

Echte kleuren op nanoschaal

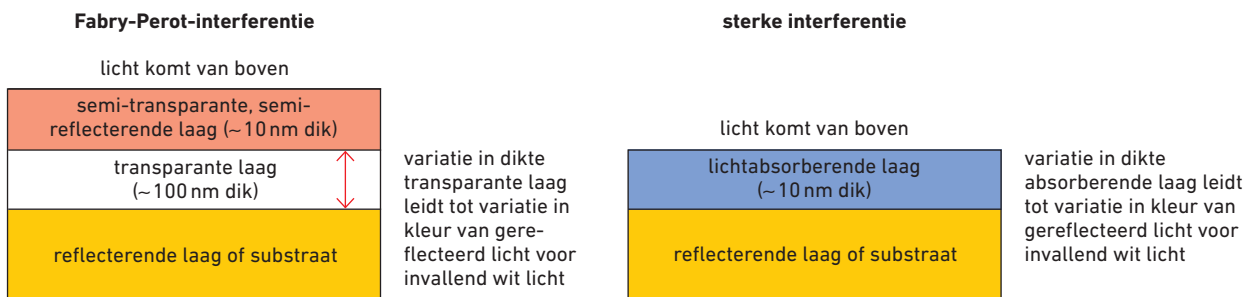


Figuur 1. Voorbeeldgebruik optisch amorfe, SEM-BSE en optische kristallijn om een kleurenafbeelding van het schilderij *Meisje met de parel* van Johannes Vermeer te genereren.

Het manipuleren van zichtbaar licht in pixels ter grootte van tientallen nanometers is zelfs met de modernste technieken nog uitdagend. De beeldschermen waaraan we gewend zijn, bijvoorbeeld op de smartphone, computer of televisie, hebben pixels met een grootte van de orde van tien micrometer. De kleinste details in computerchips hebben tegenwoordig afmetingen van tien nanometer. Daar zit dus nog een factor duizend tussen. In ons recente werk [1], grotendeels bedacht en uitgevoerd door promovendus Daniel Yimam en dat we hier samenvatten, hebben we een nieuwe manier gevonden om zichtbaar licht te manipuleren op een lengteschaal van nanometers.

Dit is interessant voor de ontwikkeling van onder andere virtualreality-brillen. Maar hoe manipuleren we zichtbaar licht op deze kleine schalen? Licht dat op een spiegelend oppervlak valt, wordt weerkaatst. Als er boven op dat spiegelende oppervlak twee laagjes aangebracht worden, waarbij het onderste, met een dikte van de orde van honderd nanometer, transparant is en het bovenste gedeeltelijk transparant en gedeeltelijk reflecterend, dan wordt invallend wit licht naar buiten toe gereflecteerd met een bepaalde kleur, zie figuur 2. De kleur kunnen we dan variëren door de dikte van de transparante tussenlaag te variëren. Dit bekende effect is een

gevolg van Fabry-Perot-interferentie [2]. Ook kunnen we invallend wit licht reflecteren door een licht-absorberend laagje met een dikte in nanometerrange op een spiegelend oppervlak aan te brengen. Dit laatste effect is in 2013 ontdekt en heeft de naam sterke interferentie gekregen om het te onderscheiden van Fabry-Perot-interferentie [3]. Voordeel van sterke interferentie is dat de reflectiekleuren veel minder afhankelijk zijn van hoeken van lichtinval en reflectie. Het werkt dus ook beter onder scherpende hoeken. Met sterke interferentie kunnen we reflectiekleuren variëren door de dikte van het dunne absorberende laagje te variëren, zie figuur 2. Laterale variatie van deze dikte op



Figuur 2: Fabry-Perot-type versus sterke interferentie.

nanometerschaal voor het creëren van reflectiekleuren was (voor ons werk) nog niet aangetoond. De meest gebruikte techniek om structuren op nanometerschaal te maken is lithografie. Ook al is lithografie heel krachtig, het is niet geschikt om continue variaties in laagdikte te genereren over kleine laterale lengteschalen. De techniek die wij hebben gebruikt is dat wel. Wij maken gebruik van een elektronenmicroscop (SEM) met daarin ook een scansysteem voor een gefocusseerde ionenbundel (FIB). De SEM heeft een resolutie van één nanometer, de ionenbundel een diameter van circa tien nanometer. Met de ionenbundel schieten we galliumionen op een oppervlak met een versnelspanning die we kunnen variëren tussen 30 en 1 kV. Met de bijbehorende energieën kunnen we lokaal, dus op nanoschaal, materiaal/atomen verwijderen uit het oppervlak.

