

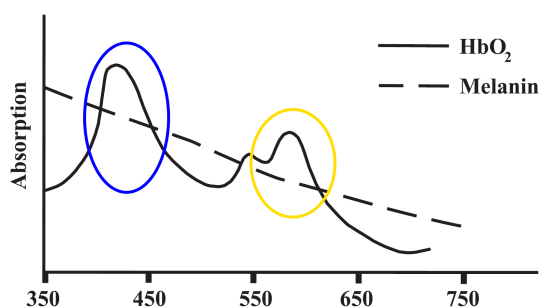
Gult laserlys

Af Morten Thorhauge og Jesper Mortensen, Advalight ApS

2010 er 50-året for den første laser. Vi giver i denne artikel en gennemgang af de forskellige typer gule lasere og deres brug. Desuden gives som eksempel en beskrivelse af et kompakt gult lasermodul udviklet i Danmark, baseret på sumfrekvensgenerering

Den første teoretiske beskrivelse af muligheden for stimuleret emission af lys blev foretaget af Albert Einstein i 1917 i hans afhandling "Zur Quantentheorie der Strahlung". Der kom dog til at gå næsten 40 år, før princippet for første gang blev brugt til at skabe forstærkning af elektromagnetisk stråling. Det var i 1958, hvor C. Townes konstruerede den første MASER – kort for Microwaves Amplified by Stimulated Emission of Radiation; en indretning der kunne forstærke et mikrobølgesignal via gennemløb af en eksiteret ammoniakgas. To år senere, i 1960, blev princippet udvidet til det optiske område, da T. Maiman lavede den første laser – Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation; en blitzlampepumpet rubinkrystal med en bølgelængde på 694,3 nm. Siden da er brugen af lasere blevet vidt udbredt i vores samfund. Som de mest åbenlyse eksempler kan vi nævne CD/DVD-afspillere, strekkodescannere og optisk fiberbaseret internet.

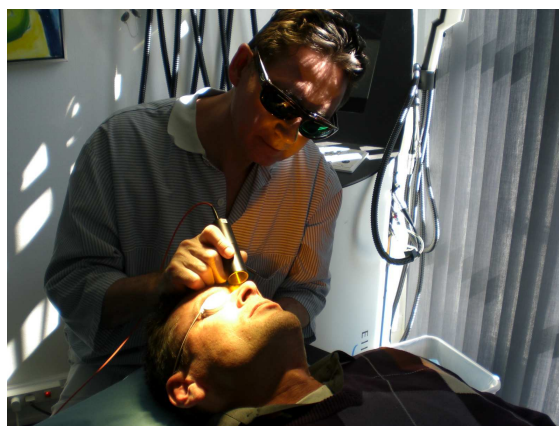
En anden anvendelse med stigende popularitet er det medicinske område. En laser er meget velegnet til at levere energi med høj præcision og på ellers svært tilgængelige steder grundet muligheden for levering med lyslederfibre. En anden måde lasere kan levere høj præcision på er via deres meget smalle spektralbånd. Forskellige molekyler i kroppen absorberer lys ved forskellige bølgelængder, og ved at vælge den rette bølgelængde kan man selektivt afsætte energien i en bestemt vævstype eller i et bestemt område, uden at det omkringliggende væv påvirkes.



Figur 1. Absorptionsspektre for hæmoglobin og melanin. Den blå cirkel indikerer blods absorptionstop omkring 418 nm, og den gule cirkel indikerer absorptionstoppen omkring 578 nm. Blåt lys (~410- 480 nm) bruges i praksis ikke til blodkarsrelaterede behandlinger idet dets indtrængningsdybde i huden er for kort.

Et eksempel herpå kan findes i dermatologien. Oxy-

generet hæmoglobin – HbO_2 – har eksempelvis en absorptionstop i det gule område, centreret omkring 578 nm, se figur 1, hvor blodets absorptionskurve er plottet sammen med kurven for melanin – pigmentet i hud. Da melaninabsorptionen er markant lavere end absorptionen i blod omkring 578 nm, kan man ved at bruge gule lasere selektivt afsætte energi i blodkar i underhuden uden at påføre det omkringliggende væv unødigt skadelige energipåvirkninger. Dette bruges i dermatologien til behandling af en lang række blodkarsrelaterede tilstande, såsom portvinspletter, edderkoppevener, røde strækmærker og karsprængninger. I figur 2 ses gul laser brugt i behandling. Et eksempel på behandlet resultat ses i figur 3, hvor gul laser er blevet brugt til fjernelse af karsprængning og modermærke.



Figur 2. Gul laser brugt i behandling i dermatologisk klinik.



Figur 3. Modermærke og karsprængning fjernet med gul laser. Der kan allerede konstateres en blegning efter bare én behandling.

