

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

zveřejněná podle § 31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

788-97

(19)

ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **15. 09. 95**

(32) Datum podání prioritní přihlášky: **19.09.94**

(31) Číslo prioritní přihlášky: **94/306431**

(33) Země priority: **US**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **13. 08. 97**
(Věstník č. 8/97)

(86) PCT číslo: **PCT/US95/11993**

(87) PCT číslo zveřejnění: **WO 96/09128**

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.⁶:

B 08 B 7/00
B 23 K 26/00

(71) Přihlášovatel:

CAULDRON LIMITED PARTNERSHIP,
Bethesda, MD, US;

(72) Původce:

Engelsberg Audrey C., Milton, VT, US;
Bethell Donna F., Washington, WA, US;

(74) Zástupce:

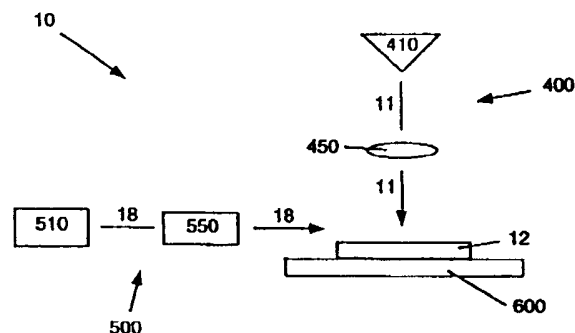
PATENTSERVIS PRAHA a.s., Jivenská 1273,
Praha 4, 14000;

(54) Název přihlášky vynálezu:

Selektivní odstraňování nežádoucího povrchového materiálu pomocí ozařování

(57) Anotace:

Zařízení a způsob pro selektivní odstraňování nežádoucího materiálu s povrchu nějakého podkladu zajišťuje proud inertního plynu přes nežádoucí materiál na povrchu podkladu při současném ozařování nežádoucího materiálu energetickými fotony. Řešení umožňuje odstraňování nežádoucího materiálu bez změny fyzikálních vlastností materiálu, jenž je přilehlý a/nebo ležící pod odstraňovaným, nežádoucím materiálem. Vynález může být použit k provádění změn v topografii povrchu (včetně tvorby nanostruktur a planarizace povrchu).



728-97

č.j.	39616
DOŠLO	23. V. 97
URAD PRŮMYSLového VLASTNICTVÍ	Příl.

10 806

Selektivní odstraňování nežádoucího povrchového materiálu
pomocí ozařování

Oblast techniky

Tato přihláška je částečným pokračováním patentové přihlášky USA, pořadového č.: 08/045 165, podané 12. dubna, 1993 (jejíž obsah je zde zapracován odkazem a dále se zde o ní hovoří jako o "patentové přihlášce"), jež je částečným pokračováním patentové přihlášky USA, pořadového č.: 07/865 039, podané 31. března, 1992 (jejíž obsah je zde zapracován odkazem a dále se zde o ní hovoří jako o "přihlášce '039"), jež je částečným pokračováním patentové přihlášky USA, pořadového č.: 07/611 198, podané 9. listopadu, 1990, nyní patentu USA č.: 5 099 557 (patent "'557"), jenž je odloučením patentové přihlášky USA, pořadového č.: 07/216 903, podané 8. července, 1988, nyní patentu USA č.: 5 024 968 (patent "'968").

Tento vynález se týká odstraňování materiálu s nějakého povrchu. Konkrétněji se tento vynález týká výběrového odstraňování materiálu s určitého povrchu nějakého substrátového materiálu (dále pouze "podkladu") pomocí ozařování, a to bez měnění příslušných fyzikálních vlastností materiálu, který má zůstat na tomto podkladu, který je podkladovým či přilehlým materiálu, jenž má být odstraněn.

Dosavadní stav techniky

Efektivní odstraňování nežádoucího materiálu s nějakého podkladu je kritickým aspektem zpracování mnoha důležitých materiálů a postupů zhotovování výrobku. Jak je popsáno v dané mateřské žádosti, nežádoucí materiály (jež mohou být rovněž považovány za znečišťující látky anebo kontamináty) obsahují částice, nechtěné chemické prvky a tenké vrstvičky (filmy) či vrstvy materiálu. Tyto částice mohou být jemnými částicemi hmoty od submikronové velikosti až ke granulím, viditelným pouhým okem. Nežádoucí chemikálie obsahují jakýkoli prvek či sloučeninu, která je, v době kdy se provádí její odstraňování, nežádoucí. Například, hydroxylové skupiny ($-OH$) mohou být v jedné fázi žádoucím promotorem reakce na povrchu podkladu, ale v další fázi již nežádoucím kontaminátem. Jemné vrstvičky (filmy) nebo vrstvy materiálu mohou být organické, jako je maz lidského těla z otisků prstů, nátěr a epoxid, či anorganické jako jsou oxidy materiálu podkladu anebo jiných anorganických materiálů, kterým byl tento podklad vystaven.

Může existovat potřeba odstranit tyto nežádoucí materiály, aby se příslušný podklad stal více užitečným pro své zamýšlené určení. Například, u některých přístrojů přesného, vědeckého měření, dochází ke ztrátě této přesnosti, pokud jsou optické čočky či zrcadla těchto zařízení pokryta mikrojemnými povrchovými kontamináty. Podobně u polovodičů, kde povrchové vady v důsledku malých molekulárních kontaminátů často činí polovodičové masky nebo čipy bezcennými. Snížení množství molekulárních povrchových závad v křemenné polovodičové masce, třebaže jenom o malé množství, může radikálně zlepšit (zvýšit) produkci daných

polovodičových čipů. Podobně odstranění molekulárních, povrchových kontaminátů, jako je uhlík anebo kyslík, s povrchu křemíkových plátek před tím, než jsou nanášeny vrstvy obvodů na daný plátek anebo mezi nanášením vrstev, významně zvyšuje kvalitu vyrobeného počítačového čipu.

Výběrové odstraňování vrstev materiálu podkladu může být prováděno za účelem formování na podkladovém povrchu struktur velmi malého měřítka (tak zvané "nanostruktury"). Materiál (ať už podkladu, vrstev oxidu či jiné vrstvy materiálu) může rovněž být s povrchu podkladu výběrově odstraňován v rozdílných množstvích za účelem změnění topografie tohoto podkladu (například vyhlazením hrubého povrchu).

Častokrát vyžaduje ošetření, za účelem odstranění nežádoucího materiálu, materiál zpracovávající zařízení. Například, významná část nežádoucího materiálu, jenž nakonec znečišťuje křemíkové plátky během výroby, emanuje z daných výrobních přístrojů, jako například komor zpracování, v nichž jsou dané plátky čipů umístěny, křemenných nosičů (člunků) křemíkových plátek k jejich udržování pro průchod křemennými trubicemi pece (a trubic pece samotné), a z trubek, které vedou zpracovatelský plyn do těchto komor. Podle toho, úroveň znečištění plátku, k níž dochází během výroby, může být významně snížena periodickým čištěním těchto zařízení.

Obecně, jakýkoli postup použitý k odstraňování materiálu s nějakého podkladu by tak měl činit bez působení na příslušné fyzikální vlastnosti u určitého (žádoucího) materiálu, jenž zůstává. Příslušné fyzikální vlastnosti, jež by měly zůstat nepostiženy, obecně obsahují krystalickou strukturu, vodivost, hustotu, elektrickou konstantu, hustotu náboje, Hallův koeficient, a difúzní (rozptylový) koeficient

pro elektrony/otvory. Ve zvláštních polovodičových aplikacích (jako je polovodič s vrstvou kysličníku kovu ("MOS"); tranzistor řízený polem ("FET"); a bipolární přechod ("BJT")), tyto vlastnosti mohou obsahovat kapacitanci/plochu v MOS; kapacitanci daného přechodu; kanálový proud ve FETu směřovaný z kolektoru do zdroje; napětí z kolektoru do báze, emitoru do báze v BJT; napětí z kolektoru do zdroje, hradla ke zdroji ve FET; prahový potenciál v MOS; náboj/plocha stavu povrchu MOS; a zpoždění ukládání. Dále, může být nežádoucí měnit příslušnou topografii (jako je hrubost povrchu) u zbývajících materiálu.

Jak je podrobně popsáno v mateřské přihlášce, pro odstraňování nežádoucích materiálů bylo (a je v současnosti používáno) mnoho technik. Tyto obsahují mokré chemické čištění (postup RCA), ředění pomocí HF (fluorovodíku), ultrazvukové a megasonické čištění, a čištění superkritickým fluidem, čištění ultrafialovým zářením a ozónem, třecím čištěním, parami HF, čištění tekutinou za pomoci laseru (obsahující Allenův postup a Tamův postup), tavením povrchu, žíháním a ablací.

Ještě jednou technikou je plazmové čištění, jež může být použito k čištění zpracovatelských komor od nástrojů reaktivního iontového leptání (RIE) po tom, co bylo dokončeno určité množství zpracování (např., určitý počet plátek). Přednostními plazmovými speciemi je kyslík, chlorid uhličitý a dusík, jež mohou být použity v rozmanitých molárních koncentracích hmoty k čištění optiky a křemíkových povrchů. Plazmy založené na elektronové cyklotronové rezonanci (ECR) představují současný stav dané techniky. Efektivnost tohoto typu čištění je však omezena na částice, odstraňování filmu (tenké vrstvičky) se zdá být obtížné a poškozující elektrické parametry.

Čištění suchým ledem (CO_2) (rovněž známé jako sněhové čištění a čištění postřikem trysku CO_2) je způsobem dodávání sněhu CO_2 pomocí v ruce drženého zařízení, jež má rozmanité trysky pro čištění povrchu. Tato technika je omezena rozpustností dané částice ve sněhu CO_2 , například, když určitá částice není rozpustná v CO_2 , pak nebude s daného povrchu odstraněna. Dále, použitím této techniky nemohou být odstraňovány oxidy a polymerové filmy.

Všechny tyto techniky trpí nějakými nedostatky, včetně: neschopnosti odstraňovat velmi malé částice, nežádoucí změnění fyzikálních vlastností podkladového substrátu, potřeba velkého množství drahých materiálů jako je ultračistá voda a plyny, a výroba produktů toxického odpadu (jako jsou kyseliny HF).

Tenké vrstvičky, a obzvláště tenké filmy oxidace, jsou společnou problematickou kategorií materiálů, které je třeba s podkladu odstranit. Většina materiálů, jež jsou vystaveny okysličené atmosféře (např., vzduchu), vytváří přírodní kyslík, jenž potahuje povrch. Takové vrstvy oxidu jsou typicky v podstatě spojitou vrstvou molekul materiálu oxidu. Ve většině případů je tato vrstva přírodního oxidu škodlivá v závislosti na tom, jak bude materiál podkladu použit. Jedním přístupem k tomuto problému je udržovat materiál podkladu ve vakuu, aby se zabránilo tvorbě oxidu. Známé techniky pro odstraňování vrstviček (filmů) oxidu obsahují jejich ošetřování pomocí silných kyselin jako je lučavka královská, kyselina sírová a kyselina fluorovodíková.

