

Slutrapport

Bestämning av övre gräns för fibergitter vid höga temperaturer

Determining the ultimate limit of optical fiber Bragg gratings at elevated temperatures

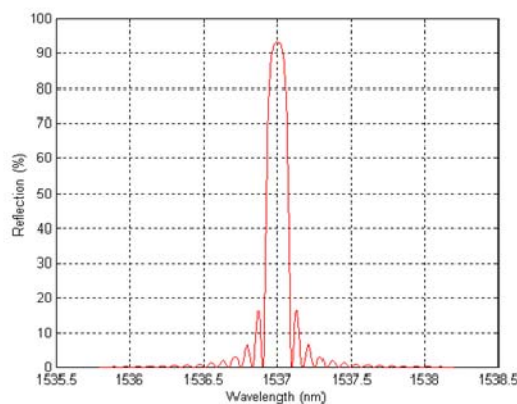
Abstract

Optical fiber sensors are attractive due to the small size of the optical fiber enabling embedding of the sensor with minimal influence on the external parameter to be measured. In addition optical fiber sensors enable optical readout (fast), multiplexing capabilities as well as being immune to electromagnetic interference and noise. Fiber Bragg gratings (FBGs) are wavelength dispersive devices functioning as highly wavelength specific filters, fabricated in optical fibers by exposure to intense ultraviolet (UV) light. By exposing the fiber using an interferometric setup a periodic refractive index perturbation can be created. Light in the fiber having a wavelength twice that of the refractive index modulation period, multiplied by the average refractive index of the glass, will resonantly interact with the structure, resulting in strong back reflection, i.e., Bragg reflection. This project targets optical fiber sensors and FBGs for high-temperature applications regarding their ultimate limit of stability. To better understand the underlying mechanisms that govern the stability, and ultimately their reliability, a system for material studies has been built enabling various experiments to be performed on optical fibers at elevated temperature. The central part of the project has been the development of a CO₂-laser based furnace resulting in minimal thermal gradients along the heated fiber. Beam shaping to provide a top-hat profile has been the main approach for heating, including multiple-beam exposure. Preliminary results show a significant improvement in comparison with traditional resistance furnaces, providing more possibilities and a much higher degree of control of experimental parameters.

1. Inledning

Bakgrund

Fiber Bragg gitter (FBG) är våglängdsselektiva optiska filter som tillverkas genom interferometrisk exponering av optiska fibrer med ultraviolet laser. Exponeringen resulterar i en periodisk förändring av brytningsindex i den vågledande kärnan där filtrets funktion bygger på resonans mellan det ljus som passerar det exponerade området och brytningsindex modulationen, och beror bl.a. på storleken och längden på indexförändringen. Ljus med en våglängd som motsvarar dubbla periodiciteten för brytningsindexmodulationen reflekteras, medan resterande ljus passerar förbi (exempel visas i Figur 1).



Figur 1 Reflektionsspektra från ett FBG med resonans vid våglängden 1537 nm

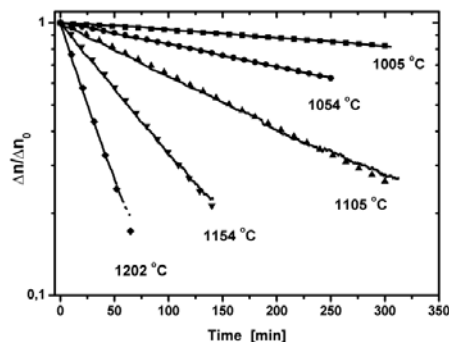
På grund av dessa filteregenskaper används FBGer inom telekommunikation för optisk filtrering, exempelvis för selektion av specifika våglängdskanaler i fiberoptiska nät. På senare år har FBGer även vunnit mark inom olika sensor-tillämpningar. Fördelar med fibersensorer är bl.a. (a) okänslighet mot elektromagnetiska störningar då fibern är gjord av glas, (b) med en fiberdiameter på $125 \cdot 10^{-6}$ m kan den med fördel vara inbäddad i det material som ska övervakas utan att påverka mätningen märkbart; (c) ett antal temperatursensorer kan vara distribuerade vid olika punkter längs med fiber.

