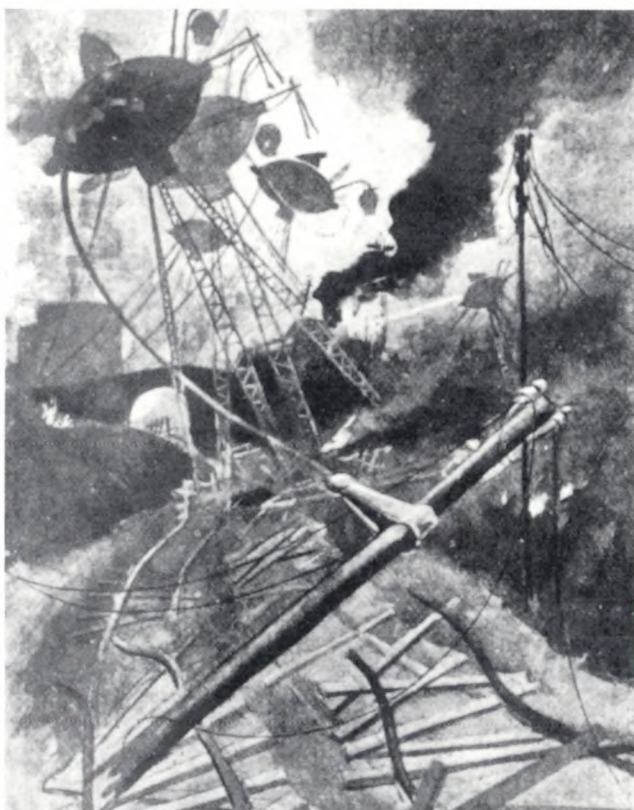


Laser ablation: bestråling af overflader med ekstrem høj lysintensitet

Jørgen Schou, Optik og Fluid Dynamik Afdelingen, Forskningscenter Risø



"THE DESTROYING MONSTERS FROM MARS WRECK THE RAILWAYS."

Figur 1. "It is still a matter of wonder how the Martians are able to slay men so swiftly and so silently. Many think that in some way they are able to generate an intense heat in a chamber of practically absolute non-conductivity. This intense heat they project in a parallel beam against any object they choose, by means of a polished parabolic mirror of unknown composition, much as the parabolic mirror of a lighthouse projects a beam of light. But no one has absolutely proved these details. However, it is done, it is certain that a beam of heat is the essence of the matter. Heat, and invisible, instead of visible, light. Whatever is combustible flashes into flames at its touch, lead runs like water, it softens iron, cracks and melts glass, and when it falls upon water, incontinently that explodes into steam."

Ekstremt høje lysintensiteter.

På en klar dag ved ækvator vil sollyset have en intensitet på $1,4 \text{ W/cm}^2$. Allerede en beskeden intensitet af denne størrelse føles ubehageligt af et menneske. Det er imidlertid ingenting mod hvad en laser kan frembringe, hvad enten den er kontinuert eller pulset. Med en kontinuert laser, f. eks. til svejsning, kan man nemt bestråle en overflade med en intensitet på 10 kW/cm^2 . Går man til lasere

med nanosekund eller picosekund pulser, kan man med en simpel fokusering af laserlyset frembringe intensiteter, der langt overstiger 1 GW/cm^2 , altså 10 størrelsesordener mere end hvad der på et menneske føles ubehageligt. Man skal kort sagt forestille sig, at hele effekten fra et stort kraftværk i løbet af et kort tidsrum rammer en overflade der er mindre end en kvadratcentimeter. Rammer en sådan lysstråle en overflade, vil den bogstaveligt talt ødelægge overfladen af alle materialer.

Ideen med en ødelæggende, usynlig lysstråle rettet mod fjendtlige mennesker eller våben blev brugt af H.G. Wells i "Kloderne Kamp" i 1896 (figur 1). Dette var før de første lasere blev konstrueret, men ideen med en voldsom, endda ødelæggende påvirkning af materialer med lys er dermed langtfra ny.

Hvad er laser ablation?

Ved laser ablation forstås en proces, hvor en materialeoverflade eroderes af laserlys ved en kombination af processer der starter med fordampning af materialet og ender med et kortvarigt højenergiplasma over materialet. Under alle omstændigheder kan en enkelt laserpuls fjerne materialet fra mange hundreder af monolag og pletten vil være synlig med det blotte øje.

