

Einsteins teorier bag udviklingen af laseren

Paul Michael Petersen, Afdelingen for Optik og Plasmaforskning, Forskningscenter Risø

Den kvantefysik som Einstein, Planck og Bohr formulerede i begyndelsen af 1900-tallet, er grundlaget for vor tids udvikling af laserteknologi. Lasersystemer anvendes i dag inden for optisk kommunikation, materialebearbejdning, medicinsk diagnostik og laserkirurgi, for blot at nævne nogle få teknologier der har påvirket vores hverdag. Einstein var den første til at beskrive de fundamentale vekselvirkninger mellem lys og stof som vi i dag benytter til at forklare laserens virkemåde.

Ordet *LASER* er en forkortelse af *Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation*. Laseren virker ved at lyset forstærkes ved stimuleret emission, og det var Einstein som i begyndelsen af 1900-tallet første gang indførte begrebet stimuleret emission. Han var i den periode optaget af at eftervise Plancks strålingslov for termisk hulrumsstråling. Einstein ønskede at etablere en generel sammenhæng mellem atomfysikkens love og Plancks strålingslov, begge nye og endnu dårligt forståede. For at få overensstemmelse mellem atomfysikken og strålingsloven indførte han i 1917 begrebet stimuleret emission [1]. Einstein udviklede således allerede i 1917 det teoretiske grundlag for laseren. Alligevel skulle der gå 43 år inden den første laser blev opfundet i 1960.

I denne artikel vil jeg beskrive nogle af de tanker som Einstein præsenterede i 1917, og herefter give et eksempel på et moderne diodelasersystem, der med fasekonjugeret optik udviser meget fine kohærensegenskaber. Lasersystemet, som er udviklet på RISØ, har forbedret de rumlige og tidslige kohærensegenskaber af diodelasere med høj udgangseffekt, og det har bevirket at disse ultrakompakte diodelasersystemer har fundet nye anvendelser. Fagudtryk er forklaret i en boks.

Det fysiske billede som vi i dag benytter for at forstå lysudsendelse og absorption, blev oprindeligt introduceret af Einstein i 1905 i hans forklaring af den fotoelektriske effekt. Einstein foreslog at elektronen ved lysexcitation får overført energien $E = h\nu$ af den absorberede foton. Fotonen overfører altså al sin energi til elektronen. I 1913 udvidede Bohr dette billede til at inkludere vekselvirkning med elektroner som er i forskellige energitilstande i atomet. Bohr foreslog at elektronen kun kan være i bestemte energitilstande, og at lys med en veldefineret foton-energi udsendes når elektronen "hopper mellem disse tilladte energitilstande. Bohr *postulerede* at der eksisterer stabile elektronbaner som udvælges ud fra kvantebetingelser. Når elektronen går fra en stationær tilstand med energien E_m til en anden stationær tilstand med energien E_n , udsendes der en foton med energien $E_m - E_n = h\nu$ hvor h er Plancks konstant, og ν er lysets frekvens. Derved

Ordforklaringer :

Kohærensegenskaber: Inden for laserfysik beskriver kohærens en korrelation mellem forskellige fotoner. Kohærens af lys giver anledning til, at lyset kan danne interferens. Hvis laseren udsender et spektrum af frekvenser er lyset kun delvis kohærent.

Populationsinversion: Tilstand for et 2-niveau system hvor der er flest partikler i det øvre energiniveau.

Diodelaser: En speciel type laser baseret på halvleder-materialer med en pn-overgang.

pn-overgang: En halvledersandwichstruktur bestående af p-lag og n-lag. En pn-overgang i en diodelaser giver et tyndt aktivt lag med populationsinversion.

Dotering: Tilsætning af fremmedatomer til et materiale hvorved de optiske og elektriske egenskaber af materialet ændres. F.eks. dotes halvledermaterialer for at fremstille n-type og p-type halvledermaterialer.

n-type halvleder: En n-type halvleder er doteret med fremmedatomer som giver ekstra elektroner

p-type halvleder: En p-type halvleder er doteret med fremmedatomer som giver tomme elektronpladser hvor der kan indfanges elektroner. De tomme elektronpladser kaldes huller.