Då både brytningsindex samt periodiciteten ändras med temperatur (pga. den termo-optiska effekten samt materialets expansionskoefficient) så kommer en temperaturförändring medföra att våglängden förändras. En temperaturförändring på $\Delta T = 1$ °C medför en våglängdsförändring på $\Delta \lambda \sim 10 - 15$ pm, vilket enkelt kan avläsas med olika typer av spektrumanalysator. FBGer påverkas på liknande sätt av töjning där våglängdsförändringen är på ungefär 1 pm/ μ strain.

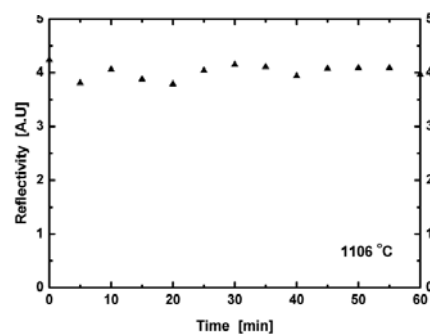
Den maximala temperaturen som vanliga FBGer tål utan att raderas ligger på mellan 300 - 600 °C. I detta projekt har vi arbetat med en speciell typ av FBG som utvecklats inom gruppen, så kallade kemiska fiber gitter, eller Chemical Composition Gratings (CCGer), som överlever temperaturer på över 1100 °C [1].

Chemical Composition Gratings

CCGer tillverkas genom en speciell behandling med vätgas, UV ljus samt värmebehandling och resulterar i en periodisk variation av koncentrationen av fluor (för fluor gitter) eller syre (för syre gitter) i kärnan. **Figur 2** visar exempel degradering av fluor- samt syre-CCGer vid olika temperaturer.



Figur 2 Termisk degradering av indexmodulation för fluor-CCG (ovan) samt syre-CCG (nedan)



Problembeskrivning

Även om de bakomliggande materialprocesser som orsakar en degradering av reflektansen är kända och framgångsrikt kan beräknas, är det flera egenskaper och begränsningar hos CCGer och optiska fibrer som vi inte känner till. Dessa obesvarade frågor kring CCGer bromsar tillämpningen och begränsat användningen av dessa gitter vid höga temperaturer. De huvudsakliga begränsningarna är:

- I. Brytningsindex modulationen hos CCGer har hitintills varit som mest $\Delta n \sim 10 \cdot 10^{-4}$, medan det potentiellt bör vara i storleksordningen $\Delta n \sim 10 \cdot 10^{-3}$.
- II. Vid långtidsmätningar vid *mellan-höga* temperaturer så uppvisar CCGer variation i våglängd som inte motsvaras av förändringen i reflektansen eller brytningsindex modulationen. Långtidsmätningar inom temperatur intervallet 700-800 °C visar mätavvikelse för temperaturen på -25 °C till +47 °C över en period på 5000 timmar.
- III. Tidigare experiment har visat att degradering av CCGer påskyndas om uppvärmning sker i inert atmosfär, vilket påverkar tillförlitligheten. Orsak till detta bör därför utredas.

Syfte och mål

Syftet är att förbättra förståelse om de bakomliggande processer som begränsar tillförlitlighet för CCGer och dess vid användning som sensorer vid höga temperaturer.

