

Flinterdun, maar perfect zwart

Nieuwe technologie plaatst 19^e-eeuwse fysica in een ander licht

Een goede zonnecel zet al het invallende licht om in elektriciteit. Een goede lichtdetector detecteert alle inkomende fotonen. Voor beide is het nodig dat al het invallende licht geabsorbeerd wordt. Om de omzetting van licht naar elektrische energie zo efficiënt mogelijk te maken, is het belangrijk dat deze absorptie ook nog in een zo klein mogelijk volume plaatsvindt. Deze twee eigenschappen – 100% absorptie en een piepklein volume – lijken in tegenspraak, maar toch is het mogelijk! Eduard Driessen

96

Deze perfecte absorptie vindt zelfs plaats in het meest simpele systeem dat er is: een flinterdun laagje niobiumnitride (NbN), slechts 4,5 nm dik (dat is slechts enkele tientallen atomen). De optica wordt compleet beschreven door de 19^e-eeuwse vergelijkingen van Fresnel. Toch heeft het een verrassing: als het laagje op de juiste manier belicht wordt, absorbeert het alles.

Het experiment

Figuur 1 toont de gemeten absorptie van zo'n 4,5 nm dunne film NbN, als functie van de hoek van inval. Voor dit experiment hebben we de film belicht met een halfgeleiderlaser (golflengte 775 nm), door het saffieren substraat waarop de film gedeponereerd is. Omdat saffier een grotere brekingsindex heeft dan lucht, is er een kritische hoek, waar voorbij het licht zich niet meer in de lucht kan voortplanten. Om hoeken voorbij deze kritische hoek (aangegeven met de stippellijn) te halen, hebben we een prisma op het substraat geplaatst, zoals te zien is in de inzet.

De meting is gedaan voor twee pola-

risaties van het invallende licht. De rode punten zijn gemeten voor de polarisatie in het vlak van het papier (*p*-polarisatie), en de blauwe punten voor de polarisatie loodrecht op het papier (*s*-polarisatie). De absorptie is bepaald door bij iedere hoek de reflectie *R* en transmissie *T* te meten. De absorptie is dan simpel $A = 1 - R - T$.

Het eerste dat opvalt in de figuur is dat de beide polarisaties ander gedrag vertonen. De absorptie voor *p*-polarisatie (rood) daalt bij grotere hoeken, en heeft een minimum, terwijl de absorptie voor *s*-polarisatie stijgt en een maximum heeft.

Het tweede dat opvalt, is dat het maximum van de absorptie 94% is. En dat terwijl de laag maar 4,5 nm dik is.

Fresnels vergelijkingen

Om onze metingen te begrijpen, gaan we terug naar een stukje 19^e-eeuwse natuurkunde. De reflectie en transmissie van een dunne laag materiaal worden beschreven door de vergelijkingen van Fresnel (zie kader). Aan ieder grensvlak tussen twee materialen wordt een deel

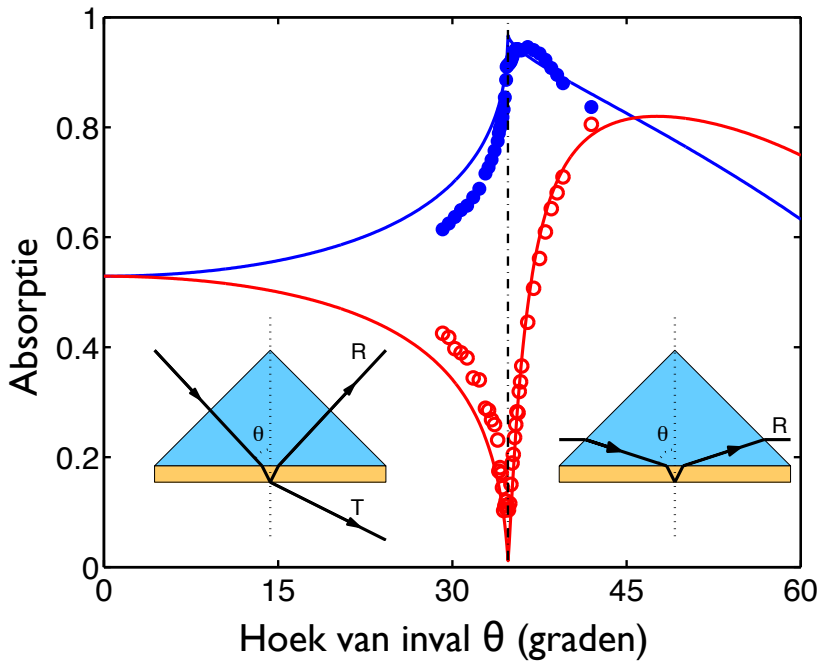
van het licht doorgelaten en een deel gereflecteerd. De totale reflectie en transmissie worden bepaald door een interferentie van alle golven die door de absorberende laag heen en weer gegaatst zijn. Omdat voor beide polarisaties de Fresnelcoëfficiënten anders zijn (denk aan de hoek van Brewster), is de absorptie in de laag ook voor beide polarisaties anders.

