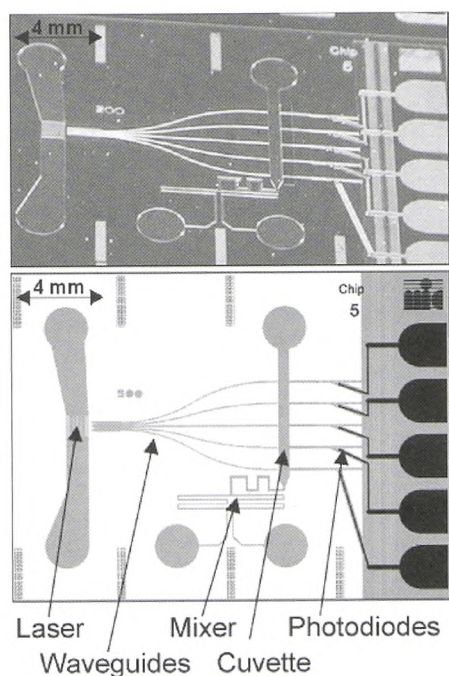


Polymer farvestoflasere til integration i lab-on-a-chip systemer

Søren Balslev, Brian Bilenberg, Jörg P. Kutter og Anders Kristensen, Institut for Mikro- og Nanoteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.

“Lab-on-a-chip” systemer [1] er tænkt som små chips, der kan udføre analyseopgaver, hvor man almindeligvis har brug for et laboratorium af normal størrelse. Disse chips vil kunne udføre kemiske og biologiske analyser hurtigere og billigere end i dag. En central udfordring i udviklingen af lab-on-a-chip systemer er at fabrikere laboratoriekomponenterne på meget lille skala på en måde, så man kan integrere dem på samme chip – helst i én arbejdsgang. Lasere er en af de komponenter, som ofte anvendes til analyser i laboratorier. På MIC – Institut for Mikro- og Nanoteknologi ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU), arbejdes der på at finde metoder til at integrere lasere i lab-on-a-chip systemer.



Figur 1. Eksempel på lab-on-a-chip system til absorptionsmåling designet og fabrikeret på MIC [2]. Systemet består af en laser-lyskilde med variabel laserbølgelængde, bølgeledere til at lede lyset rundt i systemet, en kuvette hvori absorptionen finder sted og fotodioder til at måle intensiteten af lyset, der har passeret igennem kuvetten.

Figur 1 viser et lab-on-a-chip system med integrerede optiske komponenter udviklet og fremstillet på MIC [2]. Systemet er designet til absorptions-spektroskopi på en væskeprøve. På chippen findes en laser-lyskilde med variabel laserbølgelængde, bølgeledere til at lede lyset rundt på chippen, væskekanaler hvor en væskeprøve kan blandes inden

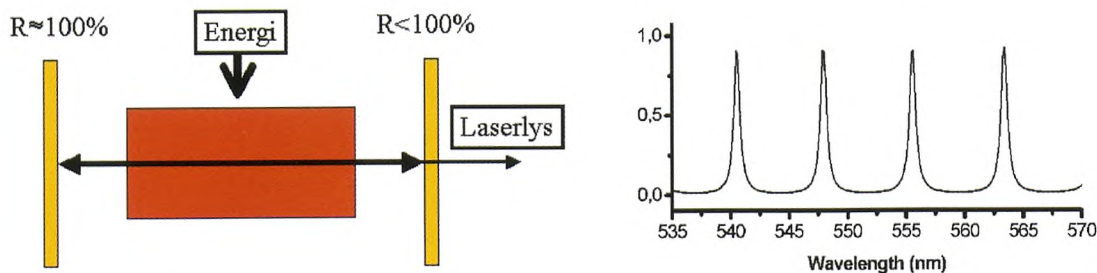
den sendes gennem en kuvette, hvori absorptionen måles, og endelig fotodioder til at måle intensiteten af lyset, der har passeret igennem kuvetten.