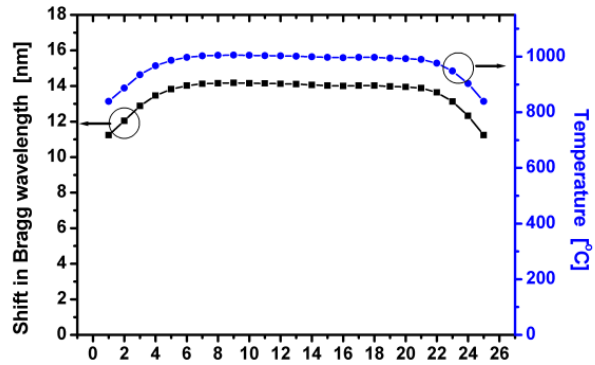
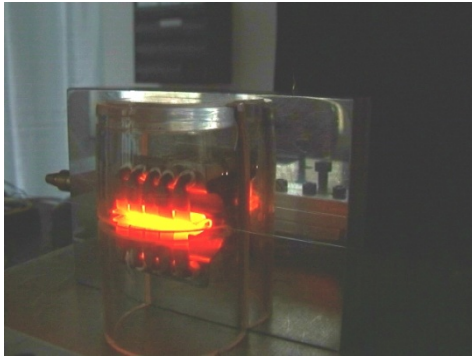
Målet är att utveckla ett ta fram en en högtemperaturugn och system för bearbetning och analys av optiska fiber och fiber Bragg gitter, för att göra möjligt systematiska materialstudier relaterat till tillförlitlighet samt övre gräns för fibergitter vid höga temperaturer.

2. Ugn och system för materialstudier på optiska fibrer för sensortillämpningar vid höga temperaturer

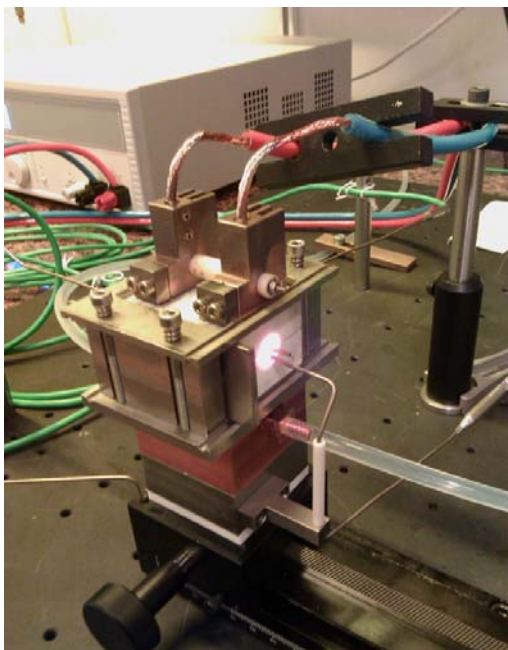
Högtemperaturugn

För material studier av optiska fibrer vid höga temperaturer samt tillverkning och analys av CCGer krävs mycket låg temperatur gradient längs den fiber som ska studeras. Dels beroende på att brytningsindex är temperatur beroende, men även då de flesta högtemperaturprocesser har Arrhenius liknande dynamik med exponentiellt temperaturberoende. Med större rör- eller box-ugnar kan jämn temperatur ofta uppnås. Nackdelen med dessa är bl.a. att fiberytan lätt kontamineras, vilket leder till försvagning samt eventuell kristallisering på ytan, samt att det är svårt att kontrollera tidsdynamik då uppvärmningen tar lång tid.

För att avgränsa längd på den fiber som värms upp utvecklades tidigare [2] en miniatyru gn där strömmen genom de enskilda värmeelementen kunde justeras för att minimera temperatur-gradienten eller variationer längd på 10-20 mm. Denna ugn visas i Figur 10, och uppnådde en temperatur gradient på ett par procent vid 1000 °C med möjlighet till snabb uppvärmning genom att fibern kunde föras in från sidan.



Figur 3 Miniaturugn för tillverkning av CCGer (från 2001, doktorandstudier-M. Fokine[2]).



Initiellt testades en prototyp för rör-ugn (Figur 4 t.v.) som bestod av ett 50 mm lång rör med en inner diameter på 1 mm. Max-temperatur för denna design var ~ 1300 °C.

Resultaten var dock sämre än tidigare modell, med större temperaturgradienter och krånglig hantering av fiber utan möjlighet till snabba temperatur ramper.