Při výrobě polovodičů má odstraňování přírodního oxidu (kysličníku křemičitého) s křemíkového podkladu velký význam, protože se výrobní měřítko stále zmenšují. Současné způsoby odstraňování kysličníku křemičitého užívají tekutého

HF, a provádějí se pokusy s halogeny v parní fázi a s parní fází halogenů ve spojení s ozařováním ultrafialovým zářením. B. Van Eck, S. Bhat, a V. Menon, "Leptání parní fází a čištění SiO_2 ", PROCEEDINGS, MICROCONTAMINATION 92, (Santa Clara, CA, Říjen 27-30, 1992), str. 694; J de Larios, W. Krussel, D. McKean, G. Smolinsky, B. Doris a M. Gordon, "Plynová fáze čištění stopových kovů a organických kontaminátů z plátek: na ultrafialovém záření ozařovaném kyslíku založených a na chloru založených postupech", MICROCONTAMINATION 92, (Santa Clara, CA, Říjen 27-30, 1992), str. 706; M. Miyashita, T. Tusga, K. Makiyara a T. Ohmi, "Závislost povrchových mikrodrsností plátek CZ, FZ a EPI na mokřém chemickém zpracování", JOURNAL OF ELECTRO-CHEMICAL SOCIETY, Sv. 139(8) 1992, str. 2133; a T. Ohmi, "Spolehlivost ULSI během ultračistého zpracovávání", PROCEEDINGS IEEE, sv. 81(5), str. 761. Používání na halogenu založené chemie(postupu) může poškodit přilehlé obvody, protože je to spíše hrubý, než bodově zaměřený způsob odstraňování.

Odstraňování povrchových oxidů je rovněž důležité při přípravě kovových podkladů pro užití adheziv jako alternativy k svařování v leteckých, automobilových a v konstrukčních (stavebních) aplikacích. Odstraňování povrchových oxidů má rovněž aplikace při rekondici počasím opotřebovaných kovových povrchů a zlepšování kvality obíhající kovové měny.

Ještě jedním důležitým postupem zacházení je tvorba nanostruktur (extrémně malých fyzikálních struktur) na anebo v podkladových materiálech, jako jsou tlakové snímače, akcelerometry, mikroskopické snímače atomové energie, a mikromotory. Jedna technika, navržená pro tvorbu nanostruktur, obsahuje chemické leptání ve spojení s

maskovacími technikami (užitečné v objemovém mikroobrábění, kde jsou strukturální vrstvy materiálu budovány na nějakém plátku a pak je pomocná vrstva odleptána pryč). J. Bryzaek, K. Peterson a W. McCulley, IEEE SPECTRUM, květen 1994, str. 20. Další navržená technika obsahuje nanášení materiálu zaměřeným laserem, J.J. McClelland, R.E. Scholten, E.C. Palm a R.J. Celotta, "Nanášení atomů zaměřeným laserem", SCIENCE, sv. 262, 5. listopadu, 1993, strana 877.

Ještě jedním důležitým postupem ošetření je planarizace, eliminace či omezení nepravidelností povrchu podkladu. Běžně užívaná technika pro planarizaci je chemické mechanické leštění (CMP), které používá příhodných kalových směsí k obroušení povrchů na plošnou úroveň pomocí leštících polštářků. Toto povrchové leštění zajišťuje přednost vyššího výkonu čipu. Planarizace CMP je řízena pomocí "leptacích přerušení" a načasováním tohoto postupu tak, aby nedošlo k nadměrnému leštění. Tento postup produkuje velké množství kontaminátů (reziduí z kalu) a je velmi drahý (s průměrným nákladem asi 35 USD na plátek), což je připisováno nákladům spotřebovaných materiálů jako je kal, voda, polštářky, a kartáče pro kartáčové čističe. Dalším problémem sdruženým s CMP je odstraňování reziduálního kalu s povrchu plátku. Odstraňování pomocí kartáčového čištění, což je současným postupem, je pouze účinné na částice velikosti přibližně asi 0,5 μm . Dodatečným nedostatkem postupu planarizace CMP je, že není spřažitelný s jinými současnými technikami čištění.

Podstata vynálezu

Tento vynález řeší příslušné problémy a vyhýbá se nedostatkům předchozího stavu techniky pomocí selektivního

odstraňování nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu podkladu pomocí ozařování tohoto nežádoucího materiálu energetickými fotony, majícími časo-prostorovou koncentraci (proudů energie a výkonu), dostatečnou k odstranění nežádoucího materiálu a nedostatečnou ke změnění fyzikálních vlastností podkladového substrátu. Aby se předešlo znovausazování uvolněného materiálu jinde na ošetřovaném povrchu, přes tento povrch je kontinuálně hnán proud plynu za účelem odnášení tohoto uvolněného materiálu. Optimálně je tento plyn inertní jak vůči danému podkladu, tak vůči odstraňovanému materiálu. Navíc, nejlepším způsobem jak předejít eventualitě aby se kontamináty strhávané proudem neusazovaly na ošetřovaném povrchu, je proudění plynu přednostně laminárním prouděním.

Zdrojem ozařování (energetických fotonů) mohou být jakékoli prostředky známé současné technice k zajištění potřebné úrovně energie, včetně laserů impulsových, s nepřerušovanou vlnou anebo lamp s vysokou energií. V některých aplikacích, takových v nichž určitá zájmové spojení (vazby) vyžadují téměř simultánní aplikaci mnohonásobných fotonů, se dává přednost zdroji s vysokým výstupním výkonem jako je impulsový ultrafialový laser. Tento vynález je znázorněn jako použitelný pro odstraňování v podstatě spojitých vrstev nežádoucích organických a anorganických vrstviček (filmů). Odstraňování organických filmů oxidů obsahuje odstranění nátěru a markeru z podkladů nerezavějící oceli či křemene. Odstraňování anorganických filmů oxidů obsahuje odstraňování oxidace z chromu, molybdenových slitin, slitin niklu/železa, nerezavějící oceli, tantalu, tungstenu, mědi, erbia a zirkonia, a odstraňování polykrystalického křemíku z křemene. Podle vlastností a tloušťky nežádoucího materiálu a podkladu, a vlastnostech

užitečného zdroje záření, může být nezbytným odstranit tento materiál v za sebou následujících aplikacích ošetření.

Topografie nějakého povrchu může být rovněž modifikována příslušnou aplikací daného postupu ošetření. Například, poměrně více materiálu může být odstraněno z regionů, v nichž je tloušťka materiálu relativně větší, a méně v regionech, kde je tloušťka menší, za účelem vytvoření stejnoměrnější tloušťky daného materiálu. Toto může účinně redukovat povrchovou drsnost daného materiálu. Zdroj fotonů může být spřažen v kontrolní smyčce s elipsometrem či jiným zařízením povrchové metrologie, za účelem zajištění zpětné vazby k monitorování a řízení odstraňování daného materiálu v každém regionu. Podobně, aplikování záření na hrubý povrch v relativně malém úhlu zajišťuje větší dopadovou koncentraci fotonů na vyčnívajících částech daného povrchu, zatímco méně exponované části jsou zastíněny a tudíž přijímají menší koncentraci fotonů. Relativně více materiálu je, tudíž, odstraňováno z vyčnívajících částí, čímž se snižuje hrubost povrchu.

Pomocí selektivního ozařování povrchu za účelem odstraňování materiálu ze zvolených ploch a do zvolené hloubky, mohou být vytvářeny nanostruktury.

Přehled obrázků na výkresech

Obrázek 1 - názorné schéma způsobu a zařízení na odstraňování nežádoucího materiálu z nějakého podkladu podle principů tohoto vynálezu,

Obrázek 2A-2B - názorné schéma dvou testovacích zařízení použitých k odstraňování materiálů ze zvolených podkladů.

Obrázek 2C - názorné schéma třetího zařízení, podobného těm na Obr. 2A-B, ale s jednodušší soustavou čoček.

Obrázek 3 - názorné schéma zobrazení geometrie dopadového regionu radiace produkovaného na podkladu jakýmkoli ze zařízení na Obr. 2A-C.

Obrázek 4 - názorné zobrazení techniky pro výběrové odstraňování materiálu s podkladu pro tvoření nanostruktur.

Obrázek 5 - názorné zobrazení podkladu před postupem planarizace.

Obrázek 6 - názorné schéma prvního zařízení pro použití v postupu planarizace podkladu na Obr. 5.

Obrázek 7 - názorné zobrazení výběrového zmenšení povrchové hrubosti podkladu prostřednictvím šikmého ozařování daného povrchu.

Příklady provedení vynálezu

Následně budou prováděny podrobné odkazy k současně upřednostňovaným ztvárněním tohoto vynálezu, jejichž příklady jsou zobrazeny v doprovodných výkresech. Na všech výkresech jsou k označování stejných prvků používány stejné referenční znaky.

1. Způsob a zařízení základního ošetření

Způsob a zařízení pro odstraňování nežádoucího materiálu s ošetrovacího povrchu nějakého podkladu, beze změny příslušných fyzikálních vlastností podkladu, jsou schematicky znázorněny na Obr. 1. Jak je znázorněno na Obr.

1, zařízení 10, pro ošetření podkladu 12, z něhož má být odstraněn nežádoucí materiál, obsahuje systém ozařování 400, plynový systém 500, a systém relativního pohybu 600. Systém ozařování 400 obsahuje zdroj 410 záření 11 (jež se skládá z energetických fotonů), jako je laser a vhodná dodávací optika 450, jež vede záření 11 na povrch ošetření podkladu 12. Plynový systém 500 obsahuje zdroj 510 plynu 18 a sdružený dodávací systém 550 pro proudění plynu 18 přes alespoň část povrchu podkladu 12, který je aplikováno záření 11. Plyn 18 je vůči podkladu 12 přednostně inertní a hnáný přes podklad 12 tak, aby podklad 12 koupal v prostředí nereaktivního plynu. Plynem 18 je přednostně chemicky inertní plyn jako je helium, dusík nebo argon. Systém relativního pohybu 600 zajišťuje relativní pohyb mezi částí povrchu podkladu 12, jež má být ošetřena, a zářením 11 a, volitelně, plynem 18.

Každý z utvářejících prvků těchto komponentů zařízení 10 (zdroj záření 410, dodávací optika 450, dodávací optika 450, zdroj plynu 510, systém dodávání plynu 550, a systém relativního pohybu 600) může být takový jaký je popsán v mateřské patentové přihlášce a je snadno zvolitelný řemeslníkem aby se sestavilo zařízení v souladu s principy vynálezu. Například, dodávací optika 450 může obsahovat zrcadla, čočky, optická vlákna, kolimátory, clony a jiné prvky. Systém dodávání plynu 550 může obsahovat kanály, komory, trubky, ventily, průtokometry a jiné prvky. Systém relativního pohybu 600 může být jakýmkoli vhodným systémem pro translační anebo rotační pohyb podkladu 12 se zřetelem k radiaci 11 a plynu 18, a může obsahovat translační plošinu pro planární posouvání podkladu, rotační upínadlo pro otáčení podkladu, či pohyblivé komponenty v dodávací optice

ke skenování paprsku záření 11 přes podklad. Ilustrativní ztvárnění zařízení 10 jsou popsána podrobněji níže.

Podle způsobu tohoto vynálezu jsou energetické fotony vyzařovány na povrch ošetření podkladu v nějaké časoprostorové koncentraci (tocích energie a výkonu), dostatečné k odstranění nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu podkladu a nedostatečné k tomu aby se změnila fyzikální vlastnosti materiálu, který má zůstat na povrchu podkladu.