Det er ønskeligt at have integrerede lasere i lab-on-a-chip systemer, fordi man ellers er nødt til at koble lyset ind på chippen fra en ekstern lyskilde ved at opliniere chippen til optiske fibre. Opliniere af optiske bølgeledere er tidskrævende og svær at reproducere. Hvis en chip skal kunne udskiftes nemt og hurtigt f.eks. i et analyseapparat, er den optimale løsning derfor at integrere laseren på chippen.

En laser består grundlæggende af to spejle der vender mod hinanden og et medium mellem spejlene, som kan forstærke lys, figur 2. Det forstærkende medium skal have energi udefra, ofte i form af elektricitet eller lys, og kan forstærke lys over et bølglængdeområde der er bestemt af egenskaberne for mediet.

De to spejle, der vender mod hinanden, udgør en optisk resonator. En optisk resonator har den egenskab, at den tillader lys at blive fanget mellem spejlene i kort tid, men kun for en række af diskrete bølglængder – modes, se figur 2. Hvis det forstærkende medium kun forstærker lys fra én af de diskrete bølglængder, som understøttes af den optiske resonator, er der tale om “single mode lasing”. Single mode lasing er ønskelig til anvendelser, hvor man vil udnytte lysinterferens eller har brug for en høj grad af monokromatisme.

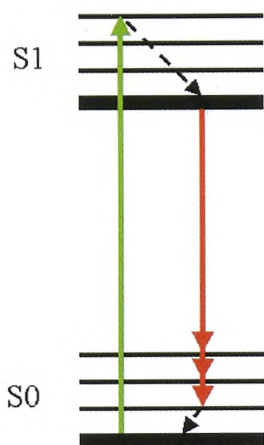
I mikrolaserne, som vi arbejder med på MIC, anvendes organiske farvestoffer som lysforstærkende medium. Figur 3 viser et simplificeret energi-diagram for de to laveste elektrontilstande i et organisk farvestofmolekyle. Til hver elektrontilstand hører et bånd, S_0 og S_1 på figuren, af vibrations- og rotationstilstande for farvestofmolekylet. Ved absorption af lys kan molekylet eksiteres fra grundtilstanden i S_0 til en højere liggende tilstand i S_1 (grøn pil). Molekylet henfalder dog hurtigt uden lysudsendelse til den laveste S_1 tilstand (sort stiple pil). Herfra er der mulighed for, at molekylet henfalder til en af de øvre tilstande i S_0 (rød pil), under udsendelse af lys, ved enten spontan eller stimuleret emission. Pga. vibrations- og rotationstilstandene kan henfaldet fra S_1 til S_0 resultere i udsendelse af lys i et bredt spektrum. Figuren illustrerer også det såkaldte Stokes-skift, hvor det udsendte lys har længere bølglængde (dvs. mindre fotonenergi) end det absorberede lys. Farvestoffet Rhodamin 6G kan således udsende lys med bølglængder mellem ca. 532 nm (grønt lys) og mere end 600 nm (rødt lys), når det



Figur 2. Venstre: Principskitse af laser bestående af to spejle og et forstærkende medium. Højre: Modes for resonator bestående af spejle med en indbyrdes afstand på $10\ \mu\text{m}$ illustreret ved transmissionen gennem resonatoren.

eksiteres vha. grønt lys med bølglængde $532\ \text{nm}$ fra en frekvensdoblet Nd:YAG laser.

Med standard mikrofabrikations-teknologi har vi fremstillet en mikrolaser opbygget på samme måde som den skematiske laser i figur 2. Laseren består af en væskekanal, hvori Rhodamin 6G opløsningen kan strømme. På kanalens bund og top er der i et lille område lagt et lag af krom og guld, der fungerer som spejle for laserresonatoren, figur 4.