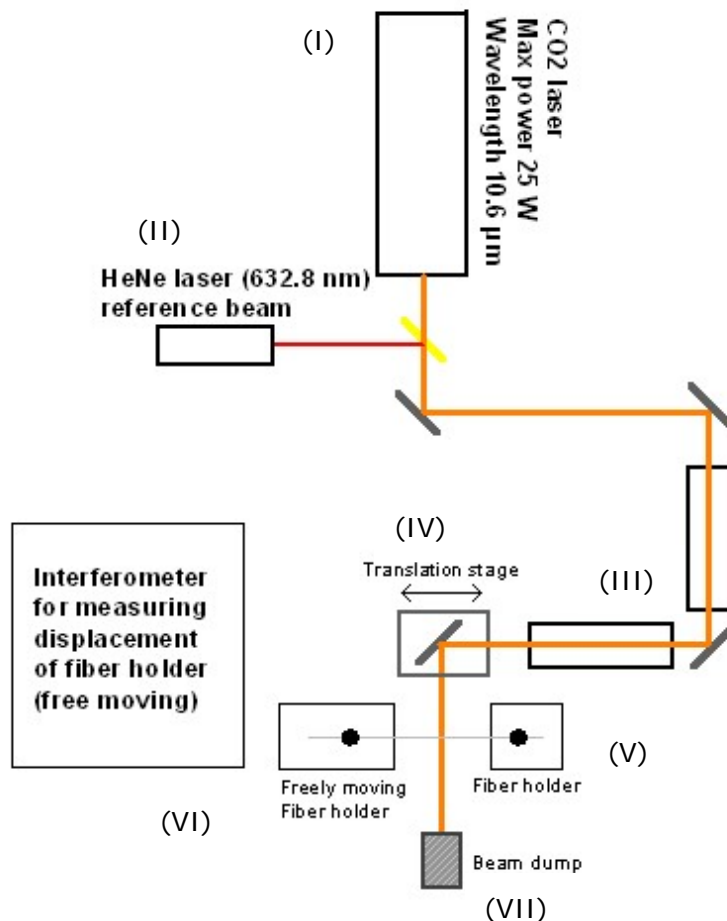
Den slutliga ugnen som utvecklades inom projektet är en CO₂-laser baserad ugn, där våglängden för CO₂-lasern är $\lambda = 10.6$ μm . Vid dessa våglängder har silika glass extremt hög absorption, vilket leder till snabb uppvärmning vid exponering. En av fördelarna med en CO₂-laser baserad ugn är bl.a. möjligheten till lokal uppvärmning (1 - 10 mm) av fibern med en temperatur rampning i storleksordning 4000 °C/s.

Figur 4 Prototyp av rör-ugn för användning upp till 1300 °C med en läng på 50 mm samt inner diameter på 1 mm.

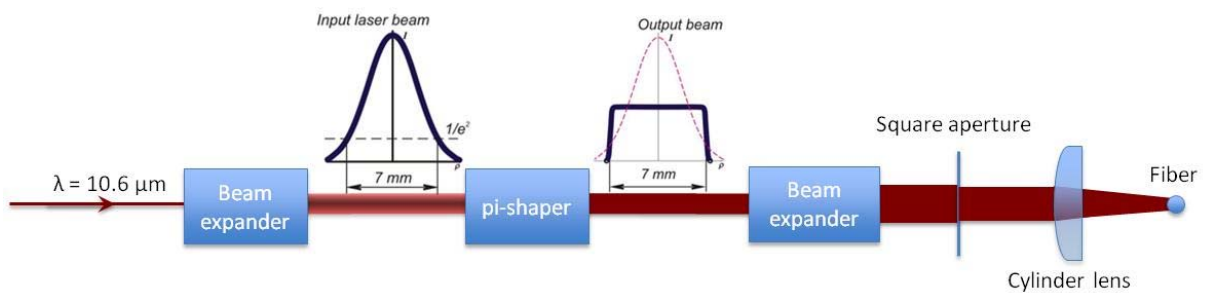
Schematisk bild över systemet

Ugnssystemet är uppbyggt av följande huvudkomponenter enligt Figur 6 nedan:

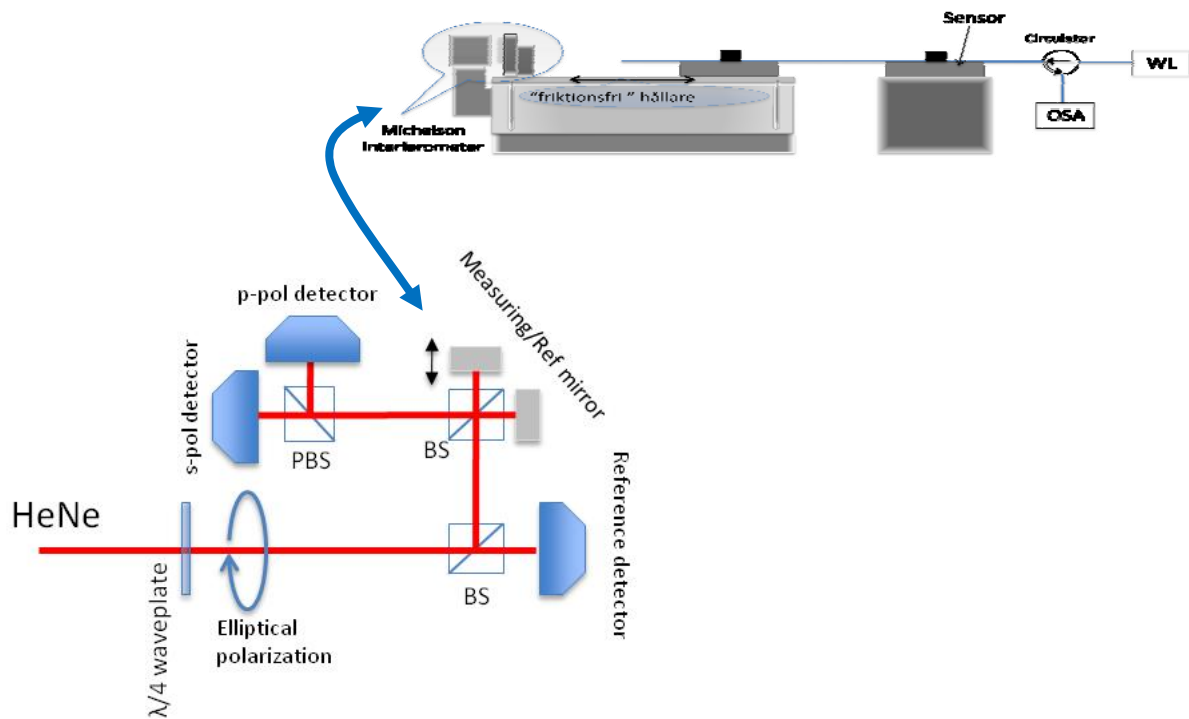
- I. CO₂-laser (P = 25 W, CV, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)
- II. Röd laser (He-Ne, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) som används som visuell guide för 10.6 μm .
- III. Beam-shaping för expanderande av strålen med top-hat profile (se Figur 7 & 8)
- IV. Förflyttning av spegel för att skanna strålen axiellt över fibern.
- V. Fiberhållaren med integrerad kraftsensor för mäta och justera dragspänningen på fibern.
- VI. Fiberhållare där fibern tillåts förflytta sig axiellt med minimal friktion och belastning under uppvärmning. En referensspegel på den friktionslösa hållaren utgör ena armen på en Michelson interferometer som fungerar som en högupplöst positionssensor (se Figur 9).
- VII. System för trippel-exponering av fiber samt stråldump för att blockera strålen (se Figur 10).