Selve ordet ablation kommer fra latin af verbet "auferre", at bære bort, bringe væk, hvis perfektum participium hedder "ablatum". Betegnelsen "ablation" er blevet benyttet til at beskrive en erosionsproces, der i virkeligheden kan være en indviklet kombination af lysabsorption, smeltning, fordampning og ionisation.

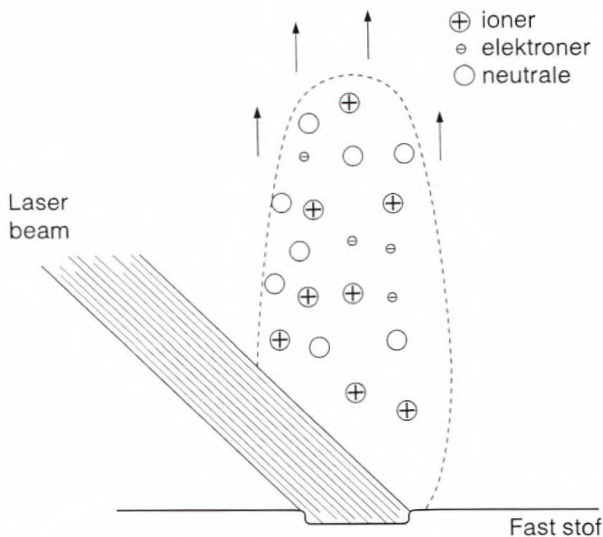
Med en kraftig pulset laser kan man kortvarigt skabe fysiske forhold, der er ekstreme. Selv med beskedne midler kan man i mindre laboratorier bringe det bestrålede materiale op på temperaturer, der langt overstiger kogepunktet, man kan bringe chokbølger af kolossal størrelse ind i det faste stof, og man kan frembringe tætte plasmaer af selv tunge grundstoffer. Alt dette kan gøres med en laser til nogle få hundrede tusinde kroner.

Laser ablation var glemt i 20 år.

Selvom laser ablation er en destruktiv proces, kan den også bruges til nyttige formål. Allerede i 1965 blev de første tyndfilm produceret, simpelthen ved at opsamle de ablaterede partikler på et substrat, der blev anbragt nogle få centimeter fra det bestrålede target. Dette arbejde gik snart i glemmebogen, fordi man med andre metoder langt lettere kunne producere tyndfilm, og fordi det dengang var en kunst at få en laser til at virke. Samtidig begyndte

en række aktive laser og laserablations fysikere at arbejde med laser fusion og "stjernekrigs-våben", og kunne af militære grunde ikke kommunikere med resten af det internationale samfund. I de næste tyve år skete der meget lidt.

I 1987 skete der en afgørende ændring. Venkatesans gruppe i Baltimore producerede de første tyndfilm af højtemperatur superledere af keramiske targets med laser ablation. Netop disse keramikker havde en indviklet sammensætning af fire grundstoffer og et højt smeltepunkt, så traditionelle metoder såsom fordampning og sputtering deponering var meget vanskelige. Det viste sig, at film af selv en kompliceret kemisk sammensætning kunne fremstilles fra et laser-bestrålet "pulver"-target af denne sammensætning. Samtidigt var UV-lasere blevet billigere og driftsikre, så de udviklede sig til være brugbare og (nogenlunde) pålidelige redskaber i laboratorier, hvor der ellers ikke var nogen tradition for at anvende lasere. Fra dette øjeblik nærmest eksploderede anvendelsen af laser ablation til deponering af tyndfilm af alle mulige materialer. Denne pludselige udvikling betød også, at man begyndte at interessere sig for hvad, der egentlig skete under laser ablation af en overflade. Herhjemme fremstillede Torsten Freltoft og Per Vase fra NKT i 1989 de første superledende højtemperaturfilm ved laser ablation. De magnetiske egenskaber af disse film kunne fuldt ud måle sig med de bedste fra udlandet.



Figur 2. Intenst laser beam rammer en overflade af et fast stof og eroderer sig ind i materialet. Det eroderede stof udsendes som en "gas-sky", en såkaldt fane, der indeholder ioner, elektroner og neutrale atomer fra materialet.

