

Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft de resultaten van een onderzoeksproject op het gebied van tijds-opgeloste nabije-veld raster-scannende optische metingen (NSOM) gericht op het zichtbaar maken van de amplitude en fase van ultra-korte lichtpulsen terwijl zij zich voortplanten in fotonische kristal structuren.

De subtiele beïnvloeding van interferentie effecten is cruciaal in fotonische kristallen. Om deze reden hebben kleine variaties in de geometrie, al dan niet opzettelijk geïntroduceerd, een grote invloed op de voortplanting van ultra-korte lichtpulsen. Tegelijkertijd biedt het gebruik van pulsen met een hoge piekintensiteit de mogelijkheid om de niet-lineariteit van deze optische materialen te benutten voor nieuwe mogelijkheden om licht volledig optisch te manipuleren. Om deze redenen is het wenselijk om op een nanometer lengteschaal de lokale optische eigenschappen in de structuur zelf te onderzoeken. Om de dynamische interactie van licht met een fotonische structuur te begrijpen is karakterisatie van zowel amplitude als fase noodzakelijk. Doordat de relevante afmetingen kleiner zijn dan de golflengte van het licht zelf kan dit alleen worden gedaan door een scherpe probe met sub-golflengte afmetingen in de directe nabijheid van het sample te brengen. Wij hebben een dergelijke scanning probe techniek verbeterd om dynamische effecten binnenin fotonische structuren zichtbaar te maken op een sub-golflengte schaal. De aldus verkregen combinatie van optische en topografische informatie verheldert de invloed van de geometrie op de propagatie van licht. Vice versa geeft het meten van alle eigenschappen van het locale optische veld de mogelijkheid om de dielectrische eigenschappen en structuur van het fotonische kristal te karakteriseren. De toenemende interesse van onderzoekers in tijds-opgeloste studies op het gebied van de interactie van licht met fotonische (kristal) structuren wordt besproken in hoofdstuk 1 waar ook een overzicht van dit proefschrift wordt geschetst.

De eerste directe meting van femtoseconde pulsen terwijl ze propageren in een kanaal golfgeleider is beschreven in hoofdstuk 2. Met een taps toelopende optische fiber wordt het optische veld vlak boven een golfgeleider structuur met sub-golflengte nauwkeurigheid in kaart gebracht. De topografie van het sample wordt simultaan met de optische informatie gemeten met behulp van een “shear-force” hoogte-regelings systeem. Het plaatsen van de NSOM tezamen met het sample in één arm van een Mach-Zehnder interferometer maakt het mogelijk om de amplitude en fase van het locale optische veld direct zichtbaar te maken. Heterodyne interferometrische detectie van het interferentiesignaal wordt bereikt door middel van accousto-optische modulatie van de referentie bundel. In het experiment wordt gebruik gemaakt van vrijwel bandbreedte begrensde ultra-korte pulsen. Bovendien is een instelbare optische vertraging geïntegreerd in de referentie-tak van de interferometer om de temporele overlap tussen referentie en signaal puls te kunnen regelen. Op deze wijze definieert de lengte van het referentie-pad een referentie-tijd. Het resulterende interferentie-signaal wat wordt gedetecteerd bevat de locale amplitude en fase informatie van de puls terwijl deze propageert door de golfgeleider. Uit deze tijdsafhankelijke en fase-gevoelige metingen kunnen zowel de fase- als de groepsnelheid model onafhankelijk

worden bepaald. De gemeten snelheden komen goed overeen met de snelheden die theoretisch worden berekend met behulp van een effectieve index methode.

In hoofdstuk 3 worden experimenten op een complexere structuur gepresenteerd. In dit hoofdstuk volgen we pulsen terwijl ze propageren in een micro-resonator. Hierbij brengen we direct the resonator modi in ruimte en tijd in kaart. We nemen zwevingen tussen de verschillende modi waar, wat bewijst dat er sprake is van meerdere aangeslagen modi in de resonator. Onze tijds-opgeloste en fase-gevoelige methode geeft direct toegang tot de fase- en groepssnelheid in termen van hoeksnelheden voor de verschillende modi in de resonator. Door slim gebruik te maken van het optreden van zogenaamde fase-singulariteiten is het mogelijk om de koppel-constanten tussen de golfgeleiders en de resonator te meten.

In hoofdstuk 4 onderzoeken we de lokale meting van pulspropagatie in een kanaal golfgeleider in meer detail. Een analytisch model is ontwikkeld dat laat zien hoe de geobserveerde signalen kunnen worden geïnterpreteerd. De waargenomen lengte van de omhullende van de gemeten puls wordt verklaard met behulp van dit analytische model. De waargenomen verbreding van de puls kan worden toegeschreven aan groepssnelheidsdispersie (GVD) in de fibers die ongelijk van lengte zijn in de twee takken van de interferometer. Het model laat zien dat door het balanceren van de dispersieve media het mogelijk is om de groepssnelheidsdispersie lokaal te meten. Zelfs als de twee takken niet gebalanceerd zijn kan een referentie meting worden gebruikt om alsnog de GVD te meten. Hierdoor worden interessante effecten, zoals pulscompressie, pulsuitsmering en -vervorming, toegankelijk in de meting.