De curves in figuur 1 laten een fit van Fresnels vergelijkingen aan de metingen zien. Om de metingen goed te be-

Eduard Driessen (1979) studeerde Technische Natuurkunde in Delft. Daarna deed hij in Leiden, onder leiding van Michiel de Dood, zijn promotieonderzoek naar het koppelen van licht aan periodieke nanostructuren, waarop hij op 24 september 2009 promoveerde. Hij is nu postdoc in Delft en doet daar onderzoek naar de fysica van fotondetectie in supergeleidende draden, in de groep van Teun Klapwijk.



eduarddriessen@gmail.com



Figuur 1 Gemeten absorptie van een 4,5 nm dikke NbN-film, als functie van de hoek van inval, voor *s*- (blauw) en *p*-polarisatie (rood). De curves geven een fit van Fresnels vergelijkingen aan de metingen. De inzet toont de experimentele opstelling.

schrijven, hoefde alleen de (niet precies bekende) diëlektrische constante van het NbN aangepast te worden. De metingen worden geheel beschreven door Fresnels vergelijkingen. De kleine afwijkingen tussen berekening en meting worden verklaard door een kleine hoekspreiding in de inkomende bundel en de dubbelbrekendheid van het saffier.

Om wat meer inzicht te krijgen in de fysica, kunnen we in detail kijken naar de verschillende bijdragen in de reflectie en transmissie. Om complete absorptie te krijgen, moeten zowel de reflectie als de transmissie uitgeschakeld worden. De transmissie kunnen we uitschakelen door naar de kritische hoek te gaan: het licht mag de lucht niet in, en kan alleen nog maar gereflecteerd of geabsorbeerd worden.

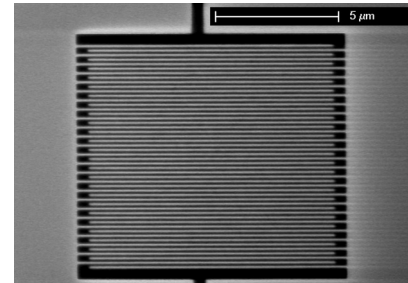
De reflectie wordt bepaald door interferentie van golven die meerdere malen in de laag heen en weer kaatsen (zie kader). De totale reflectie wordt bepaald door het verschil in fase van de eerste twee reflecties. Dit zijn de reflectie aan het saffier-NbN-oppervlak en de eerste reflectie aan het NbN-luchtoppervlak. Voor *p*-polarisatie zijn deze twee reflecties in fase, en is er constructieve interferentie. Voor *s*-polarisatie zijn ze uit fase en is er destructieve interferentie. Omdat de NbN-laag absorbeert, wordt de amplitude van de verschillende bijdragen bepaald door de laagdikte d . Door die

dikte goed te kiezen, wordt de interferentie compleet, en is er complete absorptie (voor *s*-polarisatie) of complete reflectie (voor *p*-polarisatie). Als de laag te dik wordt gemaakt, wordt de interferentie zwakker en zal de reflectie ook voor *s*-polarisatie weer toe gaan nemen.