Hvad sker der under laser ablation?

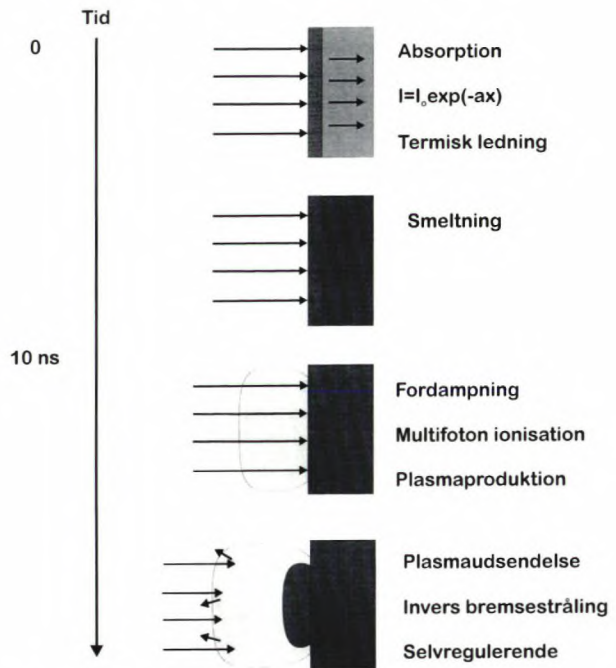
Som det ofte er sket ved andre lejligheder, blev laser ablation en metode, der kunne benyttes til f.eks filmdeponering og materialeanalyse, uden at man forstod hvad der præcist skete i de forskellige faser af ablationen.

Lad os betragte en metaloverflade, der bestråles af en

kraftig UV-laser. I løbet af nogle få nanosekunder gennemløbes en række scenarier (vist på figur 3)

I første fase absorberes laserlyset af metallets ledningselektroner, og den absorberede energi fordeles indenfor et volumen, der er bestemt af metallets termiske diffusion. I anden fase varmes metallet op til smeltepunktet, men uden at der nødvendigvis sker en nævneværdig erosion af materialet.

Vekselvirkning af intens laser med target

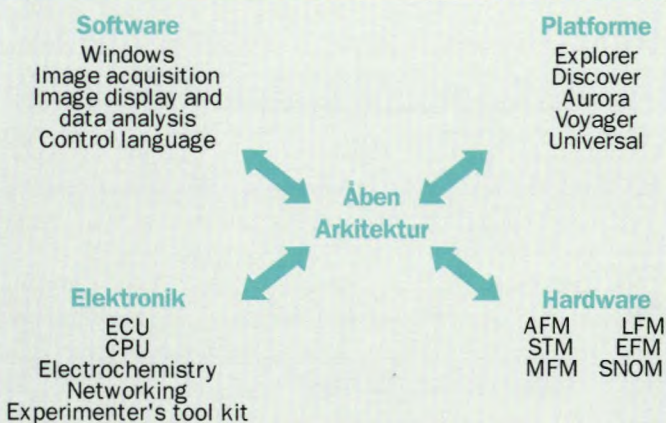


Figur 3. Fire scenarier i rækkefølge, der beskriver, hvad der sker under intens laserbestråling af en metaloverflade. Jo større intensitet, desto hurtigere kommer man op i scenario 3 og 4. Er laseren svag, når man kun til scenario 1 og 2. (Grafik: Birgitte Thestrup)

I tredje fase når metaloverfladen kogepunktet, hvorefter der kan ske en stærk fordampning. Ved høje laser intensiteter ioniseres atomer foran targetet ved multifotonprocesser, hvilket vil sige at to eller flere fotoner, der befinder sig indenfor samme mikrovolumen i fællesskab kan ionisere et atom. På denne måde kan man ionisere atomer med en ionisationsenergi lang over fotonenergien. Der bliver på denne måde produceret et tyndt plasma i gasfanen foran targetet. I fjerde fase bliver plasmaet gjort tættere og samtidigt opvarmet. Det er som ved en (kemisk) eksplosion. Når først processen er gået i gang lokalt, udbreder den sig lynhurtigt til andre steder i fanen. Plasmaelektronerne accelereres af laser feltet og ioniserer andre atomer, hvorefter de frigjorte elektroner ioniserer endnu flere atomer. På denne måde bliver plasmaet i gasfanen foran targetet tættere og i løbet af nogle nanosekunder fuldt ioniseret. Tætheden af plasmaet stiger, indtil laserlyset helt eller delvist bliver svækket af plasmaet og kun en ringe del af laserlyset når materialeoverfladen. Når dette