In hoofdstuk 5 onderzoeken we het gevolg van verscheidene modi die zich simultaan in onze modelstructuur voortplanten. Wanneer golfgeleider modi overlappen in het tijdsdomein worden interessante fase-patronen waargenomen. Fase-singulariteiten, die ontstaan door interferentie tussen verschillende modi, worden normaliter verwacht op equidistante afstanden gegeven door het verschil in propagatie-constanten van de modi. Maar in de gepulste experimenten verandert de afstand tussen de individuele singulariteiten niet alleen binnen één meting, maar is ook nog eens sterk afhankelijk van de referentie-tijd. Om deze observatie te begrijpen is het nodig om mee te nemen dat de pulsen die het interferentie-signaal genereren van vorm veranderen terwijl ze door een dispersief medium propageren. Dit impliceert dat de ruimtelijke verdeling van de fase-singulariteiten directe informatie bevat over de locale dispersiekenmerken van de structuur. In dezelfde meting worden simultaan de modeprofielen, golfvectoren, pulslengtes en de groepssnelheden gemeten van alle geëxciteerde modi in de golfgeleider. De combinatie van deze parameters met het ontwikkelde analytische model laat zien dat de unieke ruimtelijke fase-informatie inderdaad een directe maat geeft voor de groepssnelheidsdispersie van de individuele modes.

In hoofdstuk 6 volgen we, voor de eerste keer, snelle en langzame pulsen terwijl ze zich simultaan voortplanten in een zogenaamde W_3 fotonische kristal golfgeleider (PhCW). We nemen de excitatie van meerdere pulsen met verschillende mode-distributies waar. Voor de verschillende modi propagerend in de PhCW wordt de fase- en groepssnelheid bepaald. Specifieke modi vertonen een sterke vormverandering terwijl ze zich voortplanten als gevolg van een zeer sterke groepssnelheidsdispersie. Door middel van ons eerder gepresenteerde analytische model kunnen we de GVD berekenen voor de sterkst gedispergeerde mode. Door gebruik te maken

van verscheidene excitatie golflengtes is het mogelijk om het dispersiediagram te meten. Vergelijking met 2D FDTD simulaties laat zien dat een vlakke band zichtbaar is in het gemeten dispersiediagram. voor de bijbehorende optische frequentie zien we een complex gelocaliseerd veldpatroon dat behoort bij deze vlakke band. Beweging van dit licht veld is nauwelijks waarneembaar. Als er een groepssnelheid zou moeten worden toegekend, dan is deze minder dan $c/1000$ met c de snelheid van licht in vacuüm.

In hoofdstuk 7 vervolgen we het onderzoek naar de propagatie van licht in fotonische kristal golfgeleiders. Dit hoofdstuk laat zien hoe een fase-gevoelige NSOM kan worden gebruikt voor het simultaan meten van de eigenmode distributie en de bandenstructuur in een PhCW. Bloch modes, die bestaan uit meer dan één ruimtelijke frequentie, worden zichtbaar gemaakt in de PhCW. In de bandenstructuur zijn meerdere Brillouin zones zichtbaar ten gevolge van het vouwen van de zones. In de Brillouin zones is zowel positieve als negatieve dispersie zichtbaar. We laten zien dat de negatieve helling correspondeert met een negatieve fase-snelheid van een mode die echter een positieve groepssnelheid heeft. Op hetzelfde moment bepalen we voor elke individuele mode zichtbaar in de bandenstructuur de bijbehorende mode distributie. Een sommatie over alle modes die onderling op afstanden liggen overeenkomstig een integer veelvoud van de reciproke golf-vector geeft de Bloch mode. We zien dat de laterale modeprofielen voor Bloch harmonischen, gescheiden door de reciproke golfvector, verschillend is. Hoofdstuk 8 onderzoekt de koppeling tussen modi met grote verschillen in groepssnelheid. In de gemeten bandenstructuur zien we kruisende modes met een verschillende symmetrie en grote verschillen in groepssnelheid. We laten met een hoge ruimtelijke en temporele resolutie zien dat dit fenomeen geassocieerd is met een complex mode patroon dat volledig gelocaliseerd is in de eerste $25 \mu\text{m}$ van de fotonische kristal golfgeleider. Dit patroon blijft meer dan 3.5 ps bestaan nadat de excitatie puls is verdwenen. Dit gelokaliseerde en stationaire patroon houdt verband met een zogenaamde mini-stopband. Tenslotte zien we dat een aantal modi met verschillende symmetrieën continu worden geëxciteerd door dit gelokaliseerde licht veld.

De resultaten beschreven in dit proefschrift maken nieuwe ontwikkelingen mogelijk doordat het nu experimenteel mogelijk is om theoretische voorspellingen betreffende de voortplanting van korte pulsen in complexe (niet)lineaire dispersieve fotonische structuren te verifiëren. Onze tip-scannende techniek maakt het mogelijk om direct het functionele hart van een structuur te bestuderen met hoge ruimtelijke en temporele resolutie. In hoofdstuk 9 worden toekomstige onderzoeksrichtingen voor tip-scannende metingen van optische velden in complexe (niet)lineaire fotonische structuren gegeven.