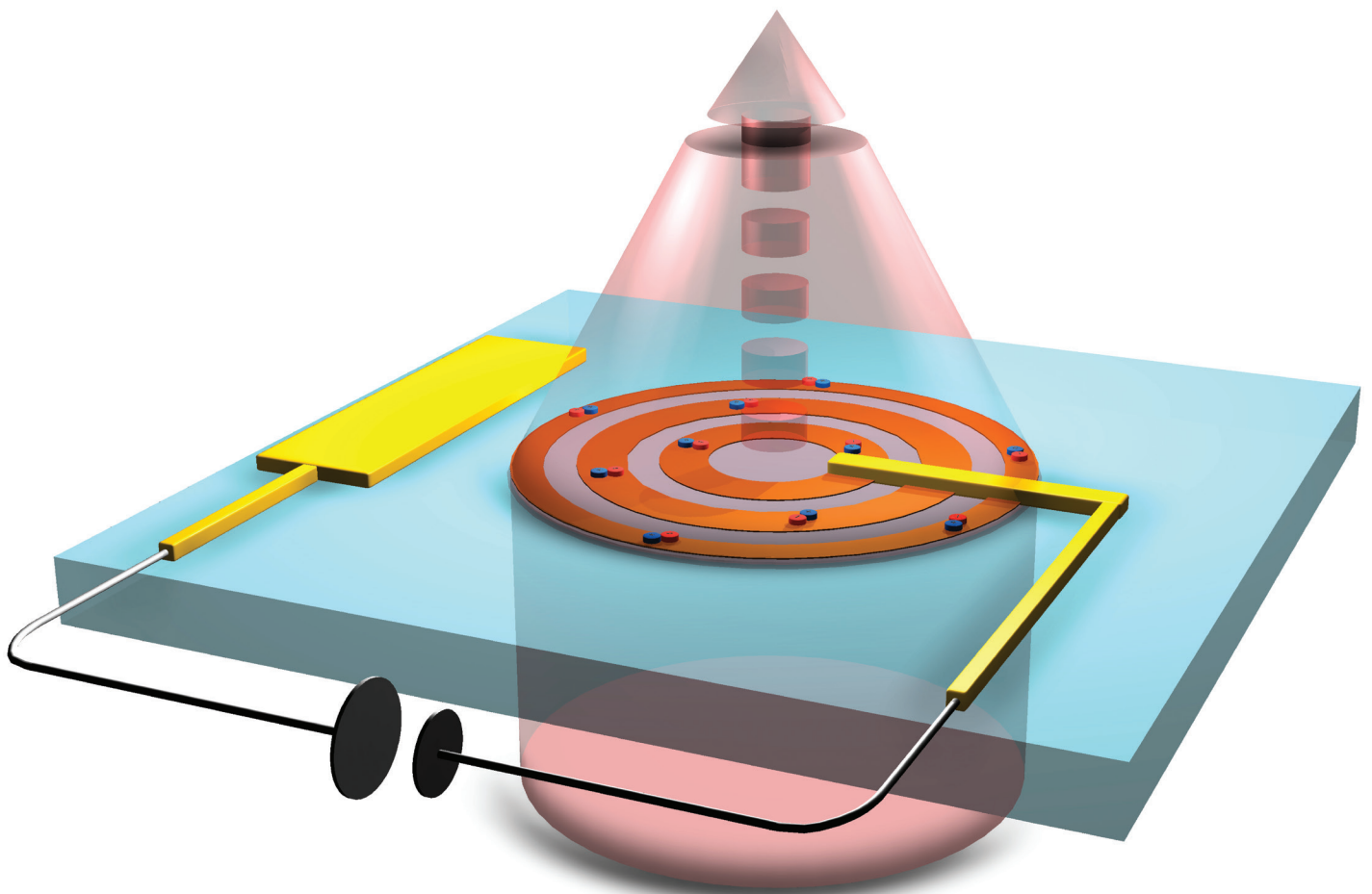


Een nanolens met een aan-uitschakelaar



Klassieke lenzen en filters kunnen licht efficiënt manipuleren, maar zijn onwenselijk groot en zwaar. Oppervlaktecoatings bestaande uit nanodeeltjes, zogenoemde metaoppervlakken, bieden een alternatief: ze zijn flinterdun en kunnen conventionele lenzen door compacte tegenhangers vervangen. Dit is echter nog niet genoeg: nieuwe toepassingen vereisen optische elementen waarvan de functionaliteit tijdens het gebruik aangepast kan worden. Als antwoord hierop hebben we nu een atomair dunne lens met een aan-uitschakelaar weten te maken.