Aby se odstranil nežádoucí materiál, vazby kterými přilíná k podkladovému a přilehlému materiálu na ošetřovaném povrchu (jenž může být stejným materiálem, materiálem podkladu či třetím materiálem) musí být přerušeny (rozbity). Každá taková vazba je přerušena zavedením množství energie, jež se alespoň rovná energii zformování této vazby. Energie formování vazeb (t.j., množství uvolněné energie, když je daná vazba zformována) pro běžné materiály podkladu jsou uvedeny v Tabulce 1a níže. Znázorněné energie vazeb jsou mezi materiálovými prvky samotnými (např., Cr-Cr) a mezi těmito materiálovými prvky a kyslíkem (např., Cr-O). Energie pro zformování vazby různých uhlíkových sloučenin jsou znázorněny v Tabulce 1b níže.

Tabulka 1 a

Prvek	Energie formování vazby (eV/vazba)	
	se sebou samotným	s kyslíkem
O		5,2
Cr	1,6	4,5
Si	3,4	8,3
Mo	4,2	5,8
Fe	1,0	4,1
Ni	2,1	4,0
Er		6,4
Zr		8,1
Ta		8,3
W		7,0

Tabulka 1b

Prvek	Energie formování vazby (eV/vazba)
C	6,3
Cl	4,1
F	5,7
H	3,5
Mo	5,0
O	11,2
Si	4,7
Zr	5,8

Určité vazby jsou přerušeny (rozbity), když energie nesená fotony na ně dopadajícími je větší velikosti, než energie jejich zformování. Má se za to, že v tomto vazby přerušujícím postupu existují energetické nedostatečnosti a, tudíž, množství potřebné fotonové energie je přibližně dvakrát takové, než energie zformování vazby. Jak je možno vidět v Tabulce 1a, energie vazeb oxidů jsou v řádu 4,0 až 8,3 eV, zatímco organické (uhlíkové) energie vazeb jsou v řádu 3,5 až 11,2 eV. Tudíž, jsou potřeba fotonové energie přibližně 7 až 22 eV.

Energie fotonu závisí na jeho vlnové délce, ve vzájemném vztahu:

$$E = \frac{hc}{l}$$

kde: c - rychlost světla ($3,00 \times 10^8$ m/s),

l (jako λ) - vlnová délka (m),

h - Planckova konstanta ($4,14 \times 10^{-15}$ eV sec).

Výběr zdroje fotonů, tudíž, závisí na potřebné vlnové délce.

V Tabulce 1c níže je uvedena rozmanitost laserů. Tato tabulka označuje dané laserové medium (a zda-li je toto medium plynem (g), tekutinou (l), tuhým tělesem (s) anebo plazmou (p)), a vlnovou délku fotonu λ (lambdou, nm), a energii fotonu E_{ph} (eV). U laserů s nepřerušovanou vlnou je rovněž uvedena průměrný výkon P_{ave} (W), a u impulsových laserů energie na jeden impuls E_{pulse} (J), trvání reprezentativního impulsu T_{pulse} (ns), a špičková energie (výkon) během jednoho impulsu P_{peak} (MW).

Tabulka 1c

Medium	λ (nm)	E _{ph} (eV)	E _{pulse} (J)	t _{pulse} (ns)	P _{ave} (W)	P _{peak} (MW)
C (6+) (p)	18	68.242	2.00E-03	50		4.00E-02
ArF excimer (g)	193	6.435	5.00E-01	50		1.00E+01
KrF excimer (g)	248	5.008	5.00E-01	34		1.47E+01
He-Cd (g)	442	2.810			1.00E-02	
Ar+ (g)	515	2.412			1.00E+01	
Rhodamine-6G dye (l)	560	2.218			1.00E-01	
	640	1.941			1.00E-01	
He-Ne (g)	633	1.962			1.00E-03	
Kr+ (g)	647	1.920			5.00E-01	
Ruby (s)	693	1.792	5.00E+00	50		1.00E+02
Ti(3+):Al ₂ O ₃ (s)	660	1.882			1.00E+01	
	1180	1.053				
Nd(3+):glass (s)	1060	1.172	5.00E+01	50		1.00E+03
Nd(3+):YAG (s)	1064	1.167			1.00E+01	
KF Color Center (s)	1250	0.994			5.00E-01	
	1450	0.857			5.00E-01	
He-Ne (g)	3390	0.366			1.00E-03	
FEL (LANL)	9000	0.138	1.00E-03	50		2.00E-02
	40000	0.031	1.00E-03	50		2.00E-02
CO ₂ (g)	10600	0.117			1.00E+02	
H ₂ O (g)	118700	0.010			1.00E-05	
HCN (g)	336800	0.004			1.00E-03	

Porovnáním fotonových energií výše uvedených laserů s požadovanými energiemi uvedenými výše pro běžné podkladové materiály (a berouce v úvahu očekávané nedostatky výkonu), je zřejmé, že ve většině případů nebude energie jediného fotonu dostatečná aby rozbila dotyčnou vazbu. Avšak, má se za to, že energie na rozbití vazby může být dodána mnohočetnými fotony, když budou dopadat na tuto vazbu v rámci velmi krátkého času, či v podstatě "simultánně".

Protože je k rozbití každé vazby potřeba jistého množství energie, celkové množství energie (a tudíž, celkové množství fotonů dané energie) potřebné k odstranění daného množství nežádoucího materiálu z povrchu ošetření podkladu je celkově úměrné k množství vazeb v tomto množství materiálu. Má se za to, že fotony vzájemně reagují s vazbami pouze v regionu rozhraní ošetřovaného povrchu (t.j., nejhornější jednou či dvěma vrstvami atomů nebo molekul (monovrstvy)).

K odstranění v podstatě spojitých vrstev materiálu (jako vrstev oxidu) je tedy užitečné uvážit plochy povrchu jednotky a tloušťky materiálu v monovrstvách. Tudíž, pro danou plochu povrchu odstranění určité tloušťky (či množství monovrstev) materiálu vyžaduje účinnou aplikaci daného množství energie (množství fotonů). Zajisté, ne všechny fotony, jež narážejí na povrch podkladu, přispívají k rozbití vazby - má se za to, že tak činí malý zlomek fotonů. Má se za to, že to je alespoň částečně proto, že efektivní umístění (vazby, či jejich částí) pro absorpci fotonové energie zaujímají malý zlomek povrchové plochy. Avšak alespoň u daného materiálu se má za to, že tam je poměrně konstantní vztah mezi skutečným množstvím potřebných fotonů a teoretickým množstvím, založeným na množství vazeb, jež mají být rozbity. Podle toho, relevantním parametrem k uvážení je tok energie (energie na jednotku plochy, či množství fotonů na jednotku plochy), aplikovaný na povrch ošetřování podkladu, jenž odpovídá tloušťce odstraňovaného nežádoucího materiálu.

Jak poznamenáno výše, existují případy, v nichž vazby zájmu vyžadují více energie, než je nesena jediným fotonem, emitovaným zvoleným zdrojem záření. Těmto vazbám se zde říká "multifotonové vazby". Jak poznamenáno výše, má se za to, že energie dvou či více fotonů jsou přídavné k dodávce energie potřebné k rozbití multifotonové vazby pouze pokud tyto fotony dopadnou na tuto vazbu simultánně. Z toho vyplývá, že příchozí dávka (intenzita) fotonů v místě vazby je výkonový proud (energie na jednotku času na jednotku plochy). Dále se má za to, že rozbíjení multifotoných vazeb má pravděpodobnostní povahu. Pro daný průměrný proud energie přes plochu podkladu existuje nějaká průměrná příchozí dávka fotonů v jakémkoli místě dané vazby. Avšak, skutečná příchozí dávka fotonů by měla být náhodně rozdělena okolo určité průměrné hodnoty. Tudíž, pokud tam bude minimální příchozí dávka

fotonů (maximální časový interval mezi danými fotony), v níž se bude dít přidávání fotonové energie k umožnění rozbití multifotonové vazby, průměrný proud výkonu aplikovaný do dané plochy, jež odpovídá této minimální příchozí dávce fotonů, bude exponovat přibližně polovinu míst vazeb v této ploše vystavených vůči požadované příchozí dávce (či větší dávce). Podle toho, i když bude průměrný proud energie (výkonu) poněkud nižší, než je potřeba k produkci minimální požadované příchozí dávky fotonů, očekává se, že fotony budou do některých míst vazeb přicházet v rámci požadovaného intervalu.

Ve shrnutí, k odstranění dané tloušťky nežádoucího materiálu s povrchu ošetření podkladu musí být aplikován minimální celkový proud energie (celkové množství fotonů dané úrovně energie na jednotku plochy) do nežádoucího materiálu. Pokud půjde o multifotonové vazby, je rovněž potřeba jistého proudu výkonu a čím vyšší bude tento proud, tím je větší šance, že místo každé vazby bude podrobeno potřebné příchozí dávce fotonů. Výběr vhodného zdroje energetických fotonů, tudíž, vyžaduje ohodnocení potřebné fotonové energie a, u multifotonových vazeb, určitý použitelný výkon. Jak je zřejmým z údajů níže uvedených, k odstranění oxidů a organických filmů (jež mají vysoké a tedy multifotonové energie vazby), přednostními fotonovými zdroji jsou tak impulsivní ultrafialové lasery, jež mají nejvyšší úrovně špičkového výkonu a vysoké fotonové energie.

Konkurenční úvahou, která omezuje energii a výkonové toky energie, jež mohou být aplikovány na ošetřovaný povrch podkladu, je potřeba předejít změnám fyzikálních vlastností materiálu, jenž má na povrchu zůstat. Obecně, změny ve fyzikálních vlastnostech nějakého materiálu jsou působeny zvyšováním jeho teploty nad prahovou úroveň. Změna v teplotě

povrchu materiálu působená aplikací sálavé energie závisí na charakteristikách přenosu tepla materiálu a proudtech výkonu a energie užitého záření. Nalezení toků maximálního výkonu a energie, použitelných na daný podkladový materiál, vyžaduje určité experimentování. Laserové čistící techniky předchozí techniky, jež spoléhají na vaporizaci, ablaci, či povrchové tavení, poskytují určité vodítko pokud jde o energii a výkonové toky potřebné k vytváření změn stavu v podkladových materiálech.

Celkově, fotony jsou přednostně směřovány kolmo k rovině části podkladu, jež je ošetřována, aby se pro daný výstup ze zdroje elektronů maximalizoval výkon a proud energie na daný povrch. Avšak fotony mohou být k danému podkladu směřovány v nějakém úhlu, jak je příhodné anebo nezbytné k provedení určitého postupu ve zvláštním prostředí. Zajisté, že energie a její výkonové toky na daném povrchu se budou měnit se sinem úhlu dopadu fotonů se zřetelem na rovinu určitého povrchu, což musí být vzato v úvahu při volbě výstupu fotonového zdroje. V některých situacích může být přednostní směřovat záření v šikmém úhlu k podkladu, za účelem přednostního ozáření a takto odstraňování výčnělků v materiálu k jeho vyhlazení.

2. Testovací zařízení

V následujících příkladech byly použity dvě soupravy testovacích zařízení (zde nazývané jako zařízení A a B).

Přístroj A je schematicky znázorněn na Obr. 2A. V tomto zařízení (na obrázku uvedeno jako 10A) je zdrojem záření laser 411, jímž je impulsový KrF excimerový laser,

prodávány firmou Lambda Physik jako model číslo LEXtra 200. Tento laser má vlnovou délku 248 nm (pro fotonovou energii 5,01 eV), maximální výstupní energii na impuls 600 mJ, a stejné trvání impulsu 34 ns (pro maximální výkon na impuls 17,65 MW). Maximální míra opakovacího kmitočtu impulsu je 30 Hz, produkující maximální průměrný výkon 18 W. Paprsek záření je na výstupu laseru 23 mm krát 13 mm.

