

## Samenvatting

---

# Meervoudige verstrooiing van licht in poreus gallium fosfide

In dit proefschrift wordt een experimenteel onderzoek van meervoudige verstrooiing van licht gepresenteerd, met de noodzakelijke introducties: de theoretische achtergrond en de monsterpreparatie. De nadruk is op de effecten van meervoudige verstrooiing van *golven*, waar interferentie bestaat en belangrijk is, in de zoektocht naar Anderson lokalisatie.

De principes van de theorie van meervoudige verstrooiing worden uitgelegd. Zonder interferentie, als de kracht van de verstrooiing van een media toeneemt, verandert de voortplanting van licht van ballistisch naar enkele verstrooiing, tot naar het diffusie-regime. In een stationaire meting, zoals gedaan met een continue laser of een gloeilamp, wordt de diffusie gekarakteriseerd door de gemiddelde vrije weglengte  $\ell$ , oftewel de gemiddelde afstand dat licht nodig heeft om in alle richtingen te verstrooien. In een dynamische meting, zoals gedaan met een gepulste laserbron en een tijdopgeloste detectie, is de karakteristieke grootte de diffusieconstante (die een lengte keer een snelheid is).

De effecten van interferentie in meervoudige verstrooiing zijn divers, maar we benadrukken hier de terugstrooikegel (TSK). De TSK komt door de constructieve interferentie van wederkerige (of tijdomegekeerd) paden in ensemble-gemiddelde wanordelijke media. Het gereflecteerde licht van een diffuus monster heeft een typische Lambertiaanse vorm waarop een nauwe kegel staat in de precieze terugstrooirichting. De breedte van die TSK is gekarakteriseerd door de gemiddelde vrije weglengte en de golflengte van het licht  $\lambda$ . De top van de TSK geeft informatie over de coherentielengten in het materiaal: de eindige dikte, de absorptielengte, en de lokalisatielengte.

Het regime van meervoudige verstrooiing van licht is in een poreuze halfgeleider, gallium fosfide (GaP), bestudeerd, die tegenwoordig bekend staat als het sterkst verstrooiende materiaal voor zichtbaar licht (rond 633 nm). Een wafer van GaP, gedoteerd met zwavel, is electrochemisch geëtsd om een poreuze structuur met gelijkmatig dikte te maken. De chemie van die etsproces wordt besproken. De eigenschappen van de poreuze structuur hangen allereerst af van de dotering van de GaP wafer en de spanning die tijdens etsen is aangelegd. De poriën zijn gemaakt met een maat tussen 50 en 200 nm, en dus kleiner dan de golflengte van het licht. De poreuze monsters zijn daarna fotochemisch geëtsd om een dunne top laag te verwijderen, die op de poreuze laag overblijft na het electrochemische

etsen. De verwijdering van die toplaag vereenvoudigt de interpretatie van de optische metingen aan de poreuze monsters. De poreuze monsters kunnen ook extra chemisch geëet worden, zodat de gemiddelde doorsnede van de poriën gelijkmatig toeneemt, tot dicht bij de golflengte van het licht.

Drie typen van monsters, na electrochemische, fotochemische, en chemische etsen, zijn gekarakteriseerd door enkele optische technieken, met name de totale transmissie, de TSK, en de hoekopgeloste transmissiemetingen. Een heel belangrijke parameter van de diffuse monsters is de effectieve brekingsindex, waarvan zowel de golfvector van licht in het materiaal als de interne reflectie aan het oppervlak afhangen. Een theorie wordt gepresenteerd die de randvoorwaarden van een diffuus medium zorgvuldig behandelt. Deze theorie voorspelt dat de hoekopgeloste transmissie wordt gekarakteriseerd door het brekingsindex-contrast van het oppervlak tussen het diffuse en het buitenmedium. De brekingsindex is experimenteel onderzocht als functie van porositeit in het domein van sterke verstrooiing. De effectieve-mediumtheorieën, zorgvuldig afgeleid in de limiet van zwakke verstrooiing, beschrijven onze metingen van brekingsindex niet goed.

In de zoektocht naar Anderson lokalisatie van licht, zijn heel sterk verstrooiende monsters gemaakt door middel van electrochemische etsen. De optische absorptielengte is langer dan de dikste monsters, namelijk  $250 \mu\text{m}$ . De sterkst verstrooiende materialen zijn gemaakt van GaP wafers met dotering  $N = 2-5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , en electrochemisch geëet op de hoogste mogelijke spanning. De gemiddelde doorsnede van de poriën in een monster neemt toe met chemische etsen. De verstrooiingskracht van sommige monsters neemt toe met het toepassen van chemische etsen. Een zorgvuldige bestudering van de totale transmissie en de breedte en afronding van de TSK toont, voor en na chemische etsen, een heel goede overeenstemming van de metingen met het diffusie-regime. Binnen de ruimte van dit proefschrift is geen effect gemeten, dat door Anderson lokalisatie veroorzaakt kan zijn, zelfs niet voor heel sterk verstrooiende monsters, waar  $2\pi\ell/\lambda \approx 3.5$ .

Het electrochemische etsen maakt een poreuze structuur met gerichte poriën: poriën groeien in de richting loodrecht aan het oppervlak van de GaP wafer. De geometrische anisotropie veroorzaakt anisotrope diffusie. Een anisotroop sprongmodel en de daaruit volgende diffusie-theorie met een anisotrope diffusieconstante tensor en isotrope gemiddelde vrije weglengte wordt afgeleid. De anisotropie in beide stationaire en dynamische metingen zijn voorspeld afhankelijk te zijn van de componenten van de diffusie-tensor. Metingen aan anisotrope monsters zijn inderdaad anisotroop voor stationaire en dynamische diffusie, en voor TSK. De anisotropie in de diffusie-tensor, als gemeten van deze drie onafhankelijke optische metingen, is consistent. Poreus GaP toont zowel sterke verstrooiing als sterke anisotropie (de verhouding van de diagonale elementen van de diffusie-tensor is rond 4).

De laatste deel van dit proefschrift pakt een onderwerp aan dat verschilt van meervoudige verstrooiing van licht. Het onderwerp van het volledige opslaan van een lichtpuls binnen een korte trilholtte wordt behandeld. Dit verschijnsel kan gezien worden als een macroscopisch equivalent van de schakeling van een (Anderson) gelokaliseerde toestand. In een korte trilholtte neemt de bandbreedte van de inkomende puls af volgens de finesse van de trilholtte, ten koste van de inkoppeling efficiëntie. Door dynamische schakeling van de reflectiviteit van de invoerkoppelaar volgens de vorm van de inkomende puls, kan de reflectie van de trilholtte worden voorkomen door destructieve interferentie. Als geen licht door de trilholtte wordt gereflecteerd, wordt het gehele inkomende vermogen opgenomen in de tril-

holte, binnen een enkele toestand met nauwe bandbreedte. Een theoretische beschouwing van het vangen van de puls in een kort trilholte met een hoge finesse wordt gegeven. Een praktische implementatie van de inkoppelspiegel met variabele reflectiviteit is doorgevoerd met een Pockels cel en polarisatie-optica, samen met een snelle schakeling van de hoogspanning. De proefresultaten, gemeten als functie van frequentie, tonen tegelijk een hoger vermogen en nauwere bandbreedte van het opgenomen licht, in vergelijking met dezelfde opstelling maar met een willekeurige constante reflectiviteit van de invoerkoppelaar.