Het beïnvloeden en meten van de eigenschappen van licht wordt van oudsher gedaan met optische elementen zoals spiegels, lenzen en prisma's. Hoewel dergelijke elementen efficiënt zijn, zijn ze ook relatief groot en zwaar en dus vaak moeilijk te implementeren in toepassingen waarbij gewicht en afmeting een belangrijke rol spelen. Denk hierbij aan toepassingen in optische communicatie, mobiele telefoons en camera's. Nanotechnologie biedt hiervoor een oplossing: door structuren vorm te geven op een schaal kleiner dan de golflengte van licht, kan licht in plaats van met optische elementen ook gestuurd worden door middel van zogeheten resonante verstrooiing. Door nanodeeltjes van de juiste vorm op een slimme manier te combineren in een complex patroon kan bijvoorbeeld een oppervlaktecoating die slechts 100 nm dik is licht focuseren op dezelfde manier als een centimeter dikke lens (figuur 1). Uit dit inzicht is een volledig nieuw vakgebied ontstaan waarbinnen allerlei klassieke optische elementen vervangen worden door ultradunne nanocoatings met dezelfde functionaliteit: *flat optics* [1]. Zo bestaan er vandaag de dag lenzen, kleuren- en polarisatiefilters en zelfs kleurhologrammen, gemaakt uit slim ontworpen oppervlaktecoatings van metallische of diëlektrische nanodeeltjes: metaoppervlakken (*metasurfaces*). Ondanks de duizelingwekkende vooruitgang die de afgelopen tien jaar geboekt is binnen dit vakgebied rest er nog een grote uitdaging. Nieuwe toepassingen binnen bijvoorbeeld augmented en virtual reality, lidar (*light detection and ranging*) en geavanceerde beeldverwerking op hoge snelheden, stellen extreme eisen aan de toekomstige generatie optische elementen. Zelfs de huidige metaoppervlakte-lenzen en -filters kunnen hier niet meer aan voldoen. Voor deze toepassingen is het essentieel om meerdere functies te combineren in één enkele metaoppervlakte-coating. Of nog beter: om de optische functionaliteit tijdens het gebruik te kunnen aanpassen. Kunnen we bijvoorbeeld een kleurenfilter maken dat door middel van een elektrisch signaal op een andere kleur ingesteld kan worden? Of kun-

nen we een lens maken waarvan we de brandpuntafstand kunnen veranderen? Tot op heden zijn dergelijke *tunable flat optical elements* erg lastig te realiseren doordat de optische functionaliteit van metaoppervlakken ligt vastgelegd in de nanostructuur van het materiaal. Na het fabriceren van de nanostructuren is het niet meer mogelijk deze om te vormen. Ook verandert de brekingsindex van de meeste materialen slechts heel beperkt wanneer we een elektrisch veld aanbrengen of de ladingsdichtheid veranderen. Dit alles maakt het erg moeilijk om met een elektrisch signaal de optische eigenschappen van een dun optisch element te manipuleren. In een recent experiment hebben we samen met collega's op de universiteit van Stanford een nieuw soort metaoppervlakte-lens gemaakt [2]. Deze lens kan actief aan en uit worden geschakeld, en is slechts één atoomlaag dik: een dikte van 0,6 nanometer! De unieke functionaliteit vindt zijn oorsprong in de quantummechanische effecten die de materiaaleigenschappen van het tweedimensionale halfgeleidermateriaal wolframdisulfide (WS_2) bepalen. Door slim gebruik te maken van deze quantummechanische effecten, kunnen we een compleet nieuw soort atomaire dunne en actief verstelbare optische elementen realiseren.

