

Samenvatting

Eliane Flück

Ph.D. thesis, June 20, 2003

Fotonische kristallen zijn optische materialen met structuur op de schaal van de golflengte waardoor de optische eigenschappen zeer sterk van de geometrie afhangen. In dit proefschrift worden de lokale optische eigenschappen van een fotonische kristal onderzocht met een nabije-veld methode. De op deze manier verkregen optische informatie van licht binnenin de structuur wordt direct gerelateerd aan de geometrie. Tegenover een dergelijke lokale meettechniek, die een resolutie oplevert kleiner dan de golflengte van licht, staan verre-veld methoden, die de optische eigenschappen ruimtelijk middelen en dus globale informatie meten. Metingen van gereflecteerd licht openbaren bijvoorbeeld de kwaliteit van de kristal structuur of effecten van een verboden frequentie band (in een richting) op de voortplanting van het licht. Door de twee technieken, de nabije- en de verre-veld methode, gecombineerd te gebruiken, wordt het mogelijk om een compleet beeld van het gedrag van licht in een fotonisch kristal te verkrijgen.

In hoofdstuk 1 is the theorie van fotonische kristallen beschreven. De optische dispersie relatie wordt eerst toegelicht aan de hand van een oneindig lange een-dimensionale structuur. Vervolgens worden de specifieke gevallen van een fotonische kristal plak en een drie-dimensionaal polystyreen opaal besproken. In het tweede deel van dit hoofdstuk worden de gebuikte methodes voor het vervaardigen van de kristallen toegelicht. Voor het maken van verschillende zeer kleine periodieke structuren is een gefocuseerde ionenbundel (FIB) gebruikt. De ionen worden met een hoge energie op het substraat geschoten, waardoor het mogelijk is om lokaal vormpjes op een schaal van nanometers in het materiaal te boren. Voor de fabricage van grote twee-dimensionale periodieke structuren is van een interferometrische opstelling gebruik gemaakt om fotoresist te belichten. Na een lift-off en een ets proces ontstaat een vrijhangende membraan met een hexagonaal gatenpatroon. De drie-dimensionale fotonische kristallen zijn gemaakt op basis van kleine polystyreen bolletjes, die door zelforganisatie een kristal vormen. Dit kristal heeft verboden frequentie banden in verschillende richtingen.

Verschiedende methoden, zowel nabije- als ook verre-veld technieken gebruikt, om fotonische kristallen te bestuderen, worden beschreven in hoofdstuk 2. Meestal

bevinden zich de lichtbron en ook de detector in het verre-veld. Wij hebben een dergelijke methode gebruikt, om de verboden frequentie banden van de tweedimensionaal fotonische kristal plak en van de drie-dimensionale opaal te bepalen. Bovendien zijn er hoekafhankelijke reflectiviteitsmetingen aan de vrijhangende membraan uitgevoerd. Daarmee is het mogelijk aan resonante modi van het kristal te koppelen. Dit wordt schematisch toegelicht. Verder wordt in dit hoofdstuk uitgelegd, hoe nabije-veld methodes werken en hoe de scherpe nabije-veld tipjes worden gemaakt. Wij gebruiken twee verschillende nabije-veld methodes: een “photon scanning tunnelling microscope (PSTM)” en een “near-field scanning optical microscope (NSOM)”. In een PSTM wordt het scherpe tipje gebruikt als detector en in een NSOM wordt een dergelijke tipje gebruikt als optische puntbron. In beide opstellingen zijn zogeheten drie-dimensionale metingen mogelijk, waarmee retractie- en naderingscurven gemeten worden. De PSTM geeft bovendien de mogelijkheid om de optische fase van het licht binnenin in een structuur te meten. Dit wordt dan simultaan gedaan met een meting van de lokale intensiteit van het licht en de topografie van de structuur.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten van het onderzoek met de PSTM aan verschillende, met FIB vervaardigde structuren besproken. In de veldverdelingen van licht in een golfgeleider met 15 gaten of 15 spleten vinden we staande golven voor het begin van de gaten of spleten. In de periodieke structuur zelf is een afname van de intensiteit te herkennen. Uit deze afname kan het verlies van licht worden berekend. Wij stellen vast, dat de afname van intensiteit (en dus de hoeveelheid verloren licht) golflengte afhankelijk is. Aangezien het verlies groter wordt voor kortere golflengten lijkt het erop dat het verlies wordt veroorzaakt door verstrooiing. Achter de 15 spleten vinden we een onverwacht golflengte afhankelijk verschijnsel bij de opbouw van de golfgeleider mode. Het is een interferentie die wordt opgebouwd uit licht, dat zich direct door de periodieke structuur heeft voortgeplant en licht, dat aan het onderliggend substraat wordt weerkaatst. Het feit dat er licht om de structuur heen komt zonder deze te voelen is een belangrijke ontdekking omdat het laat zien dat er eventueel overspraak kan ontstaan in optische circuits op basis van fotonische kristallen die gemaakt zijn met een silicium-op-isolator technologie. Aan de structuur met 15 gaten bekijken we de fase van het licht. De lokale verandering van de effectieve brekingsindex van het materiaal wordt zichtbaar in de metingen. De gaten verstrooien het licht in bolgolven, welke interfereren met het inkomende licht. Het resultaat ervan is een ingewikkeld netwerk van fasesingulariteiten en fasesprongen. De met de PSTM gemeten lokale optische veldverdelingen en de faseevolutie laten optische verschijnselen zien die met verre-veld methodes onmogelijk te zien zijn. In het laatste deel van hoofdstuk 3 wordt gedemonstreerd, hoe belangrijk de drie-dimensionale meetmethode is. Met behulp van retractie- en naderingscurven kan evanescent licht van verstrooid licht

worden onderscheiden. Dit wordt aan de hand van verstrooiing aan twee spleten in een golfgeleider duidelijk gemaakt. Bovendien wordt de vorm van een fasesingulariteit voor verschillende tip-substraat afstanden bekeken. Wanneer 4 modi in de golfgeleider aangeslagen worden, kan de creatie van een paar tegengestelde fasesingulariteiten worden gevisualiseerd.