Maar als deze vergelijkingen al uit de 19^e eeuw stammen, waarom is niemand eerder op dit idee gekomen? Dat heeft vooral te maken met de keuze van het materiaal, NbN. Om de complete absorptie te halen is een materiaal nodig met een bijzondere diëlektrische constante, die voornamelijk imaginair is. Dit is een zeer slecht geleidend metaal of een erg absorberend diëlectricum. Van dat materiaal moet je dan ook nog een hele dunne film (enkele nanometers dik) kunnen maken. Deze combinatie van eigenschappen komt niet veel voor, daarom is dit regime van Fresnels vergelijkingen tot nu toe over het hoofd gezien.

Een toepassing in detectoren

De keus voor dit speciale materiaal kwam niet uit de lucht vallen. De reden dat we in de absorptie van NbN geïnteresseerd waren, was dat dit materiaal gebruikt wordt als bouwsteen voor (supergeleidende) detectoren voor enkele fotonen. Deze detectoren [1] bestaan uit een smalle meander NbN, zoals te zien in figuur 2. De (zwarte) lijntjes van deze meander



Figuur 2 SEM-afbeelding van een NbN supergeleidende enkelvoudige meander. De meander van supergeleidend materiaal is ~4,5 nm dik en 100 nm breed (afbeelding: Sander Dorenbos, TU Delft).

hebben een typische dikte van 4,5 nm en een breedte van 100 nm.

Deze meander wordt afgekoeld tot 4,2 K, ver onder de supergeleidende overgang, en er wordt een stroom doorheen gestuurd. Omdat de meander supergeleidend is, zal er geen spanning over de draad staan. Zodra er echter een foton geabsorbeerd wordt in de meander, kan er een korte spanningspiek gemeten worden. Hiermee kunnen dus enkele fotonen geteld worden.

Het detectieproces is fenomenologisch te splitsen in twee delen: allereerst moet het foton geabsorbeerd worden. De geabsorbeerde energie moet vervolgens omgezet worden in een meetbare spanningspuls. Beide processen hebben hun eigen efficiëntie.

De tweede stap, van absorptie naar spanningspuls hangt af van de supergeleidende eigenschappen van de meander. Hier spelen zaken als de temperatuur, de stroomdichtheid, de materiaaleigenschappen van het NbN en de geometrie van de draad een rol. Deze stap laten we hier verder buiten beschouwing; we richten ons op de eerste stap, de optische absorptie.

De absorptie van een meander

De absorptie van een 4,5 nm dikke NbN film kan 94% zijn. Maar een detector zoals in figuur 2 bestaat maar voor 50% uit absorberend materiaal.

Fresnels vergelijkingen voor een dunne laag

Het beschrijven van de reflectie en transmissie van een dunne absorberende laag gebeurt met Fresnels vergelijkingen. Voor elk van de twee oppervlakken in figuur 3 is er een reflectieamplitude r en een transmissieamplitude t .

De amplitudes van de verschillende reflecties en transmissies (de verschillende pijltjes in figuur 3) moeten coherent bij elkaar opgeteld worden om de totale reflectie R en transmissie T te krijgen.

De absorptie is gedefinieerd $A=1-R-T$. Voor een film die veel dunner is dan de golflengte, en waarvoor de diëlektrische constante $\epsilon \approx i\epsilon''$ imaginair is, is de absorptie bij loodrechte inval gegeven door [3]

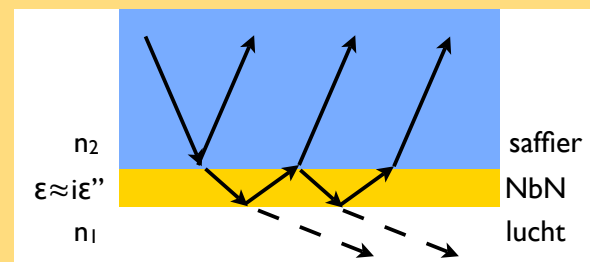
$$A = \frac{4n_1 k_0 d \epsilon''}{n_1 + n_2 + k_0 d \epsilon''}$$

waarbij d de dikte van de laag is, en k_0 de golfvector van het licht. Er is een dikte waarbij de absorptie maximaal is. De absorptie die bij deze dikte hoort is

$$A_{\max} \approx \frac{n_2}{n_1 + n_2}$$

en dus (in deze benadering) onafhankelijk van de eigenschappen van de absorberende laag.