Resonante nanodeeltjes als bouwstenen

Optische resonanties in nanodeeltjes vormen de bouwstenen van metaoppervlakken. Ze worden gebruikt om op nanoschaal de amplitude en fase van licht te beheersen. Een optische resonantie is een effect dat ervoor zorgt dat licht ingevangen en 'gerecycled' wordt binnen een nanostructuur. Hierdoor bouwt zich een hoge lichtintensiteit op binnen het deeltje, waarna het licht weer kan ontsnappen door middel van verstrooiing. Dit proces leidt tot een zeer sterke interactie tussen het licht en het nanodeeltje.

De exacte aard van de wisselwerking tussen licht en materie hangt af van de materiaalkeuze (figuur 2). Hierbij zijn twee belangrijkste resonante mechanismen te identificeren: plasmon- en Mie-resonanties. In metallische nano-

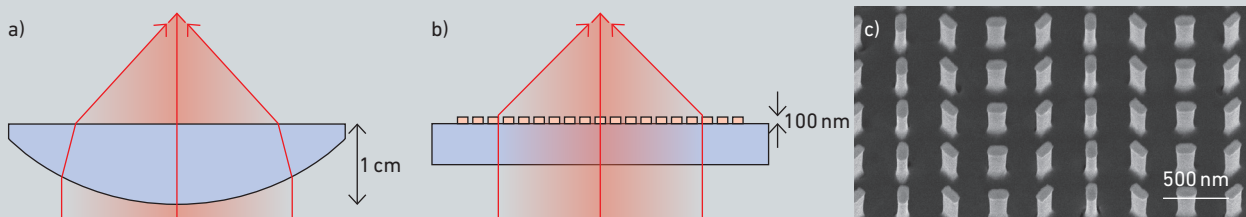


Jorik van de Groep is universitair docent aan het Institute of Physics van de UvA. Na zijn promotie bij AMOLF deed hij vier jaar postdoctoraal onderzoek aan de universiteit van Stanford in de Verenigde Staten. Sinds december 2019 doet hij met zijn eigen onderzoeksgroep experimenteel onderzoek naar tweedimensionale materialen voor nanofotonica. j.vandegroep@uva.nl

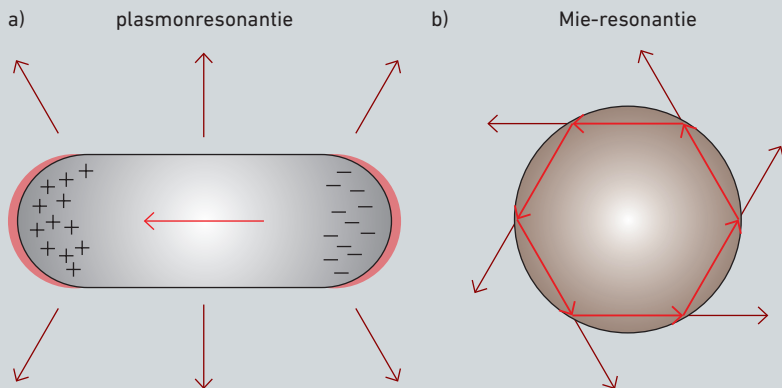


Marcel Vonk is mathematisch fysicus en outreachcoördinator aan het Institute of Physics van de UvA. Naast zijn werk als wetenschapper schrijft hij regelmatig populairwetenschappelijke boeken en is hij hoofdredacteur van de populairwetenschappelijke website quantumuniverse.nl.

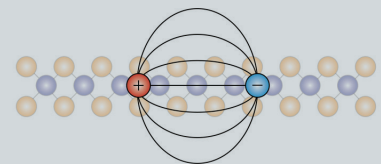
ONDERZOEK



Figuur 1. Een conventionele lens (a) wordt vervangen door een metaoppervlakte-lens bevestigd op een vlak stuk glas (b). c) Een voorbeeld van een metaoppervlakte-lens bestaande uit silicium pilaartjes.