In de SEM-FIB-software kunnen we ieder willekeurig plaatje met vier miljoen pixels inlezen en dan omzetten naar grijstonen, bijvoorbeeld acht bit, en dat zijn dan 256 grijstonen. Die 256 grijstonen kunnen vervolgens met de ionenbundel omgezet worden in 256 verschillende gradaties van verwijderd materiaal. Om kleuren te genereren met het sterke-interferentie-effect gebruiken we een laagje antimoonsele-nide (Sb_2Se_3), met een initiële dikte van circa 26 nm, op een reflecterende laag van goud. De 256 gradaties van verwijderd materiaal hebben we vervolgens zo gekalibreerd dat we

lokaal heel precies laagjes kunnen verwijderen tussen 0 en 26 nm. Om te laten zien dat we hiermee interessante (licht)patronen kunnen genereren hebben we als willekeurig plaatje verschillende beroemde schilderijen gebruikt, zoals het *Meisje met de parel* van Johannes Vermeer. Een kleurenplaatje van dit schilderij hebben we omgezet naar een acht bit grijspaatje met vier miljoen pixels. Vervolgens hebben we met de FIB dit schilderij gefreesd in het dunne laagje zodat de pixels circa twintig nanometer groot zijn. Het resultaat is in figuur 1 te zien. Als je bij een drukker goede kwaliteit plaatjes moet aanleveren dan wordt in het algemeen gezegd dat de resolutie van het plaatje ten minste 300 dpi moet zijn. Het kleurenplaatje dat we hier gemaakt hebben, heeft een dpi van meer dan een miljoen (mogelijk een record). De bovenste rij laat echte kleuren zien wanneer de plaatjes van links naar rechts steeds iets dieper in de Sb_2Se_3 -laag gefreesd worden. De middelste rij laat SEM-afbeeldingen zien waarbij we de teruggekaatste elektronen gebruiken. Afbeeldingen worden van links naar rechts steeds iets helderder, omdat we dichterbij de goudlaag komen die de elektronen beter terugkaatst.

In de onderste rij plaatjes hebben we het sample vijf minuten verhit bij 250 °C, zodat de Sb_2Se_3 -laag een kristallijne structuur gekregen heeft. Het materiaal dat we gebruiken hoort tot de klasse van *phase-change-materialen* en deze vertonen grote veranderingen in de

optische eigenschappen wanneer ze geschakeld worden tussen amorfe en kristallijne structuren. Deze materialen werden voor het eerst (tussen 1991 en 2009) op grote schaal, met commercieel succes, toegepast in herschrijfbaar cd's, dvd's en blu-ray-discs. Hierdoor is ook bekend dat het in principe mogelijk is om individuele pixels in plaatjes als de onze heel snel te schakelen tussen de amorfe en kristallijne structuur. Wat met name opvalt in het bovengenoemde plaatje is dat een rode kleur in de amorfe laag omgezet wordt naar groen in de kristallijne laag. Dit kan begrepen worden omdat de kristallijne laag licht wat meer absorbeert dan de amorfe laag.

Onze methode genereert echte kleuren op nanometerschaal en kan ook nog snel schakelen. Dit zou gebruikt kunnen worden voor de productie van reflectieve beeldschermen van onder andere slimme brillen, maar waarschijnlijker is dat het een toepassing vindt bij de productie van optische chips of voor andere opto-elektronische applicaties.

REFERENTIES

- Daniel T Yimam, Minpeng Liang, Jianting Ye en Bart J Kooi, 3D Nanostructuring of Phase-Change Materials Using Focused Ion Beam Towards Versatile Optoelectronics Applications, *Advanced Materials*, 2303502 (2023).
- C. Fabry en A. Perot, *Theorie et applications d'une nouvelle methode de spectroscopie interferentielle*. *Ann. Chim. Phys.* **16**, 7 (1899); A. Perot en C. Fabry, *On the Application of Interference Phenomena to the Solution of Various Problems of Spectroscopy and Metrology*, *Astrophysical Journal* **9**, 87 (1899). doi:10.1086/140557.
- M.A. Kats, R. Blanchard, P. Genevet en F. Capasso, *Nature Materials* **12**, 20 (2013).