Als de film belicht wordt onder de kritische hoek, wordt de transmissie in de lucht $T=0$. De totale reflectie wordt gegeven door alle bijdragen op te tellen. Voor optimale dikte doven de meervoudige reflecties in de laag de eerste reflectie van het saffier-NbN-grensvlak uit in het geval van s -polarisatie. Dit leidt tot 0% reflectie en dus 100% absorptie. In het geval van p -polarisatie gebeurt het tegenovergestelde: de meervoudige reflecties tellen constructief op bij de eerste reflectie, wat leidt tot 100% reflectie.



Figuur 3 De reflectie van de laag NbN wordt gevormd door meerdere bijdragen. De interferentie tussen deze bijdragen zorgt voor een minimum of maximum in de reflectie.

Toch kunnen we onze complete absorptie gebruiken voor deze detector. Om de destructieve interferentie te krijgen die nodig is voor complete absorptie, is de afname van de amplitude tijdens een rondgang door de laag van belang. Deze afname wordt bepaald door de dikte van de laag d en het imaginaire deel van de diëlektrische constante, ϵ'' .

Omdat de lijntjes veel kleiner zijn dan de golflengte van het licht, kunnen we de meander voor de polarisatie parallel aan de draadjes van de detector beschrijven als een uniforme laag, met een diëlektrische constante die het gemiddelde is van de diëlektrische constante van de draadjes en die van de lucht ertussen. Dit betekent dat voor een detector met een vulfractie van 50%, ϵ'' twee keer zo klein is. Maar de totale absorptie was een functie van het product $d \epsilon''$. Ieder verlies dat we hebben in ϵ'' , omdat de laag niet compleet gevuld is, kan worden opgevangen door de dikte d te vergroten. Zolang de laag maar dun blijft vergelijken met de golflengte.

Het middelen van de diëlektrische

constanten kan alleen voor de polarisatie parallel aan de lijntjes, maar dat is geen probleem. De perfecte absorptie voor een gesloten film geldt tenslotte ook maar voor een enkele polarisatie. Door de geometrie dus goed te kiezen kan een detector gemaakt worden die in ieder geval 94% (berekend) van het invallende licht absorbeert. Bovendien wordt het licht dat niet geabsorbeerd wordt, gereflecteerd. Dit licht kan dan met een tweede detector opgevangen en geabsorbeerd worden.

Conclusie

Hoewel de detector gebaseerd op dit principe nog gemaakt moet worden, hebben we laten zien dat het mogelijk is om in een laag van enkele atoamlagen (4,5 nm) dik al het invallende licht te absorberen. Deze mogelijkheid zat altijd verborgen in de 19^e-eeuwse vergelijkingen van Fresnel, maar recente technologische ontwikkelingen en interesse in heel dunne absorberende films hebben haar tevoorschijn gebracht. Voor eventuele andere toepassingen is het nodig andere materialen te vinden met een voornamelijk ima-

inaire diëlektrische constante. Hiervoor zouden ook metamaterialen gebruikt kunnen worden.

Dit onderzoek is gedaan samen met Michiel de Dood, en is mogelijk gemaakt door NWO en FOM. De resultaten zijn gepubliceerd in [2, 3].

Referenties

- 1 G.N. Gol'tsman et al., *Appl. Phys. Lett.* **79**, (2001) 705.
- 2 E.F.C. Driessen en M.J.A. de Dood, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 171109 (2009).
- 3 E.F.C. Driessen et al., *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **47**, 10701 (2009).

Deze prijs is mede mogelijk gemaakt door Specs Nanotechnology.