Figuur 2. a) Plasmonresonantie in een metallisch nanodeeltje. Het elektrische veld van het inkomende licht laat de vrije elektronen trillen met dezelfde frequentie. Door de verplaatsing ontstaat een polarisatie in het nanodeeltje. Licht wordt geconcentreerd op het oppervlak van het metaaldeeltje en wordt uiteindelijk verstrooid (donkerrood). Rechts: Mie-resonantie in een diëlektrisch nanodeeltje. Licht wordt intern teruggeboogd door middel van interne reflecties, wat leidt tot een hoge intensiteit binnen in het nanodeeltje.



Figuur 3. Excitonen in een enkele laag WS₂ (wolfraamatomen in paars, zwavelatomen in oranje). De elektrische veldlijnen van de excitonen reiken buiten het materiaal waardoor deze niet worden afgeschermd.

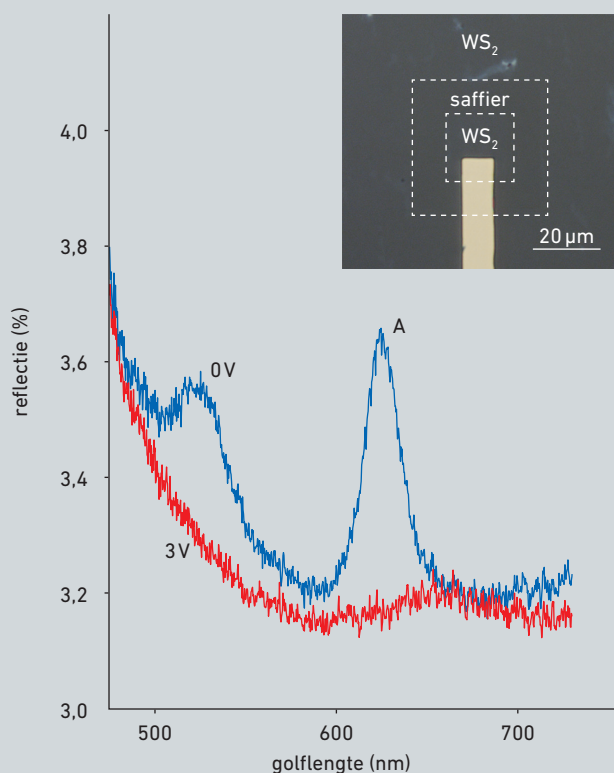
deeltjes treden plasmonresonanties op. Hierbij heeft het elektrische veld van het inkomende licht interactie met de vrije elektronen in het metaal en laat het deze elektronen trillen met dezelfde frequentie als het licht. Deze frequentie bepaalt de golflengte λ van het licht binnen het metaal via de relatie $\lambda = c/(nf)$, met c de lichtsnelheid, n de brekingsindex en f de frequentie. Door het metaal te structureren op een schaal kleiner dan de golflengte van licht, wordt de resonante trilling van de elektronen gemanipuleerd en hangt de resonantiefrequentie af van de vorm en grootte van het nanodeeltje. In nanodeeltjes gemaakt van diëlektrische of halfgeleidermaterialen wordt licht intern opgesloten door middel van reflecties aan het oppervlak van het nanodeeltje. Resonanties treden op wanneer het licht na een

ronde door het deeltje constructief met zichzelf interfereert. Deze resonanties zijn vernoemd naar Gustav Mie, die in 1908 de theorie voor lichtverstrooiing door bolvormige deeltjes op de nanoschaal beschreef. Het basisprincipe is ook toepasbaar op nanodeeltjes met andere vormen. Het zorgt ervoor dat licht efficiënt kan worden opgesloten en daardoor zeer sterk kan worden verstrooid. De amplitude en fase van het verstrooide licht hangen af van de golflengte van het inkomende licht. Als alternatief om controle te krijgen over de amplitude en fase van het licht kan men de golflengte vastleggen en nanodeeltjes met verschillende grootte combineren. Dit principe vormt de basis voor *metasurface flat optics*: de faseverschuiving die licht normaal gesproken verzamelt op zijn weg door bijvoorbeeld een glazen