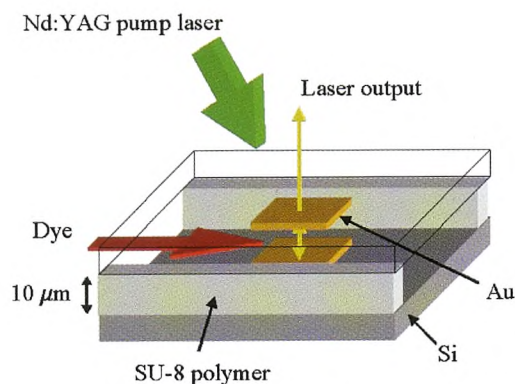


Figur 3. Simplificeret energi niveaudiagram for laserovergangen i Rhodamin 6G. Molekylet eksiteres til en højere tilstand i elektrontilstand S1, som henfalder uden lysudsendelse til den laveste tilstand før molekylet henfalder til grundtilstand S0. Henfaldet til S0 kan ske ved et helt bånd af bølglængder.

Efter kanalen er blevet fyldt med en opløsning af farvestof, typisk $1\text{--}100\ \text{mmol/L}$ af Rhodamin 6G i alkohol, eksiteres farvestoffet med lyset fra Nd:YAG laseren. Farvestoffet i laserresonatoren udskiftes kontinuerligt, idet farvestoffet pumpes gennem den $10\ \mu\text{m}$ dybe og $0,5\ \text{mm}$ brede væskekanal med ca. $10\ \mu\text{L/time}$. Laserlyset fra chippen udsendes vinkelret i forhold til chippens plan¹, og opsamles sædvanligvis med en optisk fiber, så det kan analyseres. Typiske spektra kan ses i figur 5.

Bølglængden, ved hvilken laseren begynder at lase, dvs. hvor forstærkningen lige netop overvinder tabene i

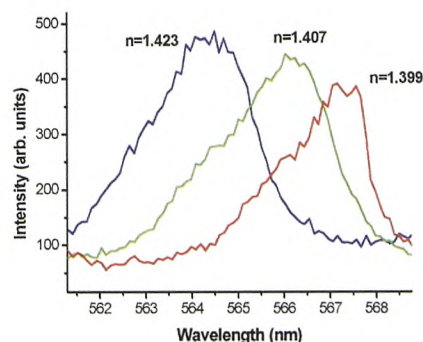
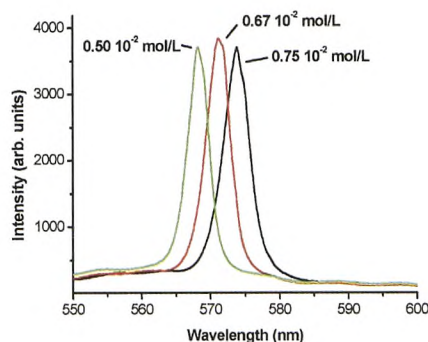
resonatoren, er bestemt af den bølglængde, hvor mediet forstærker mest, og af hvilke bølglængder, der tillades af den optiske resonator, jf. figur 2. Den endelige laserbølglængde vil være et kompromis mellem disse to bestemmende faktorer, hvilket vi har udnyttet til at modulere laserbølglængden for den beskrevne laser.



Figur 4. Skematisk illustration af mikrolaseren. Farvestofkanalen er $10\ \mu\text{m}$ høj og $0,5\ \text{mm}$ bred. Farvestoffet eksiteres vha. en Nd:YAG laser ($532\ \text{nm}$) gennem det øverste spejl. Kanalen er fremstillet i en foto-definerbar polymer, SU-8, og er forseglet med et lag af pyrex-glas.

Absorptions- og emissionsspektret for Rhodamin 6G er skitseret i figur 6. Har man et ensemble af farvestofmolekyler, vil ensembles lysforstærkning afhænge af antallet af molekyler i grundtilstanden og antallet i den eksiterede tilstand. Molekylerne i grundtilstanden vil absorbere lys, jf. absorptionspektret, mens molekylerne i den eksiterede tilstand vil kunne forstærke lys via stimuleret emission, jf. emissionsspektret. Kombinationen af absorption og stimuleret emission giver et resulterende forstærkningsspektrum, hvis præcise maksimum og form afhænger af, hvor mange af molekylerne der er eksiteret. Det vil sige; den bølglængde hvor forstærkningen er størst, afhænger af, hvor meget man eksiterer sine molekyler. Antallet af molekyler der befinder sig i ensemblet afhænger af, hvor koncentreret opløsningen af Rhodamin 6G er, og koncentrationen bestemmer derfor, hvor stor en andel af molekylerne der skal

¹Laseren på chippen i figur 1 er af et senere design, hvor lyset udsendes lateralt, i chippens plan.