Systém dodávající záření 450 obsahuje, v pořadí jakým prochází paprsek záření 11 po opuštění laseru 411, desku s otvorem (clonou) 452, v úhlu do 45° stupňů natočená zrcadla 453, 454, 455, a 456 a nastavitelné zaostřovací čočky 457. Deska s otvorem (clonou) 452 je plochá deska s obdélníkovým otvorem 6 mm širokým a 25 mm dlouhým, a používá se k blokování "ocasů" Gaussovo rozložení pravděpodobností fotonů vyzařujících z laseru 411 tak, že prostorová distribuce energie v paprsku záření 11 je napříč rovinou kolmou k paprsku přibližně stejnoměrná. Každé z natáčivých zrcadel 453 a 454 je 50ti milimetrové, a 455 a 456 jsou 25ti milimetrová, plošná zrcadla. Nastavitelnými, zaostřujícími čočkami 457 jsou cylindrické čočky se šířkou 25 mm, délkou 37 mm a ohniskovou délkou 75 mm. Zvolením výšky zaostřovacích čoček 457 od povrchu podkladu 12 a orientace (konkávní stranou nahoru nebo dolů) čoček, je nastavena šířka bodu paprsku na povrchu podkladu. Všechny optické prvky jsou s antireflexní vrstvou pro světlo 248 nm.

Systém dodávání 450 druhého zařízení, zařízení E (znázorněného na Obr. 2B), je identický s tím u zařízení A, s výjimkou, že první natáčivé zrcadlo 453 je vynecháno (a laser 411 a deska s otvorem 452 jsou podle toho přeorientovány o 90° , aby směřovaly přímo směrem k natáčivému zrcadlu 454) a natáčivé zrcadlo 455 je 50ti mi-

limetrové (spíše než 25ti milimetrové jako v zařízení A). Třetí zařízení (nepoužité v příslušných pokusech) s jednodušší (a tudíž přednostní) optickou soustavou je znázorněno na Obr. 2C.

Paprsek záření 11 je dodáván přibližně kolmo k plošině 610, na níž je upevněn podklad 12. Jak je znázorněno na Obr. 3, plošina 610 může být posunuta ve směrech X a Y (kolmých k rovině plošiny a označených na Obr. 3 pomocí šipek X a Y). Paprsek záření 11 produkuje celkově obdélníkový dopadový region záření 611, se šířkou W a délkou I. Region 611 je unášen přes povrch podkladu 12 pomocí posouvání (translací) plošiny 610.

Systém dodávání plynu 500 obsahuje Dewarovu nádobu tekutého dusíku (s objemem 4 500 l), spřaženou v serii k: dvojstupňovému regulátoru, adsorbéru vlhkosti/kyslíku (MG Industries Oxisorb, jenž adsorbuje do koncentrací 0,01 ppb), filtru částic značky Millipore Model 304 (filtry do 0,003 μ m), průtokoměr, americký filtr Filter MembraloX (filtry do 0,001 μ m), a tudíž k hubici 551 končící přilehle regionu 611. Hubice 551 vypouští proud plynu 18 přes region 611 a zůstává fixovanou se zřetelem k regionu 611 tak, že plošina 610 a podklad 12 vykonávají se zřetelem k ní translační pohyb. Tento systém dodávání plynu je užitečný pro materiály, jež nejsou citlivé vůči typickým atmosférickým plynům, a dovoluje jednodušší zařízení, než je požadováno anebo když je požadováno nebo žádoucí izolovat daný podklad během ošetřování od atmosféry (tak jak je uvedeno v mateřské přihlášce).

Videokamera 700 je umístěna aby sledovala region 611 a tak poskytovala vizuální údaje o výsledcích ošetření.

V ilustrovaném ztvárnění je plošina 610 nejprve

posunuta podélně ve směru X když je paprsek záření 11 aplikován na povrch podkladu 12, produkující protažený pruh záběru 612 na podkladu 12, jenž byl (je) vystaven paprsku záření 11. Plošina 610 může být vrácena zpět do výchozí polohy a posunuta ve směru X znova, takže paprsek záření 11 provádí další "přechod" nad pruhem 612. Po jednom či více přechodech může být plošina 610 být posunuta laterálně ve směru Y o vzdálenost přibližně se rovnající délce l, pak posunována znova směrem X ke zformování dalšího pruhu záběru přilehlému k předcházejícímu pruhu 612. Tudiž, část povrchu podkladu 12 k ošetření je sekvenčně exponována paprsku záření 11 a souběžnému proudu plynu 18.

Proud energie (energie na jednotku plochy) aplikovaný na jakýkoli bod na povrchu podkladu 12 pomocí paprsku záření 11 během jediného impulsu laseru 411 se rovná energii impulsu na povrchu děleno plochou, na níž je tato energie distribuována. Toto může být vyjádřeno vzorcem jako:

$$F_{eps} = \frac{E_{ps}}{l \cdot w}$$

- kde: - F_{eps} je proud energie impulsu na jednotku plochy na povrchu (J/cm^2),
 - E_{ps} je energie impulsu na povrchu (J), a
 - l a w jsou délka a šířka regionu 611 (cm).

Podobně tak může být vypočítán tok výkonu impulsu (F_{pps}) jako:

$$F_{pps} = \frac{E_{eps}}{t_p}$$

kde t_p je trvání impulsu laseru.

S průchodem paprsku záření 11 skrze optiku a desku s otvorem (clonou) jsou spojeny ztráty energie. Tudíž, energie impulsu laseru na povrchu (E_{ps}) je menší, než emitovaná energie impulsu laseru. Laser LEXtra 200 obsahuje mikroovládač s měřičem energie impulsu, jenž je užitečný pro zaznamenávání výkonu laseru během pokusů. Avšak, vnitřní měřič není příliš přesný. K zajištění přesnějších měření energie byl testovací přístroj kalibrován aby aplikoval opravný faktor k vnitřnímu měření za účelem produkce přesnějších hodnot. Podle toho byla měřena energie impulsu laseru na povrchu (E_{ps}) pomocí detektorové hlavy Molelectron J50 a joulemetru JD 1000, uspořádanými v umístění ošetřovaného povrchu, a hodnota měřené energie porovnávána s hodnotou vnitřního měřiče energie impulsu (E_{pm}). Takto byl zpracován opravný faktor ($R_{correction}$), jenž obsahoval jak ztráty skrze optickou soustavu, tak nepřesnosti měřiče.

$$E_{ps} = E_{pm} \cdot R_{correction}$$

Tento korektivní faktor není konstantní - bylo zjištěno, že se mění přibližně s úrovní výstupu laseru. Energie impulsu závisí na vstupu napětí (V_i) do laseru, jež může být nastaveno na úrovně mezi přibližně 17 a 22 kV.

Výstupní energie laseru (jak uvedena vnitřním měřičem) se mění pro nastavení dané voltáže, v závislosti na takových faktorech jako je úroveň dodávky plynu laseru, takže toto napětí nemůže být použito přímo jako měřítko energie impulsu, ale namísto toho je čten vnitřní měřič. Pro pohodlí je korektivní faktor vypočítán jako funkce nastavení napětí, pak aplikován na hodnotu energie uvedenou vnitřním měřičem. Korektivní faktor má podobu:

$$R_{\text{correction}} = \frac{1}{m \cdot V_1 + b}$$

kde m je zkosení, a b je úsekem na souřadné ose lineárního vztahu.

Hodnoty m a b pro obě testovací zařízení jsou uvedeny v Tabulce 2a, níže.

Tabulka 2a

Faktor	Zařízení A	Zařízení B
b	1,20	0,74
m	0,029	0,066

Tudíž, energie per impuls na povrchu ošetřování je:

$$E_{ps} = \frac{E_{pm}}{m \cdot V_1 + b}$$

Ve znázorněném ztvárnění je pruh záběru 612 zformován ze serie diskrétních regionů 611 (jak označeny na Obr. 3 druhým regionem 611^I, znázorněným v náznaku). Vzdálenost, kterou je region 611^I odsazen od regionu 611 (delta X) je produktem (součinem) času mezi laserovými impulsy (což je inverze míry opakovacího kmitočtu impulsu laseru RI) a rychlosti translace (posunu) plošiny 610 (rychlost skenování v_s). Proud energie dodávaný do daného bodu podkladu je tudíž součinem proudů energie per impuls (F_{eps}) a množství laserových impulsů, jimž je daný bod vystaven (N_{pI}). Počet impulsů N_{pI} se rovná šířce w regionu 611 děleno vzdáleností delta X co se plošina posune mezi impulsy. Ovšem pokud w nebude integrální násobek delty X, a každý bod musí přijmout počet celého čísla počtu impulsů, ne každý bod přijme tentýž počet impulsů. Avšak, výše načrtnutý stav je přiměřeně přesný ke stanovení průměrné energie aplikované přes každý pruh záběru 612. Dále, spíše než indexování plošiny do strany před zahájením dalšího pruhu záběru 612, plošina může být ponechána ve stejné laterální poloze, a ještě jeden záběr 612 aplikován na stejném místě, takto čině ještě jeden "přechod" nad daným podkladem. Celkový proud energie (F_{et}) se tedy rovná proudu energie per přechod (F_{epa}) krát množství přechodů (N_{pa}).

Průměrný proud energie aplikovaný na povrch podkladu 12 může být tudíž vypočten podle následujícího vzorce jako:

$$F_{epa} = \frac{F_{eps} \cdot R_1 \cdot w}{V_s}$$

Celkový proud energie aplikovaný do daného bodu je získán násobením proudu energie per přechod (F_{epa}) počtem přechodů:

$$F_{et} = F_{epa} \cdot n_{pa}$$

V údajích experimentů prezentovaných dále, jsou dané testovací parametry označeny tak, jak je uvedeno v Tabulce 2b, níže.

Tabulka 2b

Parametr	Popis	Jednotky
Epm	Energie impulsu (měřič)	mJ
Eps	Energie impulsu (skutečná na povrchu)	mJ
Feps	Proud energie per impuls (na povrchu)	J/cm ²
Fpps	Proud výkonu per impuls (na povrchu)	MW/cm ²
Fepa	Průměrný proud energie per přechod	J/cm ²
Fet	Celk. proud energie (za celk. poč. přechodů)	J/cm ²
I	Délka regionu 611	mm
Npl	Efektivní počet impulsů dopadajících na bod	--
Npa	Počet přechodů	--
Rg	Intenzita dodávky plynu	ml/s
RI	Opakovací kmitočet laseru	s ⁻¹
vs	Rychlost skenování laseru	km/s
VI	Napětí laseru	KV
W	Šířka regionu 611	mm

Ve všech testech činila intenzita toku nitrogenového plynu přes ošetřovaný povrch mezi 250 a 500 ml/s.

3. Příklady odstraňování tenkých vrstviček (filmů) oxidace

Aplikace způsobu základního ošetření a zařízení popsané výše s ohledem na filmy oxidace je znázorněno v následujících příkladech. V každém příkladě byla provedena řada ošetřovacích "běhů" zařízení na jednom anebo více vzorcích oxidovaných podkladových materiálů. Každý běh se skládal z ošetření jediného pruhu záběru 612 na ošetřovaném povrchu, s jedním nebo více přechody na tomto pruhu. Pokud není poznamenáno jinak, dané vzorky byly ošetřovány na planárním povrchu (jako je plochá strana terčů pokovovaných rozprašováním kovů).