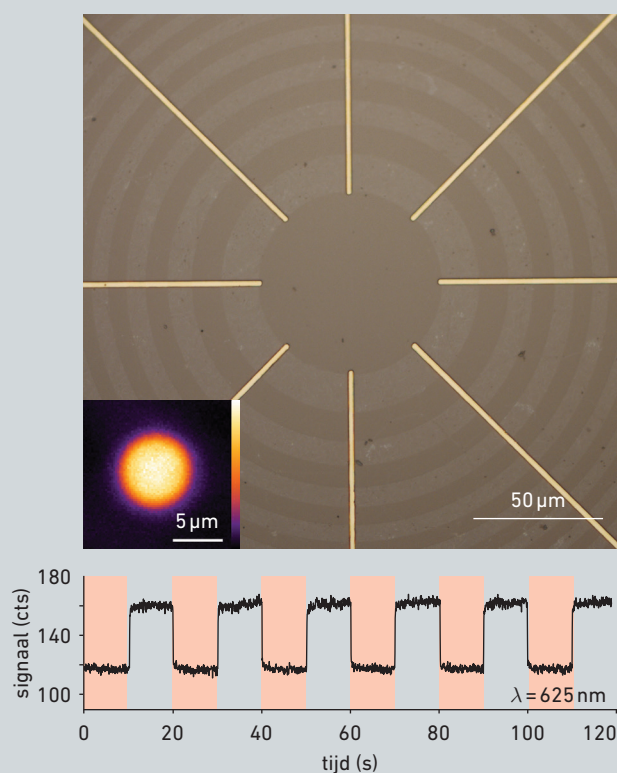
lens kan worden vervangen door de faseverschuiving die verkregen wordt bij resonante verstrooiing. Een slim ontworpen patroon van nanodeeltjes kan daardoor fungeren als een rooster van puntbronnen van licht, vergelijkbaar met de (oneindige) verzameling puntbronnen die aan het einde van een gewone lens ontstaat, en met een functie die vastgelegd ligt in de geometrie op de nanoschaal. Het resultaat: een ultradunne optische coating waarmee licht gestuurd kan worden.

De nieuwe uitdaging: dynamische metaoppervlakken

Na een van de eerste en belangrijkste experimentele demonstraties van optische metaoppervlakken in 2011 [3] nam het vakgebied een hoge vlucht. Al snel bleek dat metaop-



Figuur 4. Reflectiespectrum van een $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ groot vierkant WS_2 op saffier. Zonder externe potentiaal is een sterke reflectiepiek te zien als gevolg van lichtverstrooiing door excitonen (blauwe lijn). Door elektronen te injecteren in het WS_2 -materiaal wordt de excitonpiek onderdrukt (rode lijn). Inzet: microscoopfoto van het gehele apparaat met het vierkant van WS_2 . Schaalbalk: $20\ \mu\text{m}$.



Figuur 5. Atomair dunne lens met elektrisch verstelbare efficiëntie. Boven: microscoopfoto van het midden van de lens. Inzet: beeld in het brandpunt, 2 mm boven de lens. Onder: intensiteit in het brandpunt als functie van tijd bij het aan- en uitzetten van de gate-potentiaal. De lichtrode achtergrond duidt aan wanneer de gate-potentiaal gelijk is aan 3V.

pervlakken veel meer kunnen dan alleen het vervangen van standaard optische elementen door ultradunne tegenhangers. Complexe ontwerp-principes die gedurende de afgelopen jaren zijn ontwikkeld hebben geleid tot metaoppervlakken die driedimensionale kleurhologrammen, driedimensionale *light-field imaging* en zelfs analoge berekeningen kunnen realiseren. Desondanks zijn vrijwel alle metaoppervlakken nog *passief*: de optische functionaliteit ligt vast zodra de nanofabricage voltooid is. Nieuwe en toekomstige toepassingen binnen augmented reality, lidar en dynamische holografie hebben juist actief verstelbare optische elementen nodig.