Single-mode laser: Et lasersystem hvor udgangslaserstrålen kun indeholder én frekvens.

Diffraktionsbegrænset laser: Betegnelse for en laser, som kan fokuseres ned til den fundamentale mindste pletstørrelse. Fokuspletens diameter i denne grænse er sammenlignelig med lysets bølgelængde.

Fabry-Perot etalon: To parallelle delvist reflekterende spejle som kun tillader transmission af bestemte lysfrekvenser. Lyset som transmitteres er bestemt af interferensen af det lys som reflekterer mellem de to delvist reflekterende spejle.

Fasekonjugation: Generation af en laserstråle med bestemte faseforhold. Den fasekonjugerede stråle genereres ved at en laserstråle sendes ind mod et ikke lineært medium og der dannes en ny laserstråle som bevæger sig direkte tilbage mod den indkomne laserstråle.

Diode stripe array: En diode laser hvor der er anbragt et større antal elektroder ved siden af hinanden. Under hver elektrode opnås populationsinversion, og herved kan der opnås meget høje udgangseffekter.

fik Bohr forklaret de mange kendte, men hidtil uforståede, atomare spektrallinjer som konsekvenser af veldefinerede kvantetilstande.

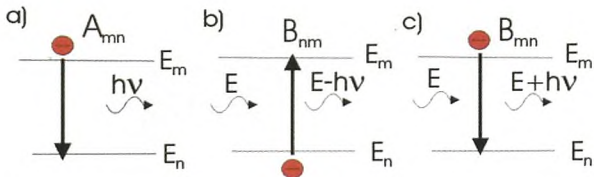
Denne udvidelse af det oprindelige billede af vekselvirkningen mellem lys og stof i den fotoelektriske effekt inspirerede Einstein til i 1917 at formulere nogle postulater om den fundamentale vekselvirkning mellem lys og stof. Disse fundamentale principper benytter vi i dag til at forklare laserens virkemåde. Einsteins teori

fra 1917 er en fænomenologisk kvanteteori. Idag er hans resultater logisk set en konsekvens af den moderne kvantemekanik som Schrödinger og andre formulerede ti år senere, inspireret af blandt andet Einsteins teori.

Einstein beskriver i sin artikel fra 1917 tre grundlæggende måder hvorpå lys kan vekselvirke med et molekyle:

- a) spontan emission,
- b) absorption samt
- c) stimuleret emission.

Disse tre processer er vist i figur 1. Einstein antager at stoffet kan være i to kvantetilstande, Z_n og Z_m , med energierne E_n og E_m hvor $E_m > E_n$.



Figur 1. De tre grundlæggende måder hvorpå lys kan vekselvirke med et molekyle: a) spontan emission, b) absorption samt c) stimuleret emission.

I figur 1(a) er processen for spontan emission vist. Spontan emission af en foton sker når en elektron i en anslået tilstand med energien E_m henfalder til en tilstand med energien E_n . Sandsynligheden dW for at en sådan fotonudsendelse sker i tidsintervallet dt , er givet ved

$$dW_{sp} = A_{mn}dt. \quad (1)$$

Dette henfald sker helt uafhængigt af tilstedeværelsen af ydre felter, og ligning (1) er analog til loven for radioaktivt henfald. Sandsynligheden for lysudsendelse ved spontan emission i tidsintervallet dt er udelukkende afhængig af tidsintervallets længde, og proportionalitetskonstanten A_{mn} kaldes Einsteins A -koefficient for spontant henfald.