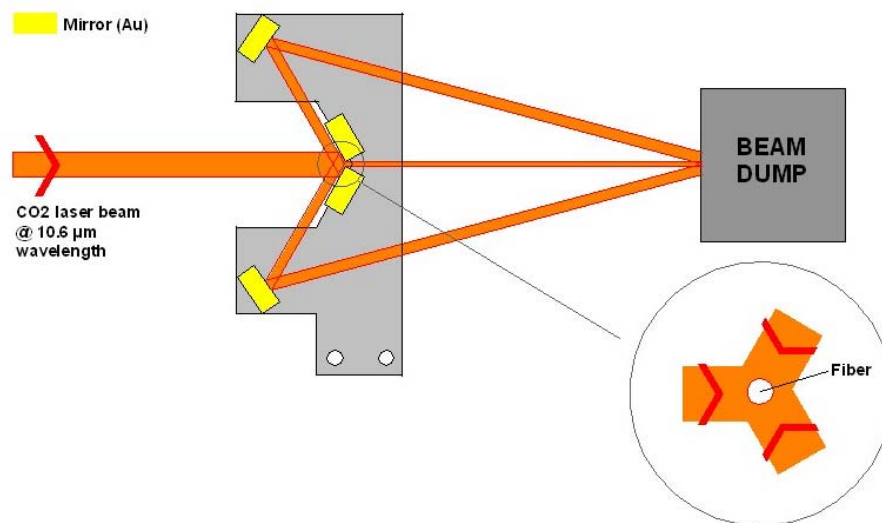
Figur 5 Layout av CO₂-laserbaserade ugn.



Figur 6 Beam shaper för att omforma strålens diameter och intensitetsprofil.



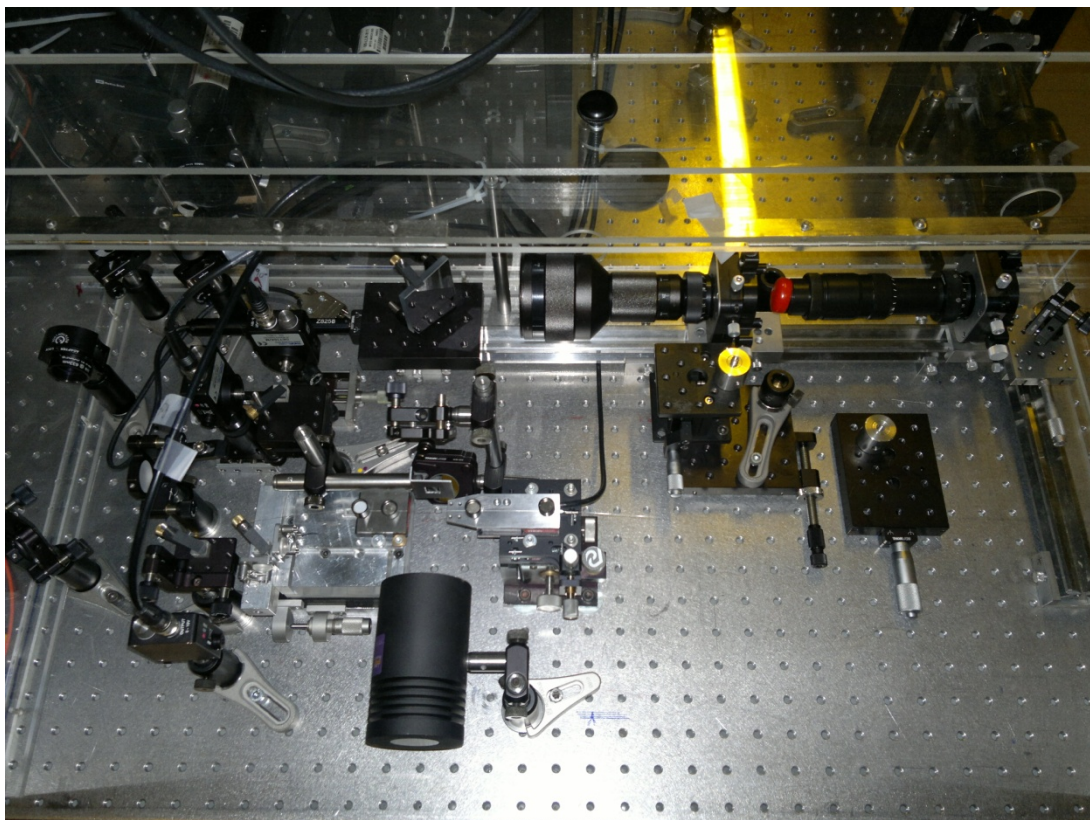
Figur 8 Fiberhållare där fibern tillåts förflytta sig axiellt med minimal friktion med referensspegel som utgör ena armen i en Michelson interferometer (nedre delen av bilden) för registrering av förändringar i fiberlängd/töjning.