Účinnost ošetření je roztržena podle stupnice šesti bodů intenzity čištění (Rc), jež je vysvětlena v Tabulce 3a, níže.

Tabulka 3a

RC	Význam
1	Úplné odstranění
2	Potřebný dodatečný přechod
3	Potřebných více přechodů
4	Špatné odstranění žádá změnu podmínek postupu
5	Okrajový soubor stavů
6	Žádné odstranění

V těchto testech bylo cílem odstranit všechn oxid v tak málo přechodech, jak jen to je možné (přednostně jediným přechodem) a při nejvyšší možné rychlosti plošiny, bez poškození povrchu ošetření. To odpovídá maximální rychlosti zpracování u komerční aplikace - ošetření podkladu v nejkratším možném čase. Jak pojednáno výše, má se za to, že klíčovými faktory postupu jsou proud energie per impuls (Feps), přímo vztažený (fixním trváním impulsu 34 ns) proud výkonu per impuls (Fpps), a celkový proud energie (Eft). Tyto faktory zpracování byly měněny upravováním energie impulsu (Eps), opakovacího kmitočtu impulsu laseru (Rl), rychlosti plošiny (Vs) a šířky dopadového regionu (w).

a. Chromem pokovovaný terč

V tomto případě byl okysličený terč chromového pokovování ošetřován pomocí přístroje A. Terč pokovování naprašéním kovu (jako ostatní terče pokovování použité v pokusech níže popsaných, byl přibližně 21 cm dlouhý, a nepatrně oválného tvaru, s maximální šířkou 9 cm. Byla provedena serie devíti běhů zařízení, jejichž výsledky jsou shrnuty v Tabulce 3b níže.

Tabulka 3b

Běh	VI	Epm	Eps	Rl	vs	l	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Rc
2	18	275	143	20	5	23	2.90	0.21	6.3	11.6	2.48	1	2.48	žádné odstr. pozorov.	6
3	18	273	142	30	5	23	2.90	0.21	6.2	17.4	3.69	1	3.69	jako B2, změna param.	6
4	18	279	145	30	5	23	2.05	0.31	9.0	12.3	3.78	1	3.78	žádné odstr. pozorov.	6
5	19	348	175	30	5	23	2.05	0.37	10.9	12.3	4.55	1	4.55	žádné odstr. pozorov.	6
6	20	390	189	30	5	23	2.05	0.40	11.8	12.3	4.94	1	4.94	okraj/úzká šířka	5
7	20	390	189	30	5	23	0.90	0.91	26.9	5.4	4.94	1	4.94	odstraněno	1
8	19	348	175	30	5	23	0.90	0.84	24.8	5.4	4.55	1	4.55	odstraněno	1
9	19	351	176	30	10	23	0.90	0.85	25.0	2.7	2.30	1	2.30	odstr. ale s vyšší E	5
10	20	396	192	30	7	23	0.90	0.93	27.3	3.9	3.58	1	3.58	odstr./otisky prstů	1

Tyto údaje naznačují, že proud energie (výkon) per úroveň impulsu aplikovaný v běžích zařízení překlenul prahovou úroveň u multifotonových vazeb. Dobré odstraňování bylo dosaženo u hodnot F_{pps} větších než přibližně 12 MW/cm^2 , i pro konstantní hodnoty F_{epa} (například, z běhů 5 až 7), a pak u nižších hodnot F_{epa} (například, z běhů 8 až 10).

b. Erbiem pokovovaný terč

V tomto případě byl okysličený terč pokovování erbiem ošetřován přístrojem B. Výsledky jsou shrnuty v Tabulce 3c níže.

Tabulka 3c

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fel	Poznámky	HC
1	18	303	157	20	5	23	290	0.24	6.9	11.6	2.73	1	2.73	modr.ox.zůst.po 1pře.	1
1a	18	303	157	20	5	23	290	0.24	6.9	11.6	2.73	1	2.73	2 passes made, 1 sufficient	1
2	19	364	178	20	10	23	290	0.27	7.8	5.8	1.54	1	1.54	1pře. odstranil ox.	1
3	20	390	192	20	15	23	290	0.29	8.5	3.9	1.12	1	1.12	1pře. odstranil ox.	1
5	20	414	201	20	20	23	290	0.30	8.9	2.9	0.87	1	0.87	1pře. odstranil ox.	1
6	20	414	201	20	25	23	290	0.30	8.9	2.3	0.70	1	0.70	1pře. odstranil ox.	1
7	20	423	205	30	50	23	290	0.31	9.1	1.7	0.54	1	0.54	form. difrakční vzor	5

Má se za to, že pozorovaný modrý oxid je oxidem erbia či jiným vedlejším produktem vzájemné reakce terče pokovování. Všechny běhy zařízení byly prováděny se stejnou šířkou paprsku 2,9 mm, zatímco běh od běhu byla energie impulsu laseru Eps (a takto proud výkonu impulsu Fpps) nepatrně zvyšována a rychlost skenování zvyšována významně. První dva běhy produkovaly částečné čištění, zatímco následné běhy (při nepatrně vyšších hodnotách Fpps přibližně 8 MW/cm^2) produkovaly dobré čištění, s následnými nižšími úrovněmi

celkového proudu energie F_{et} , s $0,7 \text{ J/cm}^2$, stále ještě zajišťovaly dobré odstraňování. To opět naznačuje, že mezi běhy 2 a 3 je překročena prahová hodnota multifotonové vazby u F_{pps} .

V běhu 7 byla rychlost V_s plošiny zvýšena na 50 mm/s ve snaze omezit celkový proud energie na úroveň příliš malou aby odstranila daný oxid. Tento běh produkoval "difrakční" (ohyb, odchylku působící) vzor linií reziduálního oxidu ve směru X , naznačuje, že regiony kde zůstal oxid nebyly před tím vystaveny tímž energetickým či výkonovým proudům jako mezilehlé, vyčištěné regiony. Ačkoli rychlost nebyla tak velká, aby se za sebou následující dopadové regiony (611) nepřekrývaly (při opakovacím kmitočtu laseru $30/\text{s}$, podklad se pohyboval mezi impulsy nějakou vzdáleností ($1,6 \text{ mm}$), jež je menší než šířka dopadového regionu ($2,9 \text{ mm}$), pozorovaný účinek může naznačovat Gaussovo rozdělení pravděpodobností fotonů přes rozměr X dopadového regionu 611.

c. Zirkonem pokovovaný terč

V tomto případě byl okysličený terč pokovování erbiem ošetřován pomocí přístroje B. Výsledky jsou shrnuty v Tabulce 3d níže.

Tabulka 3d

Běh	VI	Epm	Eps	Ri	vs	I	w	Feps	Fpps	Npi	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Rc
1	18	279	145	20	3	23	290	0.22	6.4	19.3	4.19	1	4.19	1přechod odstranil	1
2	18	279	145	20	5	23	290	0.22	6.4	11.6	252	1	252	1přechod odstranil	1
3	18	279	145	20	5	23	290	0.22	6.4	11.6	252	2	5.03	2přechody, 1 stačí	1
4	19	366	184	20	5	23	290	0.28	8.1	11.6	3.19	1	3.19	1přechod/čistil	1
5	19	366	184	20	8	23	290	0.28	8.1	7.3	2.00	1	2.00	1přechod odstranil	1
6	19	366	184	20	10	23	290	0.28	8.1	5.8	1.60	1	1.60	1přechod odstranil	1
7	20	417	202	20	15	23	290	0.30	8.9	3.9	1.17	1	1.17	1přechod odstranil	1
8	20	417	202	20	20	23	290	0.30	8.9	2.9	0.88	1	0.88	1přechod odstranil	1

Jako u předchozího případu byly všechny běhy zařízení prováděny se stejnou šířkou paprsku 2,9 mm, zatímco běh od běhu byla energie impulsu laseru Eps (a takto proud výkonu impulsu Fpps) nepatrně zvyšována a rychlost skenování zvyšována významně. Každý běh produkoval dobré čištění, se za sebou jdoucími nižšími úrovněmi proudu celkové energie, s přibližně $0,9 \text{ J/cm}^2$ stále ještě zajišťující dobré odstraňování.

d. Tantalový držák

V tomto případě byl okysličený válcový tantalový držák ošetřován pomocí přístroje B. Protože byl držák cylindrický, představoval pro ošetření zakřivený povrch, a lineární translační kapacita plošiny nebyla přiměřená k vyrovnanému skenování regionu dopadu 611 paprsku hladce na povrchu. Podle toho byl držák ručně rotován rychlostí, při níž se regiony dopadu nepřekrývaly. Údaje uvedené v Tabulce 3e níže se tudíž týkají izolovaných dopadových regionů.

Tabulka 3e

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	W	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fel	Poznámky	Hc
1	19	315	158	30	m	23	0.57	1.20	35.4	1	1.20	1	1.20	odstr.ox.,urč.pošk.	5
2	19	291	148	30	m	23	0.57	1.13	33.3	1	1.13	1	1.13	odstr.ox.,urč.pošk.	5
3	18	264	137	30	m	23	0.57	1.04	30.7	1	1.04	1	1.04	odstr.ox.,urč.pošk.	5
4	18	267	138	30	m	23	1.2	0.50	14.8	1	0.50	1	0.50	odstr.ox.,žád.pošk.	1
5	19	327	164	30	m	23	1.2	0.59	17.5	1	0.59	1	0.59	odstr.ox.,žád.pošk.	1
6	20	361	173	30	m	23	1.2	0.63	18.5	1	0.63	1	0.63	odstr.ox.,žád.pošk.	1
7	20	414	201	30	m	23	1.2	0.73	21.4	1	0.73	1	0.73	odstr.ox.,žád.pošk.	1

Uvedená data znázorňují, že proud energie přibližně $0,5 \text{ J/cm}^2$ je přiměřený k odstranění filmu oxidu tantalu s tantalového podkladu. Při proudu výkonu více než přibližně 22 MW/cm^2 (v bězích 1-3) bylo produkováno určité setrvávající poškození v tom, že bylo pozorováno černání povrchu podkladu.

e. Tungstenový kelímek

V tomto případě byl oxidovaný tungstenový kelímek ošetřován pomocí zařízení B. Kelímek byl přibližně 10 cm dlouhý a 2,5 cm široký protaženého vydutého tvaru (přibližně semi-cylindrický v ošetřovaném regionu). Údaje uvedené v Tabulce 3f níže obsahují běhy zařízení 1-3 na vnitřním povrchu (konkávní) a 4-7 na vnějšku (konvexní).

Tabulka 3 f

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fel	Poznámky	Rc
1	19	330	165	30	5	23	0.63	1.14	33.6	3.8	432	1	432	1 přechod odstranil	1
2	19	330	165	30	5	23	0.63	1.14	33.6	3.8	432	2	8.63	1 přech. odst.+prov.2.	1
3	19	330	165	30	8	23	0.63	1.14	33.6	2.4	270	1	270	1 přechod odstranil	1
4	21	414	195	30	8	23	0.63	1.34	39.5	2.4	317	1	317	1 přechod odstranil	1
5	21	405	190	30	12	23	0.63	1.31	38.7	1.6	207	1	207	1 přechod odstranil	1
6	22	438	200	30	15	23	0.63	1.38	40.6	1.3	174	1	174	1 přechod odstranil	1
7	22	429	196	30	20	23	0.63	1.35	39.7	0.9	128	1	128	1 přechod odstranil	1

Tyto údaje znázorňují, že oxid tungstenu může být odstraňován při proudu energie tak nízké jako je přibližně $1,3 \text{ J/cm}^2$, ačkoli podklad není poškozen při intenzitách toku výkonu vysokých až přibližně 41 MW/cm^2 .

f. Masky ze slitiny molybdénu

V tomto případě byly ošetřovány tři oxydované masky (použité při výrobě svazkovacích ploch drátového vzoru křemíkových čipů), vyrobené ze slitiny molybdénu, pomocí přístroje A. Údaje z ošetření těchto masek jsou shrnuty v Tabulce 3g níže.