Absorption af en foton, som er vist i figur 1b), sker når stoffet belyses. Elektronen vil ved denne proces blive exciteret fra tilstanden E_n til E_m . Hvis strålingen har energispektraltætheden ρ (strålingsenergi pr. volumenenhed pr. frekvensinterval), vil sandsynligheden for at denne excitation sker i tidsintervallet dt , være:

$$dW_a = B_{nm}\rho dt. \quad (2)$$

Den tredje form for vekselvirkning mellem lys og stof kaldes stimuleret emission, og Einstein beskrev denne proces ved at tilstedeværelse af lys muliggør en overgang $Z_m \rightarrow Z_n$. Sandsynligheden dW for at denne proces sker i tidsintervallet dt , er:

$$dW_e = B_{mn}\rho dt \quad (3)$$

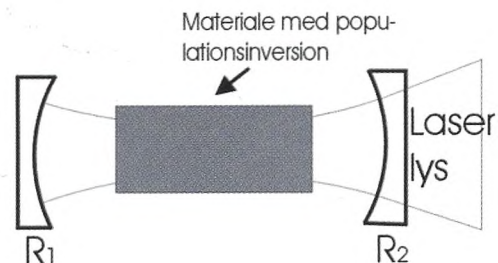
hvor B_{mn} er Einsteins B -koefficient for stimuleret emission. Ved at betragte de fundamentale processer i termisk ligevægt kan man vise at $B_{mn}g_m = B_{nm}g_n$, hvor

g_m og g_n er antallet af kvantetilstande med energiniveau henholdsvis E_m og E_n . Ligning ?? beskriver at tilstedeværelsen af strålingen får molekylet til at skifte energiniveau fra E_m til E_n . Ved stimuleret emission udsendes en foton som er i samme tilstand som strålingen der stimulerer udsendelsen, og herved forstærkes strålingen af stoffet. Denne lysforstærkningsproces er den altafgørende fundamentale mekanisme for dannelse af laserlys.

Einstein kunne ud fra ligningerne (1-3) have opfundet laseren, men kom ikke ind på anvendelser i artiklen fra 1917. Han var ellers meget interesseret i anvendt fysik, og udtog senere mindst 15 patenter, på bl.a. et høreapparat, et gyro-kompas og forskellige idéer til et lydløst køleskab til husholdningsbrug [A. Pais, "Subtle is the Lord... (Oxford University Press, 1982) side 313 og kapitel 29]. Men i artiklen fra 1917 var han jo ved at formulere ny grundvidenskab. I det følgende vil jeg vise hvorledes man nemt ud fra hans ligninger kan beskrive den forstærkningsproces som forekommer i en laser. Af ligningerne (1-3) fås at ændringen i energispektraltætheden er givet ved:

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho B_{nm}(N_m - N_n)s(\nu)h\nu + A_{mn}N_ms(\nu)h\nu \quad (4)$$

hvor $s(\nu)$ beskriver spektralfordelingen af de absorberede eller udsendte fotoner [2,3], og hvor N_m og N_n er antallet af molekyler pr. volumenenhed i energitilstanden E_m og E_n . Man har i ligning ?? endvidere antaget at $g_m = g_n$. Ud fra ligning ?? kan man bestemme hvorledes lysets energispektraltæthed ρ ændrer sig inde i stoffet. Det første led i ligningen svarer til stimuleret emission minus absorption; det andet led svarer til den spontane emission. Spontan emission har betydning for en række fundamentale forhold i laseren som f.eks. laserlysets liniebredde, hvorimod det første led er ansvarligt for forstærkningen af laserlyset. Det ses at hvis $N_m > N_n$, sker der forstærkning, og når denne betingelse er opfyldt, siger man at der forekommer populationsinversion. Populationsinversion kan ikke forekomme i termisk ligevægt. Det er nødvendigt at man har exciteret stoffet, således at der er flere elektroner i det øvre laserniveau end i det nedre laserniveau. Denne excitation af stoffet kan ske ved at man pumper stoffet optisk eller elektrisk.