Figur 5. Venstre: laserspektra for forskellige koncentrationer af Rhodamin 6G i alkohol. Højre: laserspektra for forskellige blandinger af alkohol og ethylen glykol (målinger fra multimode laser).

være eksiteret, før lasing indtræder. Således afhænger laserbølglængden af koncentrationen, som det er skitseret i figur 6. Med farvestoffet Rhodamin 6G kan laserbølglængden varieres mere end 30 nm ved at ændre på koncentrationen af farvestoffet.

Bølglængden ændrer sig også med opløsningsmidlets brydningsindeks. De bølglængder, λ_q , som den optiske resonator tillader, er givet ved

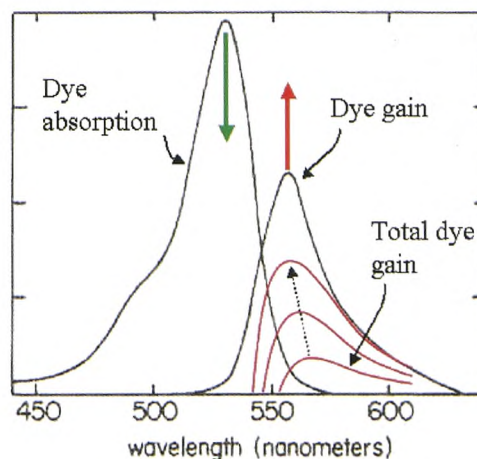
$$\lambda_q = \frac{2nL}{q+1}, \quad (1)$$

hvor L er resonatorlængden, n er brydningsindekset af mediet mellem spejlene og q er mode-nummeret. Bølglængden for et givent mode-nummer q , afhænger lineært af brydningsindekset mellem de to spejle. Brydningsindekset af opløsningsmidlet for Rhodamin 6G opløsningen bestemmer således den nøjagtige laserbølglængde, figur 5. Anvendes forskellige blandinger af alkohol, $n=1,33$, og ethylen glycol, $n=1,46$, viser det sig, at bølglængden for en mode kan varieres mere end afstanden mellem de forskellige modes.

Det har været kendt i mere end 30 år, at laserbølglængden i farvestof lasere afhænger af farvestofkoncentrationen. Men først ved anvendelse af lab-on-a-chip mikroteknologi, hvor små væskemængder kan blandes hurtigt og præcist, bliver dette princip praktisk anvendeligt til fremstilling af tunbare lasere. Ved at indbygge en mixer på chippen, er det muligt at variere farvestof-koncentrationen og brydningsindekset løbende - og dermed variere laserbølglængden kontinuerligt, mens laseren er i drift [3].

Således er tuning af en mikrofluid-farvestoflaser demonstreret uden at anvende bevægelige dele ud over væske i en kanal. Laseren fabrikere i en polymer, som også kan anvendes til at fremstille andre optiske og fluide komponenter. Laseren er derfor nem at integrere i lab-on-a-chip mikrosystemer. Der kan lægges flere lasere på den samme chip, som kan lase med hver sin bølglængde, for eksempel til brug i flow-cytometre. Fremstillingen af chipbaserede tunbare mikrolasere er

et eksempel på, at miniaturiseringen af makroskopiske apparater og komponenter ikke blot er en formindskningsproces, men kræver nytænkning og udnyttelse af de nye muligheder der opstår, når tingene bliver små.



Figur 6. Forstærkningsdynamik for ensemble af Rhodamin 6G. Det totale forstærkningsmaksimum går mod kortere bølglængde jo flere molekyler der er eksiteret, fordi absorptionen falder og den Stokes-skiftede forstærkning stiger.