Et andet anvendelsesområde for gult laser lys er astronomien. I dette tilfælde er det præcis bølgelængden 589,2 nm, det drejer sig om. For ved denne bølgelængde

har natrium en absorptionslinje. Netop natrium finder man i et tyndt lag i Mesosfæren i 90 kilometers højde over jorden. En laser med denne bølgelængde kan derfor danne en kunstig stjerne med veldefineret form, som så kan benyttes til at tage højde for de atmosfæriske forstyrrelser lyset fra rummet bliver udsat for på vej ned til jorden [1].

Teknologier

Der findes flere forskellige måder at frembringe laserlys på; i dag foretrækkes generelt faststoflasere, der som navnet antyder er baseret på faste stoffer. Dette er i modsætning til lasere, der er baseret på gas eller væsker. I dag er de fleste lasere i det synlige område faststof-baserede lasere, enten baseret direkte på halvlederlasere emitterende i det synlige område, eller også baseret på frekvensfordoblede faststoflasere; sidstnævnte er lasere i det nær-infrarøde område, hvor frekvensen af lyset er blevet fordoblet ved at sende strålen gennem en speciel ikke-lineær krystal.

Netop i det gule område har der dog altid manglet oplagte faststofbaserede løsninger, og der er først indenfor de seneste år kommet faststoflasere, der emitterer gult lys. Tidligere var gule lasere typisk enten farvestoflasere, hvor laseret var en alkohol hvori der var opløst et farvestof, det vil sige en væskebaseret laser, eller en kobberdampslaser hvor mediet denne gang var en gas (damp) af kobber. Men da både væsker og gasser er upraktiske at benytte, har man altid ønsket at udvikle teknologier hvor man kan lave gult lys baseret på faste stoffer.

Der er idag tre hovedtyper af faststoflasere i det gule område. Det er henholdsvis Raman-skiftede lasere, optisk pumpede halvlederlasere, og sumfrekvensgenererende lasere. Raman-skiftede lasere baserer sig på, at man ved en pumpet spredningsproces i en såkaldt Raman-krystal kan skifte en laserstråles bølgelængde. Skiftet er afhængig af krystaltypen, og til at lave gult lys benyttes f.eks. at skifte 1064 nm linien i en Nd-doteret laser op til ca. 1178 nm, hvorefter denne frekvensfordobles til 589 nm.

Optisk pumpede halvlederlasere er typisk kvantebrønds materialer, der er designet til at have en overgang omkring 1150-1180 nm. Denne emission frekvensfordobles efterfølgende. Da kvantebrønds materialer er designede til specifikke energiniveauer, giver denne teknologi stor fleksibilitet med hensyn til den eksakte bølgelængde. Den sidste hovedtype er de sumfrekvensgenererende (SFG) faststoflasere, som også danner grundlaget for forskningen hos Advalight ApS.

SFG-lasere til det gule område

Man behøver ikke lade sig nøje med et givent laseret materiale naturlige emissionlinier; gennem diverse ikke-lineære processer kan disse linier konverteres til andre bølgelængder. En type af disse

processer er generering af højere harmoniske. Disse processer omfatter blandt andet anden/tredje/fjerde-harmonisk generering (SHG/THG/FHG), samt sumfrekvensgenerering (SFG). SHG er også kendt som frekvensfordobling. Ved SFG blandes to forskellige bølgelængder, og resultatet bliver et felt med en fotonfrekvens, der er en lineær kombination af frekvenserne ($\propto 1/\lambda$) for de to indgående felter, se ligning (1).

$$\frac{1}{\lambda_{SFG}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \quad (1)$$

Effekten af processen kan beskrives ved ligning (2).

$$P_{SFG} = \eta P_1 P_2 \quad (2)$$

Her beskriver P_{SFG} den resulterende effekt, η er en koefficient beskrivende effektiviteten af processen, og P_1 hhv. P_2 er de indgående felters effekt. Generelt er η ret lille, derfor får man kun en praktisk brugbar konvertering hvis de indgående effekter er betragtelige. En måde hvorpå felternes effekt kan øges betragteligt er ved at lade laserne køre i korte pulser (såkaldt Q-Switched).

Ved Q-Switching ændrer man laserens resonansforhold således, at i stedet for en kontinuerlig emission afleveres al energien i korte, kraftige pulser. I det system, vi arbejder med, har pulserne en repetitionsfrekvens på 7,8 kHz, en længde på 50-70 ns og en peak effekt på 10-20 kW. Dette svarer til en kontinuert effekt i størrelsesordenen 5-7 W. Med disse størrelser er det muligt at opnå konverteringer fra de fundamentale, indgående felter og til SFG feltet på op til 35% i praktisk brug.

