

Abstract

A breakthrough in nonlinear fiber-optics and fiber based supercontinuum lasers has recently led to the development of a new breed of mid-infrared supercontinuum light sources. Unfortunately, the intensity of these light sources are severely dampened by Fresnel reflection loss due to the relatively high refractive index of the fiber-optic material, known as chalcogenide glass.

This thesis concerns itself with the development of a direct thermal nanoimprinting technique, aimed at patterning the surface of chalcogenide glass based optical components with broadband antireflective surface nanostructures, known as moth-eye structures, in the pursuit of reducing Fresnel reflection loss. The objectives of the thesis is to design and fabricate highly efficient moth-eye structures with antireflective properties in the mid-infrared spectral bands: 3.5–4.5 μm , 6–8 μm and 3–8 μm .

First, an analytical model for calculating the transmittance of a blank chalcogenide glass window is established and subsequently used to calculate a maximum transmittance improvement of $\sim 14\%$ and $\sim 22\%$ for the first and second imprint on an As_2Se_3 window. The diffraction grating behavior of imprinted surface textures is also analysed as the grating equation is used to derive the zero-order grating condition, defining the upper limit for the period of the antireflective patterns. Then, using a simulation-based approach, we conduct a study of the design and optimization of different antireflective moth-eye structures, where a parabolic shaped moth-eye structure is suggested to be the most promising moth-eye design. With pattern periods and structure heights between $p = 0.5\text{--}1.675\text{ }\mu\text{m}$ and $h = 0.5\text{--}1.675\text{ }\mu\text{m}$, the parabolic shaped moth-eye structure is predicted to produce excellent antireflection in the 3.5–4.5 μm band. A similar region is also identified for the 6–8 μm band.

By conventional deep-UV lithography and subsequent dry-etching process, a silicon master is fabricated containing hexagonal patterns of densely packed moth-eye structures, each pattern with a different sized period and height. Once inverted to a nickel mold and used to directly pattern the surface of As_2Se_3 windows, broadband antireflective properties are observed, with peak transmittance improvements between 12.2% and 13.28%. The method therefore demonstrates a fast and cost-effective way of transferring tailor-made antireflective patterns onto chalcogenide glass based components.

Utilizing the lithography post processing step thermal reflow during mold fabrication, a second iteration of moth-eye structures are fabricated with secant ogive-like profiles and higher packing densities. Once imprinted on the surfaces of As_2Se_3 windows, the surfaces demonstrate vastly improved antireflective properties, achieving an average transmittance improvement of 12.36% from 3.3–12% μm .

Applying the same method to imprint chalcogenide glass fiber end-facets, we see a 30% improvement in the transmitted power of a mid-infrared supercontinuum light source with a spectrum from 2.1–4.2 μm . Analysing the beam profile output by an imprinted photonic crystal fiber, there is no evidence that the imprint prevents coupling to the fiber core nor that it changes the shape of the beam profile, demonstrating that this nanoimprinting technique can also be used to deliver antireflective properties to fibers.

Dansk Resumé

Et gennembrug i ulineære lysledere og fiber baseret superkontinuum lasere har for nyligt ledt til udviklingen af en ny art af mid-infrarøde superkontinuum lyskilder. Intensiteten af disse lyskilder er dog svært dæmpede af Fresnel refleksionstab, grundet det relativt høje brydningsindeks i det optiske materiale, som fiberne er baseret på kaldet chalcogenid glas.

Denne afhandling omhandler udviklingen af en termisk nanoimprintningsmetode til direkte at præge overfalden på optiske komponenter baseret på chalcogenid glass med en bredbåndet antirefektiv overflade struktur, også kaldet møløje-struktur, med henblik på at reducere refleksionstabet. Målet for afhandlingen er, at designe og fabrikere yderst effektive møløje-strukturer med antirefektive egenskaber i de tre mid-infrarøde bøljelængdeområder: 3.5–4.5 μm , 6–8 μm and 3–8 μm .

Først udvikles en analytisk model til at beregne transmittansen af blanke chalcogenid glas vinduer, som derefter bruges til at bestemme den maksimale transmittansforbedredning ved struktureringen af den første og anden overflade på et As_2Se_3 vindue. Diffraktionen af de strukturerede overflader er også analyseret idet gitterligningen bruges til at udlede 0. ordens betingelsen, hvilket definerer en øvre grænse for perioden af de antirefektive mønstre. Ved brugen af simuleringer, udføres der herefter et studie af design og optimering af antirefektive møløje-strukturer, hvor en parabolisk møløje-struktur foreslås som værende det mest lovende design, da det forventes af en parabolisk møløje-struktur med mønster perioder og strukturhøjder mellem $p = 0.5\text{--}1.675\ \mu\text{m}$ og $h = 0.5\text{--}1.675\ \mu\text{m}$ er i stand til at producere fremragende antirefleksion i bøljelængdeområdet 3.5–4.5 μm . Et lignende område identificeres også for 6–8 μm bøljelængdeområdet.

Ved benyttelse af en konventionel dyb-UV photolitografi, efterfulgt af en tør-ættseproces, fremstilles en silicium master af sekskantede mønstre bestående af tæt-pakkede møløje-strukturer, hvert mønster med forskellig period og højde. Efter overførsel til en nikkel baseret støbeform, anvendes den til at præge overfladen på As_2Se_3 vinduer, hvorpå bredbandede antirefektive egenskaber observeres med en maksimal transmittansforbedring mellem 12.2% og 13.28%. Metoden demonstrerer derved en hurtig og omkostningseffektiv måde at overfører skræddersyede antirefektive strukturer til chalcogenid glas baserede komponenter.

Ved anvendelse af et litografisk efterbehandlingstrin kaldet termisk reflow under fabrikationen af støbeformen, fremstilles en 2. generation mere tætpakkede møløjestrukturer bestående af sekante ogive-lignende profiler. Ved prægning af As_2Se_3 baserede vinduesoverflader, demonstrerer der langt forbedrede antirefleksive egenskaber med en gennemsnitlig transmittansforbedring på 12.36% fra 3.3–12% μm .

Ved brug af den samme metode til prægning af chalcogenid glass fiber endefacetter, ses en 30% forbedring på den samlede transmitterede effekt af en mid-infrarød superkontinuum-lyskilde med et spektrum fra 2.1–4.2 μm . Ved analyse af stråleprofiludgangen på prægede fotoniske krystalfibre ses der derudover ingen tegn på at prægningen forhindrer kopling til fiberkernen, eller at det ændre stråleprofilens form, hvilket antyder, at denne nanoimprintningsmetode også kan anvendes til at overførsel af antirefleksive strukturer til fibre.