Figur 9 System för att simultant exponera fibern från tre olika riktningar samt stråldump för att blockera strålen. Strålarna är symmetriskt separerade med 120°. Simulering med FEM modeller av detta visar en väldigt homogen temperaturfördelning över fibern.

3. Resultat

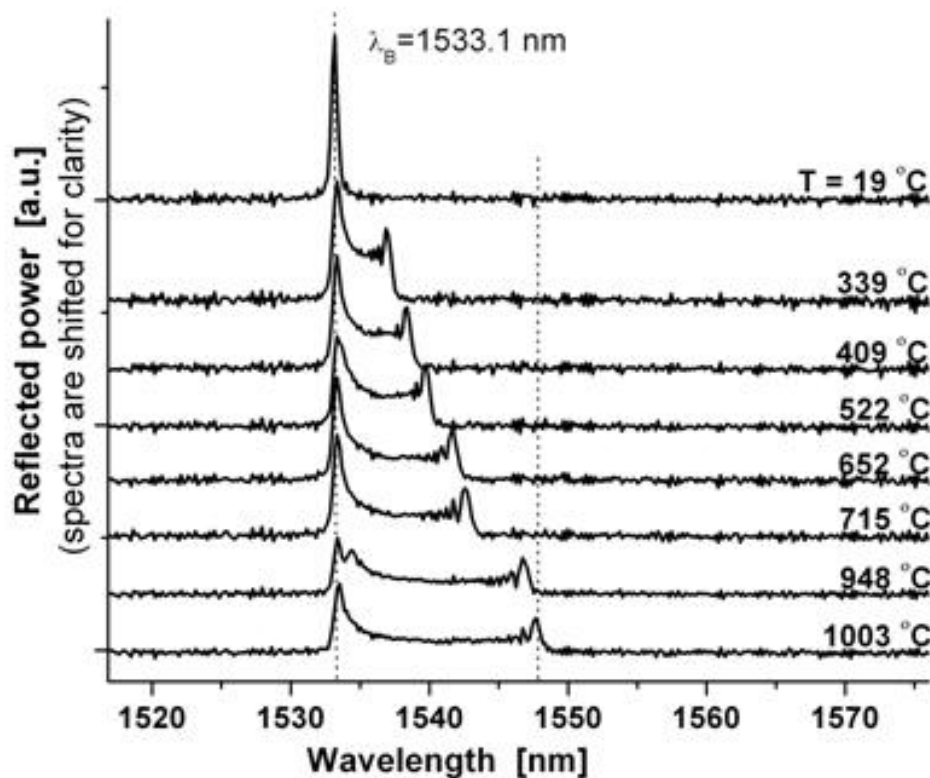
Systemet är nu sammansatt och fungerar, även om viss justering och karakterisering kvarstår. Figur 10, nedan, visar ett fotografi över uppställningen, förutom CO₂-laser, He-Ne laser, och första teleskopet för beam shaping som är placerade utanför skyddslådan.



Karakterisering och tester

För design och utvärdering av den CO₂-laser baserade ugnen har CCGer varit av central.