In hoofdstuk 4 is een twee-dimensionaal fotonisch kristal plak met behulp van verre-veld methodes onderzocht. Met de methode is het mogelijk om zogeheten resonante modi van de structuur aan te slaan. Als gevolg is er in het spectrum van het gereflecteerde licht een scherp piekje te zien. De vorm van de piek wordt bepaald door interferentie van licht dat zich langs twee verschillende kanalen voortplant: directe weerkaatsing aan de fotonische kristal plak en weerkaatsing via een resonante mode. De bepaling van de optische frequentie van de resonantie wordt gebruikt om een deel van de dispersie relatie van de fotonische kristal plak te reconstrueren. De resultaten komen goed overeen met modelberekeningen. In het tweede deel van hoofdstuk 4 wordt de vorm van de resonanties beter bekeken. Daarvoor hebben we een theorie gebruikt, die oorspronkelijk voor de beschrijving van verstrooiingsexperimenten van elektronen aan een Helium atoom is ontwikkeld. De lijnbreedte van de pieken blijkt zeer smal te zijn, wat duidt op een hoge kwaliteit van onze grote fotonische kristallen. De theorie maakt ook gebruik van een koppelingparameter q , die is gedefiniëerd als de verhouding tussen twee overgangswaarschijnlijkheden. Voor TM gepolariseerd licht wordt een omslag van het teken van de koppelingparameter q gevonden. Deze omslag van het teken betekent dat er een verandering is opgetreden in de fase van het licht in een van de twee interferentie kanalen. Een mogelijke verklaring kan zijn dat er een Brewster hoek bestaat voor de fotonische kristal plak. Als de hoek van het inkomende licht wordt verdraaid door de Brewster hoek heen, dan zal het teken in de directe weerkaatste lichtbundel omslaan. Het feit dat er een Brewster hoek zou kunnen bestaan voor een fotonisch kristal plak is een interessante ontdekking.

In hoofdstuk 5 onderzoeken we licht dat uit een optische puntbron komt, in een drie-dimensionaal fotonisch kristal wordt ingekoppeld en daar vervolgens doorheen beweegt om tenslotte aan de ander kant van het kristal weer te worden uitgekoppeld. Om de overdracht van dit licht te meten gebruiken we de NSOM. Voor verschillende frequenties wordt er een ruimtelijke afhankelijkheid van deze overdracht gevonden. Zo is voor hoge frequenties de overdracht groter, als het tipje boven een bolletje staat dan als het tipje zich tussen de bolletjes bevindt. Andersom komt voor lage frequenties meer licht door het kristal als de tip tussen de bolletjes is dan wanneer ze er bovenop staat. Als er zich een defect in het $\langle 111 \rangle$ oppervlak bevindt, dan wordt de lokale inkoppeling van het licht sterk beïnvloed. Het onderzoek laat zien, dat voor lage frequenties (behalve voor een frequentie in het verboden band) meer licht in het kristal kan worden gekoppeld. Voor hoge

frequenties, en ook voor de frequenties in het verboden band, wordt er minder licht ingekoppeld. De nabije-veld methode laat zien, dat zelfs defecten die in een paar lagen onder het oppervlak zitten nog een invloed op de koppeling hebben. Verder zijn er retractie- en naderingscurven voor verschillende frequenties gemeten. Ook daar zijn indicaties voor het effect van de eerste orde verboden frequentie band op de lichtkoppeling te vinden. Zo is voor een frequentie in het verboden band de afval van het nabije-veld twee keer langer dan voor andere frequenties. Bovendien laten Fabry-Perot oscillaties een grotere modulatie zien voor frequenties rond het verboden band; er wordt dus meer licht weerkaatst. De NSOM geeft nieuwe informatie over hoe het licht van een puntbron aan een drie-dimensionaal kristal koppelt.

In dit proefschrift zijn verschillende mogelijkheden beschreven om de optische eigenschappen van een fotonisch kristal te onderzoeken. Het locale meten van lichtvelden en de optische fase maken het mogelijk om verliezen en de effectieve brekingsindex van het materiaal te bepalen. Bovendien zijn er interferentie fenomenen zoals fase- singulariteiten en -sprongen onderzocht. Beide technieken, de locale nabije-veld methode en de ruimtelijk middelende verre-veld methode, zijn gebruikt om koppeling van licht met een fotonisch kristal te onderzoeken. Wij ontdekken, dat de koppeling naar resonante modi met een teken omslag van de koppelingparameter q kan worden verklaard met een soort Brewster hoek. Verder vinden we, dat de koppeling van licht uit een puntbron naar een drie-dimensionaal kristal niet alleen ruimtelijke afhankelijkheid heeft, maar ook van de optische frequentie afhangt. Deze koppeling wordt sterk beïnvloed als er een lokaal defect in het kristal is.