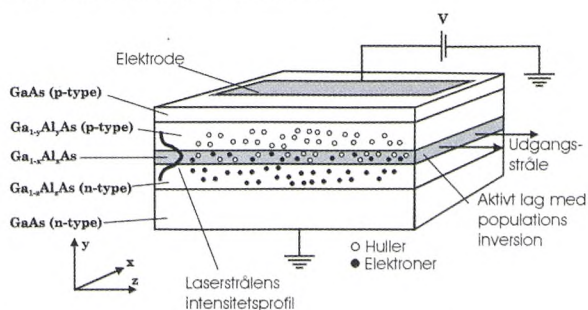


Figur 2. Den lineære laserresonator som består af et materiale med populationsinversion og to spejle med refleksionskoefficienterne R_1 og R_2 .

Når populationsinversionen er indtrådt, har man skabt en forstærker som er i stand til at skabe meget høje lysintensiteter hvis materialet med populationsinversion anbringes i en optisk resonator. Dette er vist i figur 2 hvor den optiske forstærker er anbragt mellem to spejle der reflekterer lyset. Lyset sendes frem og tilbage gennem samme område i lysforstærkeren, og herved opbygges der en meget høj lysintensitet inde i resonatoren. Laserresonatoren konstrueres ofte således at refleksionskoefficienten R_1 for det ene spejl er 100 %, og udgangsstrålen dannes ved at lyset sendes igennem det andet spejl som er delvist transmitterende (refleksionskoefficienten R_2 er mindre end 100 %).

Einstein var således den første der opdagede de grundlæggende principper bag laserens virkemåde. Men alligevel skulle man helt frem til 1960 før Theodore Maiman lavede den første laser. Det var en rubinlaser som udsendte rødt lys ved hjælp af stimuleret emission i en rubinkrystal (Cr-doteret Al_2O_3 -krystal). De første lasere var kæmpestore, og det begrænsede deres anvendelse til laboratoriebrug. Udviklingen i dag går mod mere og mere kompakte lasersystemer. En af de mest anvendte lasere i dag er den ultrakompakte diodelaser som vi kender fra laserpickuppen i en cd-afspiller. Fordelene ved disse halvlederlasere er at de har en meget lang levetid (10.000-100.000 timer), samt at de forskellige halvledermaterialer giver mulighed for laserlysudsendelse ved en lang række forskellige bølgelængder i det blå, røde og infrarøde spektrum.

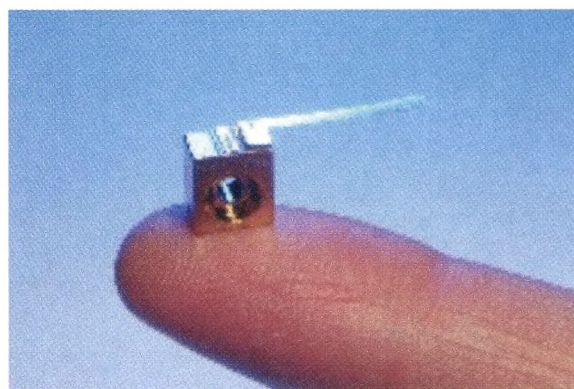
En typisk opbygning af en $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ diodelaser er vist i figur 3. Diodelaseren er en meget simpel laser, idet resonatoren kan dannes meget enkelt ved at kløve krystallens endeflader. Når en spænding på nogle få volt påtrykkes dioden, vil elektroner fra n-type området, som vist i figur 3, trænge ind i p-type området, og huller fra p-type området vil trænge ind i n-type området, og herved opstår der et ca. $1 \mu\text{m}$ tyndt aktivt område hvor der er populationsinversion. I dette tynde aktive område forstærkes lyset til laserlys som sendes frem og tilbage mellem de kløvede endeflader.



Figur 3. En $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ diodelaser med populationsinversion i overgangen mellem n-type halvleder og p-type halvleder. Laserkavitetsens to spejle udgøres af halvlederkrystallens naturligt kløvede endeflader.