Tabulka 3g

Běh	VI	Epm	Eps	HI	Vs	I	W	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Hc
Vzorek 1 = maska 125 mm															
4	22	528	285	30	5	23	1.3	0.95	28.1	7.8	7.45	2	14.89	2 přechody potřeba	2
5	22	528	285	30	2	23	1.3	0.95	28.1	19.5	18.62	2	37.23	2 přechody potřeba	2
6	20	450	251	30	2	23	1.3	0.84	24.7	19.5	16.39	2	32.77	2 př. potř., hněd. rezid.	4
7	18	324	187	30	2	23	1.3	0.63	18.4	19.5	12.20	2	24.40	2 přechody potřeba	4
8	20	528	295	30	5	23	1.3	0.99	29.0	7.8	7.69	2	15.38	2 pře. potř., žád. rezid.	2
9a	20	528	295	30	2	23	1.3	0.99	29.0	19.5	19.23	1	19.23	1 přech., hněd. rezid.	4
9b	20	528	295	30	5	23	1.3	0.99	29.0	7.8	7.69	2	15.38	2 přechody potřeba	2
Vzorek 2 = maska 82 mm															
1	22	525	284	30	2	23	0.6	2.06	60.5	9.0	18.51	1	18.51	1 přechod odstranil	1
Vzorek 3 = maska 82 mm															
1	22	525	284	30	5	23	0.6	2.06	60.5	3.6	7.40	1	7.40	1 přechod odstranil	1

Bylo potřeba vyšších proudů celkové energie (Fet), aby se odstranila oxidace z větší masky použité jako vzorek 1, než z ostatních dvou masek. Na první masce ošetření v bázích 6 a 9a zanechalo nahnědlé reziduum, jež může naznačovat poškození zbývajícího materiálu. Dané údaje též naznačují, že Fpps nepřekročil u vzorku 1 prahovou energii (výkon) multifotonové vazby (kde byl Fpps byl menší než přibližně 30 MW/cm², ale opravdu překročil tuto prahovou hodnotu u vzorků 2 a 3. (Fpps přes přibližně 60 MW/cm²).

g. Ocelové pravítko

V tomto případě bylo oxidované ocelové pravítko ošetřováno pomocí přístroje A. Výsledky tohoto ošetření jsou shrnuty v Tabulce 3h níže.

Tabulka 3h

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npi	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Hc
1	17	168	99	30	1	23	3	0.14	4.2	90.0	12.87	1	12.87	odstraněno	1
2a	17	180	106	30	5	23	3	0.15	4.5	18.0	2.76	1	2.76	částečné odstranění	3
2b	18	303	175	30	5	23	3	0.25	7.5	18.0	4.56	1	4.56	částečné odstranění	3
2c	20	441	246	30	5	23	3	0.36	10.5	18.0	6.42	1	6.42	odstraněno	2
3	19	387	220	30	3	23	3	0.32	9.4	30.0	9.55	1	9.55	odstraněno	1
4	19	396	225	30	10	23	3	0.33	9.6	9.0	2.93	1	2.93	odstraněno	1
5	19	396	225	30	20	23	3	0.33	9.6	4.5	1.47	1	1.47	odstraněno málo	4
6	19	385	219	30	15	23	3	0.32	9.3	6.0	1.90	1	1.90	částečné odstranění	3
7	19	390	221	30	12	23	3	0.32	9.4	7.5	2.41	2	4.81	přechody stačily	2

Příslušné údaje naznačují, že prahová hodnota výkonu proudu u multifotonové vazby byla překročena mezi běhy 2b a 2c-7 (takto jsou mezi přibližně 7,5 a 9,3 MW/cm²). Dále, ačkoli Fpps byl dostatečně vysoký v bězích 5-7, celkový proud energie Fet nebyl dostatečně vysoký (při přibližně 1,5 až 1,9 J/cm²), aby odstranil všechn oxid.

h. Slitinou niklu/železa pokovovaný terč

V tomto případě byl tento pokovovaný terč ošetřován zařízením B. Terč pokovování naprášením byl vytvořen ze slitiny niklu a 19% železa. Výsledky tohoto ošetření jsou shrnuty v Tabulce 3i níže.

Tabulka 3i

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	W	Feps	Fpps	Npl	Feoa	Noa	Fet	Poznámky	Rc
1	18	267	138	30	7	23	0.9	0.67	19.7	39	2.58	2	5.16	2přechody odstr. vše	2
3	20	354	175	30	7	23	0.9	0.84	24.8	39	3.25	2	6.51	2přechody odstr. vše	2
4	20	354	175	30	7	23	0.9	0.84	24.8	39	3.25	3	9.76	3přechody odstr. vše	3
5	20	363	176	30	10	23	0.9	0.85	25.0	27	2.30	3	6.90	3přechody odstr. vše	3
7	20	387	188	30	12	23	0.9	0.91	26.7	23	2.04	4	8.17	4přech., růž. povrch	5
8	20	375	182	30	12	23	2.5	0.32	9.3	6.3	1.98	2	3.96	2přechody odstr. vše	2
9	20	387	188	30	15	23	2.5	0.33	9.6	5.0	1.63	1	1.63	1přechod odstr. vše	1
10	21	426	200	30	20	23	2.5	0.35	10.2	3.8	1.31	1	1.31	1přechod odstr. vše	1

V bězích 1, 3, 4, 5 a 7 byla pozorována při ošetřování narůžovělá světelná interakce, a v běhu 7 byl povrch ponechán s lehce narůžovělým nádechem. Jedním možným vysvětlením je, že podklad byl během ošetřování poškozen při vyšším toku výkonu impulsu přibližně 20 až 26 MW/cm². Alternativně, vyšší proudy mohly indukovat změnu ve složení vrstvy oxidu na sloučeninu, jež je obtížněji odstranitelná (t.j., s vyššími energiemi vazby). Toto je v souladu s pozorováním, že byl potřebný větší proud celkové energie v těchto bězích, aby se odstranila celá vrstva oxidu. V protikladu s tím, v bězích 8-10 byly nižší impulsové výkonové toky v rozmezí přibližně 9 až 10 MW/cm² přiměřené k odstranění oxidace (s přibližně 1,3 či více J/cm² proudu celkové energie Fet).

i. Pásek niklové slitiny

V tomto případě byl ošetřován pásek niklové slitiny pomocí zařízení A. Tato niklová slitina měla nestanovené složení. Údaje z tohoto ošetření jsou shrnuty v Tabulce 3j níže.

Tabulka 3j

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Hc
1	20	397	224	30	2	23	0.5	1.94	57.2	10.0	19.44	1	19.4	1přechod	5
2	22	485	262	30	2	23	0.5	2.28	67.1	10.0	22.80	1	22.8	1přechod	5
3	22	489	264	30	2	23	0.5	2.30	67.6	10.0	22.99	1	23.0	1přechod	5
4	22	489	264	30	1	23	0.5	2.30	67.6	15.0	34.48	3	103.4	3přech., hnědé rezid.	5
5	19	378	215	30	1	23	0.5	1.87	54.9	15.0	27.99	1	28.0	1přech., část odstr.	5
7	20	414	231	30	1	23	0.82	1.23	36.1	24.6	30.15	7	211.1	7pr., odstr. po vrstv.	2
6a	20	438	243	30	1	23	0.82	1.29	38.0	24.6	31.74	1	31.7	1pr., část odstranění	3
6b	21	462	254	30	1	23	0.82	1.35	39.6	24.6	33.10	1	33.1	1pr., ox. zůst. (6a)	2

Vizuální pozorování běhu 4 odhalilo zahnědlé reziduum, možná naznačující poškození zbývajícího materiálu. Vizuální kontrola běhu 7 mezi přechody naznačila, že oxid byl při každém přechodu odstraňován inkrementálně (přírůstkově). Dále se zdá, že prahová hodnota toku energie (výkonu) multifotonové vazby je přibližně 50 MW/cm² - určitého čištění bylo dosaženo při nižších hodnotách Fpps, ale k odstranění veškerého oxidu bylo třeba vyšších hodnot Fet.

j. Měděné pence

V tomto případě byly ošetřovány oxidované americké pence (měďáky) pomocí zařízení B. Byly ošetřeny tři pence, s jedním během provedeným na každé lícni a reversní straně každé pence (běhy jsou spárovány pro každou penci - běhy 1 a 2 jsou pro stejnou penci, 3 a 4 pro příští penci atd.). Údaje z ošetření pencí jsou shrnuty v Tabulce 3k níže.

Tabulka 3k

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Hc
1	20	348	169	30	5	23	2.1	0.35	10.3	12.6	4.41	4	17.6	odstr. ve 4 přech.	3
2	18	243	126	30	5	23	2.1	0.26	7.7	12.6	3.29	4	13.2	odstr. ve 4 přech.	3
3	19	306	153	30	5	23	2.1	0.32	9.3	12.6	4.00	15	60.0	15přech./patina VG	3
4	20	351	170	30	5	23	2.1	0.35	10.4	12.6	4.44	30	133.3	30přech./patina VG	3
5	20	348	169	30	5	23	1.1	0.67	19.6	6.6	4.41	15	66.1	15přech./patina VG	3
6	20	348	169	30	5	23	1.1	0.67	19.6	6.6	4.41	15	66.1	poškoz./15 přech.	6

Tyto údaje znázorňují efektivní odstraňování měděného oxidu v úrovních tokového výkonu impulsu přibližně 8 až 20 MW/cm² (vyžadujících celkové energie přibližně 13 až 130 J/cm² k odstranění téměř veškerého oxidu), zatímco proudy s vyšším výkonem impulsu (20 MW/cm² v běhu 6) mohou poškodit povrch.

k. Čtvrtdolar z niklové slitiny

V tomto případě byly ošetřovány oxidované americké čtvrtdolarové mince (s povrchovou vrstvou niklové slitiny) pomocí zařízení B. Byly ošetřeny dva čtvrtáky, s jedním během provedeným na každé lícni a reversní straně každého čtvrtáku (jako výše, běhy 1 a 2 jsou pro dvě strany jedné mince, a 3 a 4 pro druhou). Údaje z ošetření těchto čtvrtáků jsou shrnuty v Tabulce 31 níže.

Tabulka 31

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	I	w	Feps	Fpps	Npl	Fepa	Npa	Fet	Poznámky	Hc
1	21	384	181	30	5	23	21	0.37	11.0	126	4.71	2	9.4	1 přech. odstr., stačí	1
2	21	378	178	30	5	23	21	0.37	10.8	126	4.64	4	18.6	odstr. ve 4 přech.	3
3	21	348	164	30	5	23	21	0.34	10.0	126	4.27	3	12.8	odstr. ve 3 přech.	3
4	21	348	164	30	5	23	21	0.34	10.0	126	4.27	3	12.8	odstr. ve 3 přech.	3

Tyto údaje znázorňují, že vrstva oxidu na povrchu niklové slitiny těchto čtvrtáků byla efektivně odstraňována v tocích výkonu impulsu přibližně 10 až 11 MW/cm², v 1 až 4 přechodech přístroje.