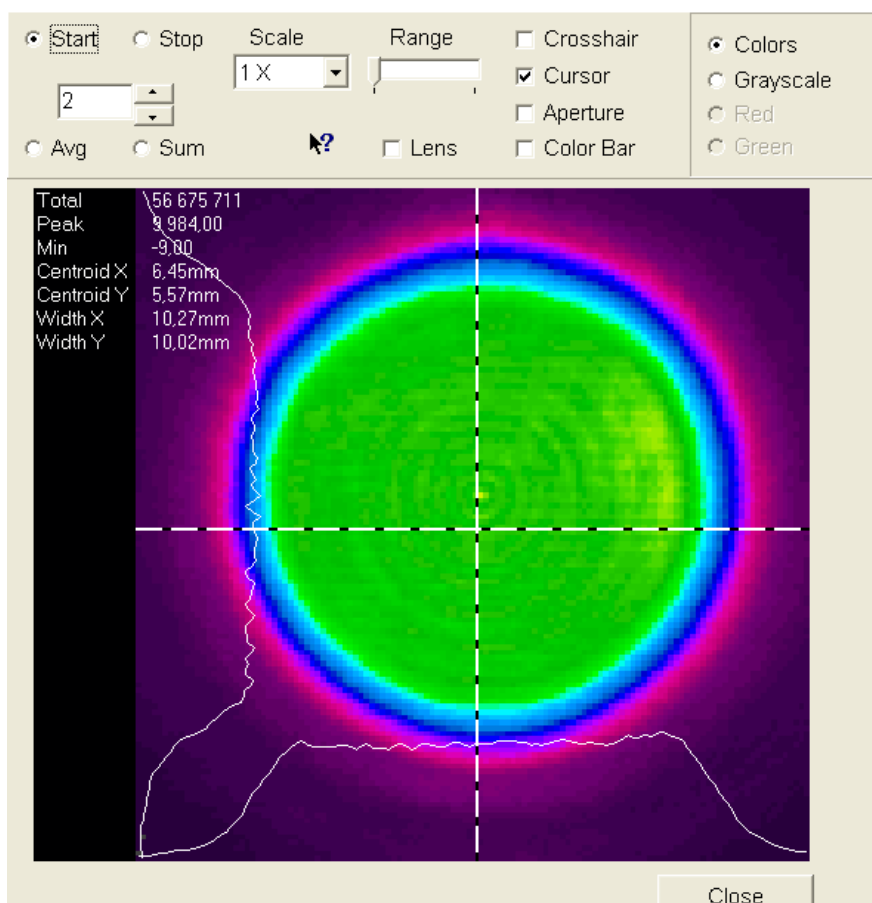
Som ett exempel på användning av CCGer för temperaturmätning visar Figur 5 den spektrala responsen från ett 12 mm långt CCG där cdel av gittret exponeras med 10.6 µm ljus från en CO₂-laser med varierande intensitet. Den Gaussiska strålens diameter är ~6 mm (1/e²). Då gittrets våglängd bestäms av materialets brytningsindex, vilket är temperaturberoende, förskjuts spekrat för den del av gittret som värms. De två topparna i reflektionsspektrat motsvaras av den del av gittret som inte värms upp, samt den del av gittret som värms upp.



Figur 7 Spektral respons från 12 mm långt CCG där 1 mm av dess längd värms upp genom CO₂-laser exponering, med ökande intensitet. Översta spektrumet visar reflektansen utan exponering, och följande spektra med ökande intensitet (indikerat med uppmätt temperatur).

På grund av förseningar med leverans av vissa delkomponenter för systemet, har fullständig karakterisering av temperaturprofil för expanderad stråle ännu ej utförts vid tiden för skrivandet. Preliminära resultat visar dock att radiella temperaturvariationer (för ej optimerad uppställning, samt utan trippel-exponering) är mindre än 4% vid ~1000 °. Figur 10, nedan visar ett exempel på intensitetsmätning av CO₂-laserstrålens tvärsnitt (diameter ~10 mm) efter tredje steget enligt Figur 7. Även om systemet ännu inte är fullt optimerat, överträffar den nya CO₂-laser baserade ugnen tidigare konventionella ugnar.

Detta har gjorts möjligt tack vare projektfinansieringen från Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse.



Figur 10 Exempel på intensitetsmätning av CO₂-laserstrålens tvärsnitt (~10 mm i diameter) efter tredje steget enligt figur 7.

4. Referenser

- [1] M. Fokine, "Underlying Mechanisms, Applications, and Limitations of Chemical Composition Gratings in Silica Based Fibers," J. Non-Cryst. Solid., 349, 98-104 (2004).
- [2] M. Fokine, "High temperature miniature oven with low thermal gradient for processing fiber Bragg gratings," Review of Scientific Instruments, 72 (8), pp. 3458-3461 (2001).