Der sker i disse år en rivende udvikling inden for diodelasere. I figur 4 er vist et ultrakompakt diodelasersystem som er udviklet på Ferdinand-Braun Institut für Höchstfrequenztechnik i Berlin. Single-mode diodelasere med

veldefineret frekvens og veldefineret udbredelsesretning (gode kohærensegenskaber) har indtil for få år siden kun haft en relativt lille udgangseffekt, hvilket har begrænset diodelaserens anvendelse. Udviklingen er gået mod at øge disse lasersystemers udgangseffekt ved enten at øge forstærkningsområdets laterale udstrækning (x-aksen i figur 3) eller ved at anbringe flere diodelasere i et array ved siden af hinanden. Herved har disse lasere fået høje udgangseffekter på op til 10-20 W, men desværre er der kommet en række uønskede sideeffekter: Laserne har dårlige laseregenskaber fordi laserne svinger i mange rumlige og tidslige modes, og herved mister laserlyset sine fine kohærensegenskaber. Dette forhold har bevirket at disse diodelasere ikke har kunnet bruges til en lang række anvendelser som kræver høj udgangseffekt.

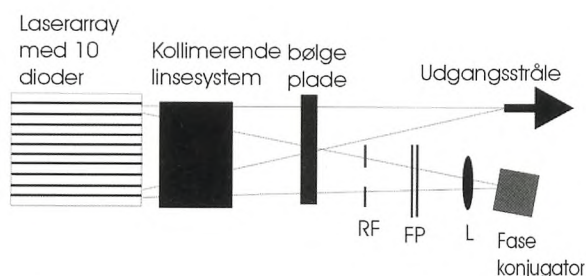


Figur 4. En ultrakompakt diodelaser udviklet på Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik i Berlin. Disse kompakte diodelasersystemer har i dag meget høj udgangseffekt. Laserens aktive område er typisk $1 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$.

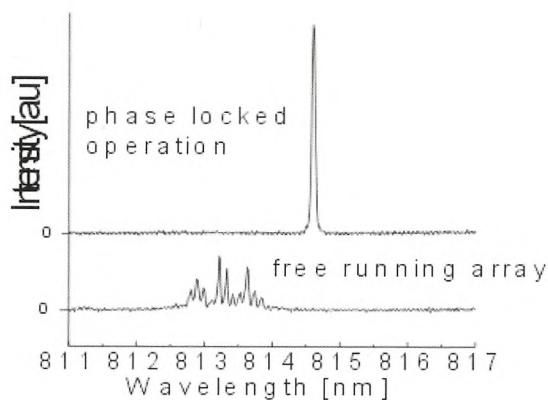
På RISØ har vi de sidste fem år arbejdet på at løse disse problemer. En vigtig nyskabelse har været konstruktion af et højeffekt single-mode diodelasersystem med tilbagekobling fra fasekonjugerede spejle. Disse fasekonjugerede spejle er baseret på optisk ulineære materialer. Når en lysstråle sendes ind mod et sådant ulineært fasekonjugerende medium, genereres en ny stråle, den fasekonjugerede stråle, som bevæger sig direkte tilbage mod den indfaldende lysstråle. Når lyset fra en diodelaser sendes ind i en fasekonjugator, vil lyset fra konjugatoren blive sendt tilbage til de aktive områder med populationsinversion i diodelaseren. Dette har vist sig at være en meget effektiv måde til at forbedre diodelaserens kohærensegenskaber.

Lasersystemet består af ti GaAlAs halvlederlaserelementer som tilkøbes et nyudviklet fasekonjugeret tilbagekoblingssystem. Tilbagekoblingssystemet indeholder en fasekonjugator, en såkaldt Fabry-Perot etalon, samt et rumligt filter. En Fabry-Perot etalon er en tynd glasplade som er i stand til at udvælge én bestemt lysbølgelængde. Med det nye tilbagekoblingssystem er det lykkedes at få alle ti laserelementer til at svinge med præcis samme frekvens og fase, samt at samle alle laserstrålerne i én kraftig diffraktionsbegrænset laserstråle. Diffraktionsgrænsen an-