De rol van plasmon- en Mie-resonanties was essentieel in de ontwikkeling van metaoppervlakken, maar hun toepassingen binnen *actieve*

metaoppervlakken blijven tot nu toe erg beperkt. Dit gemis vindt zijn oorsprong in de kleine elektrorefractie- en elektroabsorptie-effecten in metalen en halfgeleiders. De brekingsindex van deze materialen verandert vrijwel niet wanneer we een elektrisch veld aanbrengen of wanneer we de dichtheid van ladingdragers veranderen met behulp van een elektrisch signaal.

De belofte van tweedimensionale quantummaterialen

Tientallen jaren van onderzoek naar optische modulatie hebben duidelijk gemaakt dat de sterkste en snelste veranderingen in de optische eigenschappen van materialen kunnen worden gerealiseerd door middel van excitonen. Deze quantummechanische ‘quasideeltjes’ bestaan uit een

elektron en een gat in een halfgeleidermateriaal (een ‘gat’ is een missend elektron in het atoomrooster), met elkaar verbonden door middel van de coulombkracht. In halfgeleidernanostructuren is de bindingsenergie van de excitonen 5 - 10 meV. Dit is kleiner dan de kinetische energie van elektronen bij kamertemperatuur, waardoor excitonen in zulke materialen niet stabiel zijn en geen rol spelen.

In tweedimensionale halfgeleidermaterialen zoals atomair dunne lagen van WS_2 is het een totaal ander verhaal [4]. Deze quantummaterialen zijn zodanig dun (0,6 nm) dat de elektrische veldlijnen van de excitonen buiten het materiaal reiken (figuur 3). Doordat de veldlijnen niet worden afgeschermd door het omringende materiaal is de bindingsenergie van de excitonen

veel groter: zo'n 300 - 500 meV. Het gevolg: excitonen zijn stabiel bij kamertemperatuur en zeer bepalend voor de optische eigenschappen van deze tweedimensionale halfgeleiders. Omdat de elektrische veldlijnen buiten het materiaal steken, zijn excitonen ook erg gevoelig voor externe invloeden. Voor de toepassingen waarin wij geïnteresseerd zijn is dit precies wat we zoeken. Zo kan de bindingsenergie van de excitonen sterk worden veranderd met behulp van elektrische velden en mechanische spanningen. Ook leidt het onderdrukken van de exciton-toestanden tot grote veranderingen in de brekingsindex. De optische eigenschappen van de excitonresonantie zijn dus uiterst veranderbaar.

Atomair dunne lens met een aan-uitschakelaar

De vraag is nu: kunnen we deze excitonresonantie gebruiken om actief veranderbare metaoppervlakken te maken? Om dit te testen hebben we in onze onderzoeksgroep eerst kleine apparaatjes gemaakt bestaande uit $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ grote vierkantjes van enkellaags WS_2 op een saffiersubstraat, met een gouden elektrisch contact (figuur 4, inzet). Door een elektrische potentiaal (de zogeheten gate-potentiaal, V_g) aan te brengen ten opzichte van een referentiecontact in een elektrochemische cel kunnen we de elektrondichtheid in het WS_2 veranderen. Met behulp van een optische microscoop meten we eerst het reflectiespectrum voor neutraal WS_2 ($V_g = 0\text{ V}$, blauwe lijn). Rond een golflengte van 620 nm is een sterke piek te zien, die wordt veroorzaakt door licht dat sterk verstrooid wordt door de excitonresonantie (figuur 4, 'A'). Deze scherpe piek laat zien hoe sterk de interactie van licht met excitonen is. Vervolgens injecteren we het vierkantje WS_2 met een hoge dichtheid elektronen door een gate-potentiaal van $V_g = 3\text{ V}$ aan te brengen (rode lijn). Het gevolg is overduidelijk: we onderdrukken de excitonpiek volledig. Dit wordt veroorzaakt door de sterke demping van de excitontoestand als gevolg

van exciton-elektronverstrooiing in het WS_2 -materiaal. Dit eenvoudige experiment laat zien hoe krachtig de invloed van de excitonresonantie op de optische eigenschappen van het materiaal is.