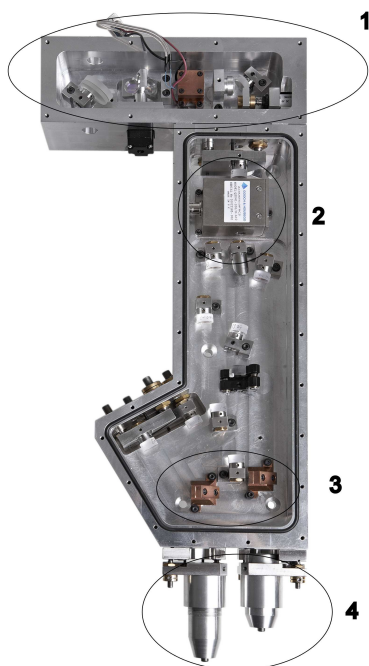
For at konstruere lasere til det gule område benyttes som oftest Nd-doterede laseret materialer – Nd:Host, hvor værtsmateriale (Host) typisk er en krystal af typen¹ YAG, YVO₄, GdVO₄, YLF eller YAP. Nd-atomet har emissionslinier i båndene 0,9 μ m, 1,0 μ m og 1,3 μ m; hvor den eksakte placering af emissionslinien afhænger af værtskrystallen. For Nd:YAG er de dominante linier 1064 nm og 1319 nm, hvilket muliggør at nå 589 nm via SFG – perfekt både til dermatologi og astronomi.

I vores lasersystem benytter vi Nd:YAG til generering af både 1064 nm og 1319 nm felterne. Vores implementation er et såkaldt endepumpet Diode Pumped Solid State (DPSS) lasersystem, hvor der benyttes laserdioder til at eksitere de primære laserkrystaller (Nd:YAG krystallerne). Nd:YAG har kraftige absorptionsbånd omkring 808 nm, så lys ved denne bølgelængde kan eksitere – også kaldet pumpe – de overgange i Nd-atomerne, der leder til emission ved 1064 nm og 1319 nm. Den eksakte emissionslinie bestemmes af resonansen af laserkaviteten, igen bestemt af egenskaberne af reflektionscoatingen på de spejle, kaviteten er opbygget af.

I en pulset (Q-Switched) laser benyttes en modulator – en såkaldt Q-Switch – til en periodisk modu-

¹YAG: Yttrium Aluminium Garnet (Y₃Al₅O₁₂); YVO₄: Yttrium OrthoVanadate; GdVO₄: Gadolinium OrthoVanadate; YLF: Yttrium Lithium Fluoride (LiYF₄); YAP: Yttrium Aluminium Perovskite (YAlO₃).

lering af laserkavitets resonans – basalt set moduleres kaviteten mellem en “On” og en “Off” tilstand. Man kan betragte modulationen af kaviteten som en tønne, der løbende fyldes med vand. Idet modulatorens skifter kaviteten til sin On-state svarer det til at slå bunden ud af tønden, der så i en kraftig udladning vil tømmes helt. Det viser sig dog, at tiden fra modulatorens skifter til sin On-state og til pulsen opbygges afhænger af de fundamentale emissionskonstanter for den pågældende energiovergang i det aktive atom. Det har derfor generelt været nødvendigt at benytte separate modulatorer for hver laserlinie, og elektronisk afstemme deres skiftetiming mod hinanden således at pulserne bliver synkroniserede. Hvis de ikke er synkroniserede vil den resulterende SFG effekt blive nul jvf. ligning (2). I Advalights system benytter vi derimod kun en enkelt modulator, men har i stedet afstemt pulsopbygningstiderne gennem design af kaviteterne og pumpeeffekter [2]. Dette medfører til at gøre lasermodulet både mere robust, billigere og mere kompakt. Se figur 4 og 5 for indre og ydre layout af et færdigt 2 Watt 589 nm lasermodul.



Figur 4. Indre layout af lasermodul indeholdende både 1064 nm og 1319 nm lasere. Cirklerne refererer til følgende: 1) SFG sektion med ikke-lineær krystal (i den kobberfarvede klods) og fokusoptik, 2) modulator (Q-Switch), 3) Nd:YAG krystaller (monteret i de kobberfarvede krystalholdere), 4) fokuseringsoptik for fiberkoblede, eksterne pumpe-lasere (de to sølvfarvede rør). Resten af komponenterne er spejlene, der udgør selve resonatorerne.



Figur 5. Komplet lasermodul. Modulet er ca. 35 cm langt og 15 cm bredt. Vægt ca. 6 kg.



Figur 6. Gult lys i laboratoriet.

Litteratur

- [1] H. Kjeldsen (2009), Astronomernes kæmpeteleskoper, *Kvant*, 2, pp. 7-13.
- [2] Pumped laser system using feedback to pump means, WIPO International Publication Number WO 2008/006371 A1.



Morten Thorhauge har en ph.d.-grad i biomedicinsk optik fra DTU. Han har været udviklingsingeniør hos Advalight ApS siden 2006.



Jesper Liltorp Mortensen har en ph.d.-grad i laserfysik fra DTU. Han har siden 2006 været udviklingsingeniør hos Advalight ApS.