giver den fundamentale grænse for hvor lille en fokusplet der kan opnås. Herved har man konstrueret et diodelasersystem med høj effekt og meget fine kohærensegenskaber. Forbedringen af kohærensegenskaberne betyder f.eks. at laserstrålen fra det nye lasersystem kan fokuseres ned til en meget lille pletstørrelse som er sammenlignelig med lysets bølgelængde. Det forventes at det nye lasersystem vil føre til helt nye anvendelser inden for laserbearbejdning, biomedicinsk optik, samt optisk kommunikation. En foreløbig version af lasersystemet er benyttet til kræftbehandling ved Lund Universitetshospital [4]. Forsøgsopstillingen er vist skematisk i figur 5. Et GaAlAs laser diode array med ti diodelaser-elementer får sendt lys tilbage fra det nyudviklede tilbagekoblingssystem. Systemet fase- og frekvens-låser de ti laserdioder, således at det samlede lasersystem udsender laserlys med én enkelt frekvens. De optiske frekvensspektre for lasersystemet uden tilbagekobling (free-running array) samt med tilbagekobling (phase-locked operation) er vist i figur 6.



Figur 5. Lasardiodearray med ti GaAlAs diodeelementer tilkoblet et tilbagekoblingssystem med en BaTiO₃ fasekonjugator, en Fabry-Perot etalon (FP) og et rumligt filter (RF).



Figur 6. Optiske bølgelængdespektre for lasersystem uden tilbagekobling (free running array) samt lasersystem med tilbagekobling (phase locked operation).

Som det fremgår af figur 6, samles en meget stor del (> 80%) af den samlede lyseffekt i enkelt-frekvens-laserstrålen. Vi har endvidere vist [5] at hvis man udskifter Fabry-Perot etalonen i figur 5 med et optisk gitter, kan man opnå et lasersystem hvis bølgelængde kan ændres kontinuerligt fra 800 nm til 820 nm.

Den videre udvikling af dette lasersystem på RISØ går mod at integrere tilbagekoblingssystemet i laser-materialet. Lykkes det, vil man have en ultra kompakt højeffektdiodelaser med fine kohærensegenskaber.

Konklusion

Det var Einstein der som den første i 1917 beskrev de grundlæggende principper for laseren. På det tidspunkt var han ikke klar over at de kunne benyttes til at udvikle laseren. Han interesserede sig kun for at forstå de fundamentale principper for vekselvirkning mellem lys og stof. Einsteins eksempel viser hvor vigtig den fundamentale forskning er, og at man ikke kan springe den fundamentale forskning over hvis man skal opnå store teknologiske landvindinger. Den kvantefysik, som Einstein udviklede i den første del af 1900-tallet sammen med Bohr og Planck, har haft enorm betydning for vor tids teknologiske udvikling.

Litteratur

- [1] A. Einstein (1917), *Physikalische Zeitschrift*, vol. **18**, pp. 121-128.
- [2] T. Skettrup, *Laserteknik* (1993), 5. udgave, Polyteknisk Forlag.
- [3] P. Milonni and J. Eberly (1988), *Lasers*, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] E. Samsøe, P. M. Petersen, P. E. Andersen, S. Andersson-Engels, and K. Svanberg, in R. Birngruber, H. Vanden Bergh (Eds.) (2001), *Laser-Tissue Interactions, Therapeutic Applications, and Photodynamic Therapy*, Proc. SPIE **4433**, pp. 134-139.
- [5] P. M. Petersen, M. Løbel and S. J. Jensen (2004), *Spatial and Spectral Control of High-Power Diode Lasers Using Phase Conjugate Mirrors*, in *Phase Conjugate Laser Optics* edited by A. Brignon and J-P Huignard, Wiley, pp. 301-330.



Paul Michael Petersen er leder af forskningsprogrammet *Lasersystemer og Optiske Materialer* på Forskningscenter Risø og adjungeret professor på Niels Bohr Institutet.