Figur 4. Et stærkt lysende (blåligt) sølvplasma i vakuum foran target ses til venstre på figuren. Laserpulsen på 355 nm (kan ikke ses) kommer ind fra venstre. Pulseenergien på 50 mJ og længde 6 ns giver her til en intensitet på 0.5 GW/cm². De "tallerken- lignende" to plader til højre er mikrovægte på holdere, der bruges til måling af hvor meget sølv, der udsendes fra target. Billedet stammer fra en optagelse på Risø.



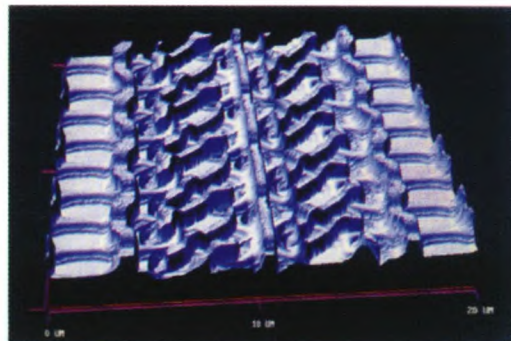
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for af se prøver ned til atomar størrelse. 3D-forstørrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

**AFM
billede af
multilags
semi-
conductor
taget
med
TopoMetrix
Voyager.**



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

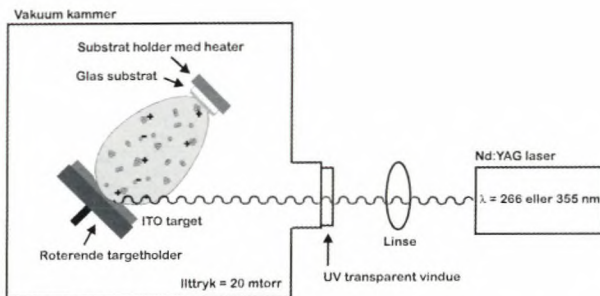
sker, falder ablationsraten og plasmaet bliver igen tyndere, så laserlyset igen når overfladen. På denne måde opstår der en form for selvregulerende plasma foran targetet.

En fane af et sølvplasma er vist på figur 4. I dette tilfælde er plasmaet produceret med en laser puls på omkring 50 mJ og varighed 6 ns. Selv med relativt små pulsenergier kan der genereres en stærkt lysende fane under ablation i vakuum.

Hvis en isolator bliver bestrålet, er de to første scenarier anderledes. Hvis fotonernes energi er større end båndgabets i isolatoren eller hvis der er resonante overgange, der passer til fotonenergien, kan der hurtigt skabes så mange frie og energetiske elektroner i stoffet, at det varmes op, også i løbet af nanosekunder. Ved en udpræget isolator med et stort båndgab vil der også ved en tilstrækkelig høj intensitet blive genereret frie elektroner ved multifotoneksitation, hvorefter ablationen foregår som ved et metal, dog noget langsommere.

Laser ablation velegnet til produktion af tyndfilm

En typisk opstilling til fremstilling af tyndfilm er vist i figur 5. I princippet opsamler man de partikler, der udsendes fra materialet under laser ablationen, på et velegnet underlag. Ved et passende valg af underlag kan man endda få filmen til at imitere substratets krystalstruktur, d.v.s. man kan dyrke epitaksiale film.



Figur 5. Skematisk tegning af et kammer til tyndfilmproduktion på Risø. Laserstrålen rammer et roterende sammenpresset pulver target af ITO (indiumtinoxid). Det ablaterede materiale sætter sig på glassubstratet, hvor filmen dannes. (Grafik: Birgitte Thestrup)

Den afgørende årsag til at UV laser ablation deponering slog igennem ved fremstilling af tyndfilm, er muligheden for at lave film sammensat på nøjagtig den samme måde som det bestrålede target. Den helt præcise grund til, at materialet således kan overføres støkiometrisk til targetet, er ikke helt klar, men skyldes formodentlig en kombination af den nærmest eksplosive opvarmning af materialeoverfladen, og at der ofte er en tynd gas atmosfære i deponeringskammeret. Da gassen ofte består af lette atomer eller molekyler, f. eks. iltmolekyler, sammenlignet med de oftere tunge metalatomer i targetet, vil der være en tendens til at de lette atomer med høj energi nedbremses mest. Dermed vil alle atomer komme nogenlunde samtidigt til targetet, så filmen bygges op med den rigtige

sammensætning.