4. Odstraňování tenkých organických vrstviček (filmů)

Aplikace způsobu ošetření a zařízení popsané výše s ohledem na organické filmy je znázorněna v následujících příkladech. Pokud není uvedeno jinak, tyto testy byly prováděny stejným způsobem a údaje zobrazeny ve stejném formátu a jednotkách jako u příkladů odstraňování filmů oxidace. Všechny testy byly vedeny se zařízením A.

a. Nátěr na nerezavějící oceli

V tomto příkladu nerezavějící ocelový disk (kotouč) 304 s povrchovou úpravou Ra 20 byl opatřen pláštěm (pomocí nástřiku) tradičního nátěru na kovové aplikace (v tomto případě nátěrem prodáváním pod značkou "RUSTOLEUM"). Výsledky ošetření jsou sumarizovány v Tabulce 4a níže.

Tabulka 4a

Běh	VI	EDM	EPS	RI	VS	I	W	F _{eps}	F _{pps}	N _{pl}	F _{epa}	N _{pa}	F _{el}	Poznámky	HC
1	18	318	183	30	3	23	1.00	0.80	23.4	10.0	7.97	2	15.9	2 přechody	2
3	18	315	182	30	3	23	1.00	0.79	23.2	10.0	7.89	2	15.8	2 přechody	2
5	22	501	271	30	3	23	1.00	1.18	34.6	10.0	11.78	3	35.3	3 přechody	3
8	18	318	184	30	1	23	1.00	0.80	23.5	30.0	23.95	2	47.9	2 přechody	2
9	18	318	184	30	1	23	3.00	0.27	7.8	90.0	23.95	7	167.6	7 přechodů	34
10	22	510	276	30	3	23	3.00	0.40	11.8	30.0	11.99	2	24.0	2 přechody	2
11	22	510	276	30	2	23	3.00	0.40	11.8	45.0	17.98	2	36.0	2 přechody	2
12	22	516	279	30	2	23	3.00	0.40	11.9	45.0	18.19	2	36.4	2 přechody	2
13	22	522	282	30	2	23	3.00	0.41	12.0	60.0	24.54	1	24.5	1 přechod odstranil	1
14	22	522	282	30	2	23	3.00	0.41	12.0	52.9	21.65	1	21.7	1 přechod odstranil	1
15	22	522	282	30	2	23	3.00	0.41	12.0	56.3	23.01	1	23.0	1 přechod odstranil	1
16	22	522	282	30	2	23	2.10	0.58	17.2	39.4	23.01	1	23.0	1 přechod odstranil	1
17	22	522	282	30	3	23	2.10	0.58	17.2	21.0	12.27	3	36.8	3 přechody	3
18	22	522	282	30	2	23	3.00	0.41	12.0	50.0	20.45	1	20.4	1 přechod odstranil	1

Tyto údaje naznačují, že z podkladu z nerezavějící oceli může být efektivně odstraněn poměrně tlustý organický

film, bez žádného pozorovaného poškození podkladu. Zdá se, že film nátěru potřeboval celkový proud energie (F_{et}) alespoň přibližně 16 J/cm^2 , a více celkové energie (167 J/cm^2) při proudu s nižším výkonem impulsu (přibližně 8 MW/cm^2 v běhu 9). Toto může rovněž naznačovat prahovou hodnotu toku výkonu mezi 8 a 12 MW/cm^2 .

b. Organické filmy na křemenném nosiči plátku

V tomto případě byly aplikovány různé organické vrstvičky (filmy) na povrch jednoho celkově válcového, šterbinového, křemenného nosiče (člunkového tvaru) plátku (používaného k přepravování polovodičových plátek skrze pece).

Byly aplikovány tři typy organických filmů: otisky prstů (maz lidského těla), nátěr (modrý a červený), a fix v tubě ("magic marker"). Křemenný nosič plátku byl poté ošetřován pomocí zařízení A.

Príslušné výsledky tohoto ošetření jsou sumarizovány v Tabulce 4b níže, na následující straně.

c. Organické filmy na křemenném okně z taveného křemene

V tomto případě byly aplikovány různé organické filmy na povrch celkově plochého, optického křemenného okna z taveného křemene. Byly aplikovány dva typy organických filmů: otisky prstů (maz lidského těla) s a bez dodatečného prachu a modrý nátěr. Okno pak bylo ošetřeno pomocí zařízení A.

Výsledky tohoto ošetření jsou sumarizovány v Tabulce 4c níže, na straně 40.

Tabulka
4b

Běh	V	I	Ep	Ep	H	I	VS	I	W	Fep	Fp	Np	Np	Fel	Poznámky	HC
Vzorek 1 = otisk prstů																
7	18	388	224	30	3	23	4.4	0.22	6.5	44.0	9.74	2	19.48	reziduální zbytek		2
8	18	285	165	30	2	23	4.4	0.16	4.8	66.0	10.73	2	21.46	reziduální zbytek		2
9	20	386	221	30	2	23	4	0.24	7.1	60.0	14.42	2	28.84	reziduální zbytek		2
10	22	450	243	30	2	23	4	0.26	7.8	60.0	15.87	1	15.87	otisk prstů odstraněn		1
12	18	273	158	30	1	23	2.2	0.31	9.2	66.0	20.56	1	20.56	otisk prstů odstraněn		1
13	18	273	158	30	3	23	2.2	0.31	9.2	22.0	6.85	2	13.71	reziduální zbytek		2
15	18	273	158	30	2	23	2.2	0.31	9.2	33.0	10.28	1	10.28	otisk prstů odstraněn		1
Vzorek 2 = nátěr (modrý)																
1	18	300	173	30	2	23	2.2	0.34	10.1	33.0	11.30	1	11.30	rudý nátěr odstraněn		1
2	18	300	173	30	2	23	2.2	0.34	10.1	33.0	11.30	1	11.30	rudý nátěr odstraněn		1
3	18	300	173	30	6	23	2.2	0.34	10.1	11.0	3.77	1	3.77	rudý nátěr odstraněn		1
Vzorek 3 = fix																
4	18	300	173	30	6	23	2.2	0.34	10.1	11.0	3.77	2	7.53	dvá přechody potřeba		2
5	18	300	173	30	4	23	2.2	0.34	10.1	16.5	5.65	2	11.30	dvá přechody potřeba		2
6	18	360	208	30	4	23	2.2	0.41	12.1	16.5	6.78	2	13.55	dvá přechody potřeba		2
7	22	561	303	30	4	23	3.4	0.39	11.4	25.5	9.89	2	19.78	dvá přechody potřeba		2
Vzorek 4 = nátěr modrý																
10	18	300	174	30	7	23	0.5	1.51	44.4	2.3	3.49	1	3.49	modrý nátěr odstraněn		1
12	18	324	187	30	10	23	0.5	1.83	47.8	1.5	2.44	1	2.44	modrý nátěr odstraněn		1
Vzorek 5 = otisk prstů																
13	18	320	185	30	10	23	0.5	1.61	47.2	1.5	2.41	2	4.82	pozorováno reziduum		2
14	18	324	187	30	7	23	0.5	1.83	47.8	2.1	3.49	1	3.49	otisk prstů odstraněn		1

Tyto údaje naznačují, že organické filmy mohou být efektivně odstraňovány bez poškození křemenného podkladu při různých úrovních energie v jednom či více přechodech.

Tabulka
4c

Běh	VI	Ep	Ep	HI	vs	I	w	f-eps	f-pps	NPI	repa	Npa	f-el	Poznámky	HC
Sample 1 = Fingerpint / dust															
1	18	336	194	30	4	23	35	0.24	7.1	26.3	6.33	1	6.33	prach odst., rezid. FP*	1
2	19	435	247	30	4	23	35	0.31	9.0	26.3	8.05	1	8.05	pozor. lepší odstranov.	5
3	19	400	228	30	4	23	1.8	0.55	16.2	13.5	7.44	1	7.44		6
1	22	546	285	30	5	23	1.8	0.71	21.0	10.8	7.70	2	15.40	určité reziduum	2
2	22	549	287	30	5	23	1	1.29	38.0	6.0	7.74	2	15.49	určité reziduum	2
4	22	546	285	30	5	23	0.5	2.57	75.5	3.0	7.70	1	7.70	FP a prach odstraněny	1
5	22	529	286	30	10	23	0.5	2.49	73.1	1.5	3.73	2	7.46	určité reziduum	2
6	22	549	297	30	7	23	0.5	2.58	75.9	2.1	5.53	2	11.06	určité rezid., 90% odst.	2
7	22	549	297	30	7	23	0.5	2.58	75.9	2.3	5.96	1	5.96	FP a prach odstraněny	1
8	18	348	201	30	7	23	0.5	1.74	51.3	2.3	4.02	2	8.05	reziduální FP	2
8a	19	420	239	30	7	23	0.5	2.08	61.2	2.3	4.80	2	9.60	reziduální FP	2
9	20	480	288	30	7	23	0.5	2.33	68.5	2.3	5.38	2	10.76	určité rezid. FP	2
Sample 2 = Paint (blue)															
10	18	300	174	30	7	23	0.5	1.51	44.4	2.3	3.49	1	3.49	modrý nátěr odstraněn	1
12	18	324	187	30	10	23	0.5	1.63	47.8	1.5	2.44	1	2.44	modrý nátěr odstraněn	1
Sample 3 = Fingerpint															
13	18	320	185	30	10	23	0.5	1.61	47.2	1.5	2.41	2	4.82	určité reziduum	2
14	18	324	187	30	7	23	0.5	1.63	47.8	2.1	3.49	1	3.49	otisk prstů odstraněn	1

* FP = frakční srážení

Tyto údaje naznačují, že organické filmy mohou být efektivně odstraňovány bez poškozování křemíkového podkladu při různých úrovních energie v jednom či více přechodech.

5. Odstraňování polykrystalického křemíku s křemene

Příslušná aplikace způsobu ošetření a zařízení popsané výše s ohledem na polykrystalický křemík na křemenu jsou znázorněny v následujících příkladech. Vnitřní povrch válcové křemenové trubice pece byl ošetřen za účelem odstranění vrstvy polykrystalického křemíku, který se rekondenzoval na daném povrchu během ošetřování křemíkových kostek (podkladů) projitých trubicí dané pece. Částečná radiální sekce trubice byla ošetřována pomocí zařízení A. Byla provedena řada testů, jejichž výsledky jsou uvedeny v Tabulce 5a níže.

V testovacím zařízení byl dopadový region 611 kontinuálně skenován napříč pruhu 612 se šířkou (rozměr X) mezi 0,9 a 2,0 mm po časy snímání dlouhé až desítky minut. Počet přechodů (N_{pa}) uvedený v Tabulce 5a je tudíž:

$$N_{pa} = \frac{t_{scan} \cdot V_s}{W_{swath}}$$

kde W_{swath} je šířka pruhu 612, t_{scan} je doba skenování, a V_s je rychlost skenování laseru.

Bylo pozorováno, že při úrovních proudů vysoké energie a výkonu bod, v němž byla vrstva polykrystalického křemíku kompletně odstraněna, a křemen takto vystaven záření, byl doprovázen fluorescencí křemene. Toto poskytovalo příhodný vizuální indikátor času, v němž bylo dosaženo přerušení dané vrstvy.