Vervolgens gebruiken we grote oppervlakken van enkellaags WS_2 op saffier om atomair dunne optische lenzen te maken met een verstelbare focusseerefficiëntie. Dit betekent dat we de intensiteit van het licht in het brandpunt kunnen veranderen tijdens gebruik. De materiaalindustrie heeft grote ontwikkelingen doorgemaakt in het prepareren van tweedimensionale materialen: het monster voor dit experiment dat bestaat uit $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ enkellaags WS_2 (nogmaals: slechts 0,6 nm dik!) op een saffiersubstraat is commercieel verkrijgbaar. Met behulp van nanolithografie, plasma-etsen, metaaldeposities en chemische reinigingsprocessen maken we metaoppervlakte-lenzen in de WS_2 -laag met een diameter van 1 mm en brandpuntsafstand van 2 mm (figuur 5). Gouden elektrische contacten lopen radiaal inwaarts om de ladingsdichtheid in het WS_2 aan te sturen met behulp van gate-potentialen. Om de werking van de lens te demonstreren belichten we die door het transparante saffiersubstraat heen en zoeken vervolgens het brandpunt boven de lens. De vorm en intensiteit van het brandpunt meten we nauwkeurig door middel van zogeheten confocale microscopie. Door het vermogen van het licht in het brandpunt te vergelijken met wat er op de lens valt, bepalen we de efficiëntie. Ten slotte stellen we de gate-potentiaal in op $V_g = 3\text{ V}$ en meten de invloed hiervan op de intensiteit in het brandpunt. De verandering is opmerkelijk groot: de relatieve intensiteit neemt af met 33%, ondanks de extreem kleine dikte van de lens die de lichtweg beïnvloedt. We zien dat de excitonresonantie in het WS_2 -materiaal uniform wordt onderdrukt en dat de lichtverstrooiing door de excitonen verdwijnt. Deze atomair dunne lens heeft nu een aan-uitschakelaar!

De toekomst van atomair dunne transparante optica

Het unieke resultaat van dit experiment is een gevolg van de combinatie van quantummechanische effecten en klassieke optica. Het resultaat opent de deur voor de ontwikkeling van een geheel nieuwe categorie optische elementen. In de huidige vorm van de lens zijn echter nog enkele fundamentele en technische uitdagingen. De voornaamste beperking is de efficiëntie van de lens. Ondanks de 33% modulatie-efficiëntie is de absolute efficiëntie minder dan 1%. Dit betekent dat 99% van het licht nog onverstoord doorgelaten wordt – de lens is dus uiterst transparant. Deze efficiëntie kan sterk verbeterd worden door materialen van hogere kwaliteit te gebruiken, maar zal waarschijnlijk kleiner dan 10% blijven. Dat lijkt nog steeds weinig, maar er is een grote groep nieuwe toepassingen waarvoor zelfs de huidige 1% efficiëntie al meer dan voldoende is en daarbij is de transparantie juist een pré. *Heads-up displays* voor augmented reality vereisen bijvoorbeeld dat de buitenwereld onverstoord wordt gezien door de gebruiker. Omdat de gevoeligheid van het menselijk oog logaritmisch schaal, is 1% efficiëntie voldoende om beelden te projecteren in het gezichtsveld van de gebruiker [5]. Kortom: de elektrisch verstelbare en atomair dunne lens die we in dit experiment hebben gemaakt vormt een belangrijke stap in de ontwikkeling van transparante dynamische optische elementen. De lens laat zien dat quantummaterialen unieke kansen bieden om nieuwe functionaliteit te ontketen.

REFERENTIES

- 1 Nanfang Yu en Federico Capasso, Flat optics with designer metasurfaces, *Nature Materials* **13**, 139 - 150 (2014).
- 2 Jorik van de Groep et al., Exciton resonance tuning of an atomically-thin lens, *Nature Photonics* **14**, 426-430 (2020). (Figuren 4 en 5 en het introductiefiguur zijn gebaseerd op figuren uit deze publicatie.)
- 3 Nanfang Yu et al., Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction, *Science* **334**, 333 (2011).
- 4 Sajedeh Manzeli et al., 2D transition metal dichalcogenides, *Nature Reviews Materials* **2**, 17033 (2017).
- 5 Alex Krasnok, Metalenses go atomically thick and tunable, *Nature Photonics* **14**, 409 - 410 (2020).