Referencer:

- [1] Jonathan Knight (2002) "Honey, I shrunk the lab", *Nature*, bind **418**, august 2002, side 474-475.
- [2] S. Balslev, B. Bilenberg, O. Geschke, A.M. Jorgensen, A. Kristensen, J.P. Kutter, K.B. Mogensen, og D. Snakenborg (2004) "Fully Integrated Optical System for Lab-on-a-chip Applications", *Proc. 17th IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, MEMS 2004, Maartricht, The Netherlands, January 25-29, 2004.
- [3] B. Bilenberg, B. Helbo, J.P. Kutter and A. Kristensen (2003) "Tunable Microfluidic Dye Laser", *Proc. 12th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Transducers'03 Boston, MA, USA, June 8-12, 2003, side 206-209.

Artiklens forfattere vandt den ene af i alt tre posterpriser, som blev uddelt ved Dansk Fysisk Selskabs årsmøde 2003.



Søren Balslev er cand.scient. fra KU, har arbejdet to år i industrien og er nu i gang med et Ph.D- studie inden for polymer-farvestoflasere.



Brian Bilenberg (øverst th.) er cand.polyt. fra DTU, forskningsassistent ved MIC på DTU og har arbejdet med polymer-farvestoflasere i forbindelse med eksamensprojekt.



Jörg P. Kutter (nederst tv.) er Ph.D. og lektor ved MIC på DTU. Han er uddannet indenfor analytisk kemi og har arbejdet med kemiske mikrosystemer i de sidste otte år.



Anders Kristensen (nederst th.) er cand.scient. og Ph.D. i fysik fra KU. Han er lektor ved MIC på DTU, hvor han arbejder med nanoimprint litografi og polymer baserede lasere.

Fysik og kemi i fremtidens gymnasium

Styrkelse af det faglige niveau? Nye mål?

Dansk Fysisk Selskabs og Kemisk Forenings Sektioner for Uddannelse og Undervisning indbyder hermed til konference om **Fysik og kemi i fremtidens gymnasium** på Karlslunde Strand Kursus Center, **5.-6. februar 2004**.

Der er i oktober 2003 fremsat lovforslag om, at det danske, almene gymnasium skal reformeres kraftigt i 2005 – bl.a. forsvinder opdelingen mellem matematikere og sproglige. Gymnasiets overordnede formål skal være, *at forberede eleverne til videregående uddannelse*.

Der er ikke kun lagt op til strukturændringer, men også til ændringer i fagene og deres indhold. Således bliver FYSIK obligatorisk for alle (på såkaldt C-niveau), mens KEMI bliver et valgfag. Det fremhæves generelt, at *de naturvidenskabelige fag nytænkes med større vægt på fagenes almindelige dimensioner*, og specielt for fysik, at der skal ske *nytænkning af fysikundervisningen, såvel i indhold som tilrettelæggelse, så undervisningen på elementær vis kan præsentere væsentlige sider af naturvidenskabernes verdensbillede og samtidigt sikre samspillet med såvel andre naturvidenskabelige fag som med de humanistiske, samfunds- og kunstneriske fag*.

Det første halve år indføres for alle elever et *naturvidenskabeligt grundforløb*, som bl.a. skal give basis for elevernes valg af studieretning de sidste $2\frac{1}{2}$ år, og der indføres *almen studieforberedelse* gennem hele forløbet.

Formålet med konferencen er at få diskuteret fremtidens almengymnasiale fysik- og kemiundervisning samt konsekvenserne for de videregående teknisk/naturvidenskabelige uddannelser – og på dette grundlag at komme frem til kommentarer, anbefalinger og forslag fra Fysik og Kemi i Danmark.

Prisen for deltagelse er 1.450 kr inkl. fuld forplejning, og tilmeldingsfristen er 15. januar 2004. Yderligere oplysninger kan fås på www.nbi.dk/dfs og www.kemisk-forening.dk eller ved henvendelse til Erik Both, Institut for Fysik, DTU (4525 3151, both@fysik.dtu.dk), som også tager imod tilmelding via e-mail.