. A. Staps, M. Zangrando, O. J. Luiten, W. L. IJzerman, and J. Beckers. Magnetic field-enhanced beam monitor for ionizing radiation. *Review of Scientific Instruments* (submitted).
- [15] B. Platier, R. Limpens, A. C. Lassise, T. J. A. Staps, M. A. W. van Ninhuijs, K. A. Daamen, O. J. Luiten, W. L. IJzerman, and J. Beckers. Transition from ambipolar to free diffusion in an EUV-induced argon plasma. *Applied Physics Letters*, 116(10):103703, mar 2020.
- [16] M. Van Der Schans, B. Platier, P. M. J. Koelman, F. M. J. H. Van De Wetering, J. Van Dijk, J. Beckers, S. Nijdam, and W. L. IJzerman. Decay of the electron density and the electron collision frequency between successive discharges of a pulsed plasma jet in N₂. *Plasma Sources Science and Technology*, 28(3):035020, mar 2019.
- [17] B. Platier, T. J. A. Staps, M. Van Der Schans, W. L. IJzerman, and J. Beckers. Resonant microwaves probing the spatial afterglow of an RF plasma jet. *Applied Physics Letters*, 115(25):254103, dec 2019.
- [18] B. Platier, T. J. A. Staps, C. C. J. Hak, J. Beckers, and W. L. IJzerman. Resonant microwaves probing acoustic waves from an RF plasma jet. *Plasma Sources Science and Technology* (accepted), 2020.
- [19] M. A. W. Van Ninhuijs, K. A. Daamen, J. G. H. Franssen, J. Conway, B. Platier, J. Beckers, and O. J. Luiten. Microwave cavity resonance spectroscopy of ultracold plasmas. *Physical Review A*, 100(6):061801, dec 2019.
- [20] T. J. A. Staps, B. Platier, P. Meijaard, J. Berndt, E. Kovačević, and J. Beckers. Measuring plasma parameters: comparison of microwave interferometry and microwave cavity resonance spectroscopy. *Review of Scientific Instruments* (in preparation).
- [21] R. Limpens, B. Platier, A. C. Lassise, T. J. A. Staps, M. A. W. Van Ninhuijs, O. J. Luiten, and J. Beckers. EUV-induced plasma afterglow: the influence of a magnetic field. *Plasma Sources Science and Technology* (in preparation).
- [22] B. Van Minderhout, J. C. A. Huijstee, B. Platier, T. Peijnenburg, P. Blom, G. M. W. Kroesen, and J. Beckers. Charge control of micro-particles in a shielded plasma afterglow. *Plasma Sources Science and Technology* (submitted).