Laser ablation deponering er først og fremmest brugt til materialer med højt smeltepunkt, hvor mere konventionelle metoder som f. eks. fordampning, kan være vanskelige at benytte. Af samme grund er laser ablation deponering hyppigt blevet brugt til keramik og andre oxider.

En speciel egenskab ved laser ablation er, at en del af partiklerne, der udsendes fra fanen foran targetet, har energier i nærheden af 100 eV. Dette er flere størrelsesordener større end de energier partiklerne får ved konventionel fordampning. Ved filmproduktion er så høje energier ikke ønskelige, og en tynd gasatmosfære kan som nævnt nedbremse energien til 5-40 eV. Når de ablaterede partikler rammer overfladen med denne energi, er de særdeles mobile på filmoverfladen, og kan sætte sig i krystalgitteret på en "god" plads. Samtidig er energien ikke høj nok til, at det indkommende atom med stød kan producere defekter, der ødelægger krystalstrukturen. En god filmkvalitet hænger som oftest nøje sammen med et godt krystalgitter. På denne måde kan man med laser ablation deponering ved stuetemperatur lave film, der ellers ville kræve opvarmning af substratet, så de indkommende atomer ville kunne bevæge sig termisk rundt på filmoverfladen. I de første år efter laser ablationens gennembrud til filmproduktion, vidste man faktisk ikke, at man udnyttede de gode egenskaber af de energetiske partikler fra fanen.

En anden fordel ved laser ablation er, at deponeringsprocessen kan ske i en reaktiv eller inaktiv gasatmosfære, ilt, brint, kvælstof eller argon. Det kan f. eks. ved mange oxider være ønskeligt, at filmproduktionen foregår i en tynd atmosfære af ilt, så at filmmaterialet ikke udtyndes for komponenter med højt partialtryk under produktionssprocessen.

Anvendelser af laser ablation.

I tiden efter laser ablationens gennembrud til filmproduktion var det først og fremmest høj-temperatur superledere, der blev fremstillet på denne måde. På NKT benyttes laser ablation stadig til fremstilling af yderst følsomme magnetometre i form af superledende film. Den generelle tendens har været, at laser ablation i stigende grad benyttes til andre materialer, og først og fremmest til materialer med kompliceret sammensætning.

I Risøs afdeling for Optik og Fluid Dynamik fremstilles tyndfilm af indiumtinoxid (ITO) med laser ablation (figur 7). Dette materiale har den overraskende egenskab, at det er gennemsigtigt for synligt lys og samtidigt elektrisk ledende. Det kan derfor benyttes som elektroder på optiske komponenter. Ved laser ablation deponering kan man pålægge en elektrisk ledende film af ITO ved stuetemperatur. Ved praktisk talt alle andre metoder har det hidtil været nødvendigt at opvarme substratet, men ikke alle materialer kan tåle opvarmning.

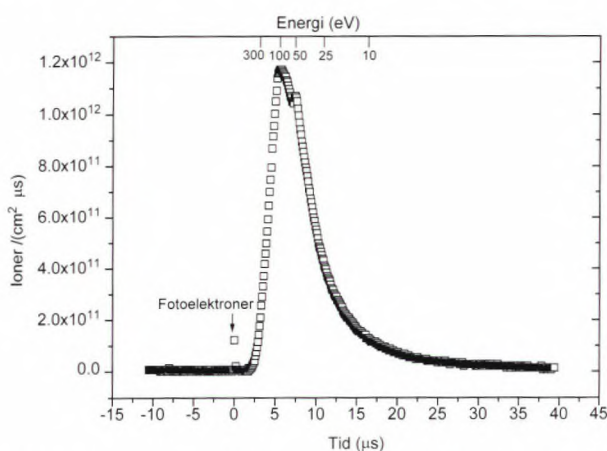
Laser ablation har endnu ikke vundet indpas som metode til industriel filmproduktion. Til gengæld er metoden slået igennem overalt i udviklingslaboratorier som en

hurtig og nem fremstillingsmetode til film af nye materialer. Det manglende industrielle gennembrud skyldes, at man endnu ikke har UV-lasere, der kan bestråle store flader tilstrækkeligt intenst, så produktion af film over store flader kan finde sted.

Parallelt med denne udvikling indenfor filmproduktion er laser ablation også blevet benyttet til erosion af materialer under navnet "laser ætsning" eller som en litografisk proces "laser litografi". Det er i virkeligheden den simpleste form for anvendelsen af laser ablation (se figur 2), men kræver en præcis fokusering af laserstrålen på det stof, der skal bearbejdes.

Laser produceret plasma.

Det er ikke alene det materiale, man kan opsamle som tyndfilm, der gør laser ablation spændende. Også de fysiske forhold i fanen undervejs mod et substrat eller en anden overflade er interessante.



Figur 6. Strømsignal fra en probe foran et sølvtarget, der er bestrålet med en enkelt puls på 70 mJ ved 355 nm. Først kommer der et signal fra fotoelektroner, der frigøres, når laser lyset rammer proben. Derefter følger en fordeling af ioner, der opsamles over mange mikrosekunder. Toppen af kurven svarer til enkeltladede sølvioner med en energi på 100 eV, mens de første partikler er hurtigere. (Spektrum optaget af Tue N. Hansen, Risø)

På figur 6 ses et strømsignal fra en probe (en metaltråd) ophængt omkring 65 mm fra et sølvtarget efter bestråling med en laser puls på ca. 70 mJ og varighed 6 ns. Denne puls svarer nogenlunde til den, der er vist på figur 4. Det er så heldigt, at man på figuren også har en reel tidsskala, d.v.s. man har det starttidspunkt, hvor laserlyset rammer target og bliver reflekteret tilbage på proben. Lyspulsen er så stærk, at fotoelektroner løsrives og forsvinder fra proben. Da strømmen jo udover indkommende positive ioner per tidsenhed også kan måles som forsvundne elektroner per tidsenhed, kommer der i begge tilfælde et signal. Det, man ser på figuren, er reelt en såkaldt flyvetidsfordeling, der kan konverteres til en hastighedsfordeling eller energifordeling, når man kender target-probe afstanden og massen af de ablaterede atomer. I toppen af kurven på figur 7 bevæger sølvatomerne sig med en hastighed på 10 km/sek, hvilket svarer til en energi

på 100 eV. I alt registreres der, at en procent af et monolag rammer proben per puls.

Milepæle indenfor laser ablation:	
Konstruktion af første lasere	1960
Første ion- og elektronproduktion observeret ved laser ablation	1963
Første klynger observeret fra laser ablation	1964
Første tyndfilm produceret ved laser ablation	1965
Første høj-temperatur superledermateriale fremstillet ved UV-laser ablation	1987
Første tyndfilm fremstillet ved UV-laser ablation i Danmark (hos NKT)	1989

Aktiviteter med laser ablation i Danmark		
Sted		Program
NKT	Re-search Center	Fremstilling af superledende tyndfilm til magnetometre og andre elektroniske komponenter. (Torsten Freltoft og Y.Q. Shen)
OFD, Risø		Fremstilling af optiske tyndfilm, fx af indiumtinoxid. Studier af fysiske processer under laser ablation (Jørgen Schou)
Fysisk Inst. DTU		Fremstilling af superledende tyndfilm af YBaCuO til studier af tunneleffekter (Jørn Bindslev Hansen og J.L.Skov)
Fysisk Inst. Århus Univ.		Fremstilling af metalliske tyndfilm, multilagsfilm og compoundfilm af nikkel og andre metaller til studier af diffusion og mekaniske egenskaber. (Jørgen Bøttiger).

De højeste energier, der ses i flyvetidsspektrets forkant, er imidlertid langt større. Et intens bombardement med fotoner af langt ringere energi, i dette tilfælde 3.5 eV (355 nm) kan altså udløse udsendelse af tunge ioner med en energi op til mere end to størrelsesordner højere. Disse energier kan ikke forklares ud fra hydrodynamiske modeller, der var stort set enerådende i laser ablationens barndom. De skyldes hurtige elektroner, der frigøres ved multifoton-ionisation i fanen foran target og umiddelbart derefter forlader fanen. Dermed efterlades et overskud af ioner, der således kan accelereres af rum-ladninger i et plasma dobbeltlag.

Det er indlysende, at kan man frembringe så høje kinetiske energier for ioner eller atomer, kan man ved højere intensiteter også ionisere atomer til høje ladningstilstande. I eksemplet fra figur 6 er der overvejende enkeltladede sølvioner, men allerede ved intensiteter på 20-40 GW/cm² kan man producere lette ioner i ladningstilstande op til 4-5. Derfor har laser-producerede plasma i

en årrække været en brugbar kilde til højt ladede ioner. Man kan endda nogenlunde styre ladningstilstanden ud fra intensiteten af laser beamet.

Det er dog ikke kun ideen om med små midler at fremstille ekstremt højt-ladede ioner, der giver laser ablation perspektiv. De exciterede højt-ladede ioner kan producere Røntgen-stråling, og der arbejdes derfor ved mange laboratorier på at opbygge en såkaldt Røntgen-laser, der i givet fald ville kunne være en synchrotron-strålingskilde i mini-format. Et andet håb er, at man med de høje intensiteter med mindre lasere kan fremstille små partikel-beam accelerators. Selvom man med intense lasere allerede har produceret ioner og elektroner med MeV-energi, varer det dog nok et stykke tid, før de første laser-baserede accelerators kommer i brug rundt omkring på laboratorierne.



Figur 7. Foto af opstillingen på Risø til tyndfilmsproduktion med laser ablation. Target, en metalgrå skive lige over kanten, og substratholder er midlertidigt løftet op fra kammeret. Laseren kommer ind i kammeret fra foran i billedet gennem linse og kammervindue. I baggrunden forskningstekniker Arne Nordskov og artiklens forfatter, Jørgen Schou, Risø. (Foto: Birgitte Thestrup)

Referencer:

- 1) J. Schou, *Laser ablation fra faste stoffer - Et område i rivende udvikling*. DOPS-NYT 3, 6 (1993)
- 2) Martin von Allmen og Andreas Blatter, *Laser-Beam Interactions with Materials*. Physical Principles and

Applications. Springer series in Mat. Science (1995), pp. 1-194.

- 3) Chandrashekhar J. Joshi og Paul B. Corkum, *Interactions of ultra-intense laser light with matter*. Physics Today, Januar 1995, 36.



Jørgen Schou er seniorforsker på Risø i afdelingen for optik og fluid mekanik. Han har arbejdet med partikel- og laserbestråling af overflader i en årrække. Således blev han i 1991 Dr.scient. på en afhandling over sputtering ved partikelbestråling.

Innhold og Omfang av Grunnleggende Fysikkutdanning. Hafjell, Lillehammer, 8-10. August 1997.

Det inviteres med dette til nordisk workshop. Formålet med møte er aa skape diskusjon om innhold, undervisningsmetoder og relevans for forskerutdanning ved de forskjellige universiteter og læresteder i norden.

Workshopen har en nordisk styringsgruppe bestaaende av Arne Auen Grimnes(AAs), Gunnar Tibell(Uppsala) og Jan Petter Hansen (Bergen), og organiseres av en lokal arrangementskomite i Bergen bestaaende av undertegnede. Den avholdes i direkte forlengelse av et norsk undervisningsmøte arrangert av Norsk Fysikklærerforening. Workshopen er støttet av Norfa. Det kan derfor gis støtte til reise og opphold. Det vil prioriteres bredest mulig nordisk representasjon og 50

For aa forenkle informasjonsutvekslingen forbundet med prosjektet, er det blitt opprettet mailingliste og en internett side: URL: <http://www.fi.uib.no/renate/workshop.html>

Et detaljert program vil bli offentliggjort innen 1. juni 1997. Paameldingsfristen er satt til 1.juli 1997. Ved spørsmål og paamelding vennligst kontakt: Renate Gruner, telf. 55 58 83 03, email: renate.gruner@fi.uib.no Jan Petter Hansen, email: janpetter.hansen@fi.uib.no