Tabulka 5a

Běh	VI	Epm	Eps	RI	vs	l	w	Feps	Fops	Npl	Fepa	Npa	Fel	Poznámky	Rc
5,67	21	507	280	30	1	23	0,37	3,29	97	222	73,01	2595	189438	pozor.red. filmu Si	5
8	21	507	281	30	1	23	0,37	3,30	97	222	73,25	3405	249447	Fluorescence; zhrub.povr.	5
9	22	535	289	30	1	23	0,25	5,13	151	7,4	37,73	14694	554348	s křem.odstr.vrstvy	5
10	22	540	292	30	3	23	0,25	5,18	152	2,5	12,69	2204	27976		5
11	20	534	298	30	3	23	0,3	4,32	127	3,0	12,96	3000	38892	film Si ztenčen	5
11a	20	546	305	30	3	23	0,3	4,42	130	3,0	13,26	4200	55673	křem. pošk. v 6,3min.	5
11b	19	399	227	30	3	23	0,3	3,29	97	3,0	9,88	9000	88932	film Si ztenčen	5
11c	19	405	231	30	3	23	0,3	3,34	98	3,0	10,03	1350	13540	urč.poškoz.křemene	5
11d	18	351	203	30	3	23	0,3	2,94	86	3,0	8,81	4350	38326	dobrá rychl.odstr.	5
12a	18	537	310	30	3	23	0,25	5,50	162	2,5	13,48	1800	24263		5
12b	18	450	260	30	3	23	0,25	4,61	136	2,5	11,30	4430	50042	Fluorescence	5
12c	18	400	231	30	3	23	0,25	4,10	121	2,5	10,04	3504	35187	svýznamné odstr. Si	5
12d	18	396	229	30	3	23	0,25	4,06	119	2,5	9,94	1550	15409	urč.poškoz.křemene	5
12e	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	617	5809		5
12f	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	3130	29461		5
12g	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	3321	31259		5
12h	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	367	3458		5
12i	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	1102	10374		5
12j	18	375	217	30	3	23	0,25	3,84	113	2,5	9,41	1638	15422		5
13a	18	528	305	30	3	15	0,24	8,47	249	2,4	20,32	1275	25911		5
13b	18	452	261	30	3	15	0,24	7,25	213	2,4	17,40	1650	28705	významné odstr. Si	5
13c	18	441	255	30	3	15	0,24	7,07	208	2,4	16,97	825	14003		5
13d	18	447	258	30	3	15	0,24	7,17	211	2,4	17,20	1403	24129		5
13e	18	447	258	30	3	15	0,24	7,17	211	2,4	17,20	263	4516		5
13f	18	447	258	30	3	15	0,24	7,17	211	2,4	17,20	2385	41033	významné odstr. Si	5
13g	18	372	215	30	3	15	0,24	5,97	175	2,4	14,32	1088	15571		5
13h	18	372	215	30	3	15	0,24	5,97	175	2,4	14,32	1260	18041		5
13i	18	342	197	30	3	15	0,24	5,48	161	2,4	13,16	2228	29321	Si odstraněn zcela	5
14a	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	1238	23231		5
14b	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	300	5632		5
14c	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	323	6054		5
14d	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	518	9715		5
14e	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	525	9856		5
14f	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	150	2816		5
14g	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	503	9433		5
14h	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	150	2816		5
14i	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	630	11827		5
14j	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	120	2253		5
14k	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	75	1408		5
14l	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	83	1549		5
14m	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	75	1408		5
14n	23	525	282	30	3	15	0,24	7,82	230	2,4	18,77	90	1690	Si odstraněn zcela	5
14a2	19	399	225	30	5	15	0,24	6,26	184	1,4	9,02	1763	15890		5
b2	19	342	196	30	5	15	0,24	5,44	160	1,4	7,83	2500	19579	velk.ploch. Si odstr.	5
c2	18	297	172	30	5	15	0,24	4,77	140	1,4	6,87	7350	50497	film Si ztenčen	5
d2	18	318	183	30	5	15	0,24	5,09	150	1,4	7,33	1650	12097		5
e2	18	318	183	30	5	15	0,24	5,09	150	1,4	7,33	1800	13196		5
f2	18	318	183	30	5	15	0,24	5,09	150	1,4	7,33	2700	19794	film Si ztenčen	5

Tyto údaje naznačují, že polykrystalický křemík může být s povrchu křemene odstraňován.

6. Modifikace topografie povrchu

Z popisu a údajů prezentovaných výše je evidentní, že s povrchu podkladu mohou být výběrově odstraňovány v podstatě kontinuální vrstvy materiálu. Tloušťka materiálu odstraňovaného s podkladu je funkcí energií vazeb daného materiálu, jenž má být odstraněn, energie (vlnové délky) aplikovaných fotonů, proudu energie aplikovaných fotonů a, u multifotonových vazeb, proudu výkonu. Energetické a výkonové proudy mohou být rovněž označeny jako časoprostorová koncentrace aplikovaných fotonů. Pro daný materiál je tudíž možné určit tuto časoprostorovou fotonovou koncentraci, potřebnou k odstranění vrstvy materiálu žádoucí tloušťky. Jak je popsáno výše pokud jde o oxidaci a vrstvy organických a anorganických vrstev, vrstvy materiálu mohou být odstraňovány stejnoměrně přes rozsáhlou plochu daného podkladu pomocí skenování radiace přes povrch podkladu. Avšak, vhodným řízením postupu odstraňování je možné volitelně (např., nestejnoměrně) odstraňovat materiál s relativně malých ploch za účelem modifikace topografie povrchu daného podkladu. Úprava topografie může být v povaze mikroobrábění za účelem vytváření nanostruktur anebo planarizování nějakého hrubého povrchu.

a. Tvoření nanostruktur

Nanostrukтуры mohou být vytvářeny prostřednictvím selektivního odstraňování materiálu podkladu z okolí struktur, jež mají být vyvýšeny nad obklopujícím povrchem. To je možno provádět dvěma způsoby. První je konceptuálně ekvivalentní frézovací operaci v měřítcích tradiční struktury. K pokračování této analogie může být region 611

dopadajícího záření považován za frézovací nástroj, s velikostí regionu 611 (odpovídající velikosti frézovacího nástroje), diktující nejmenší šířku materiálu, který může být odstraněn. Podobně laterální rozlišovací schopnost řízení nad pohybem regionu 611 (jest-li pojížděním plošiny jako je 610 anebo pohybováním soustředovacích čoček) diktuje měřítko a přesnost, s níž mohou být struktury tvořeny. Hloubka daného "řezu", dosažená při každém "přechodu" dopadového regionu je diktována proudy energie a výkonu, a celková hloubka odstraněného materiálu je dále řízena počtem přechodů provedených přes určitý povrch.

Tvorba jednoduché nanostruktury je názorně ilustrována na Obr. 5. Touto nanostrukturou je "ostrůvek" 720 obklopený "příkopem" 710, zformovaným v povrchu podkladu 12. Příkop 710 je formován pojížděním regionu dopadu radiace 611 (znázorněn názorně jako cirkulární region, ačkoli může být obdélníkovým jak je znázorněno v experimentálním zařízení výše) okolo obvodu regionu, v němž je žádoucí ostrůvek 720 vytvořit. Transverzála regionu 611 je naznačena ještě další polohou daného regionu (611^1) v další části příkopu 710.

Alternativní mikroobráběcí technikou je k definování ploch materiálu, jež mají být odstraněny, použít masky, překrytím masky na anebo nad určitým povrchem ošetření podkladu, a skenovat region dopadu radiace stejnoměrně přes masku. Ovšem, musí být zvoleny maska a podkladové materiály a nastaveny úrovně proudu fotonové energie a výkonu, aby se s příslušného povrchu podkladu odstraňoval nežádoucí materiál bez poškozování této masky tak, aby se nestala nepoužitelnou ještě před dokončením mikroopracování daného podkladu.

Techniky pro používání masek (takové jako pro fotolitografii) a řízení velikosti regionu dopadu laseru a polohy,

byly v předchozí technice demonstrovány jako schopné řízení v prostorovém měřítku zájmu při mikroopracovávání nanostruktur. Způsob, kterým by tyto techniky byly aplikovány k použití tohoto vynálezu pro mikroopracovávání, jsou tudíž zřejmé odborníkovi a nejsou zde dále podrobněji popisovány.

b. Planarizace

Povrch podkladu může být rovněž "planarizován" pomocí výběrové aplikace záření, jak je názorně ilustrováno na Obr. 8. Pokud, jak je znázorněno na Obr. 8, daný podklad 12 má vrstvu 12b (jako je vrstva oxidu, ačkoli touto vrstvou může být jednoduše vrstva povrchu tohoto podkladu), jež nemá stejnoměrnou tloušťku (označenou regiony 12b1, 12b2, 12b3, atd.), může být žádoucí v určitých aplikacích odstranit část, ale ne všechnu, vrstvy oxidu a učinit tak vrstvu oxidu se stejnoměrnější tloušťkou (označeno čárkovanou linií 12c). Toho může být dosaženo prostřednictvím výběrové aplikace radiace na každý z regionů 12b1, atd., za účelem odstranění tloušťky materiálu rovnající se rozdílu mezi tloušťkou před ošetřením a žádoucí tloušťkou. Záření může být skenováno rastrovým způsobem přes povrch daného podkladu, a žádoucí množství materiálu odstraněno z každého regionu.

K přesnému stanovení tloušťky vrstvy 12b před ošetřením (a, volitelně, k potvrzení žádoucí tloušťky po ošetření), je žádoucí používat techniky měření tloušťky filmu in-situ. Vhodné známé techniky obsahují reflexní či paprskovou profilovou spektrofotometrii či elipsometrii.

(Takové techniky jsou popisovány v článku P. Burggraafa, "Metrologie tenkého filmu: cestou k novému počátku", SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, Březen 1994). Skutečná tloušťka v každém regionu pak může být porovnávána se žádoucí tloušťkou k určení tloušťky nežádoucího materiálu. Příslušné proudy energie a výkon záření pak mohou být aplikovány do určitého regionu k likvidaci tloušťky nežádoucího materiálu. Měření tloušťky po ošetření může být prováděno k potvrzení toho, že skutečná tloušťka se rovná žádoucí tloušťce, a pokud je toho třeba, je aplikováno dodatečné ošetření. Tento postup může být řetězově pokračován pro každý region.

Vhodné zařízení je názorně zobrazeno na Obr. 6. Substrát 12 je umístěn na pohyblivé plošině 610 a záření 11 ze zdroje 410 je aplikováno přes dodávací optiku 450. Informace o tloušťce 805 je sbírána elipsometrem 810 (či jiným zařízením měření tloušťky). Ovládač 850 přijímá informace o tloušťce 185 z elipsometru 810, a signál řízení výstupů radiace 820 do zdroje 410 a signály řízení polohy 825 do plošiny 610 či signály 830 do říditelné optiky 450.

c. Šikmé ozařování

Povrch ošetření podkladu s nestejnoměrnou tloušťkou může být rovněž "vyhlazen" prostřednictvím aplikace šikmého úhlu ke středové ploše podkladu, jak je názorně zobrazeno na Obr. 7. Vrstva hrubého povrchu 12b podkladu 12 (na Obr. 7 znázorněn v průřezu) má povrchové elementy orientované v mnoha směrech (či mnoha úhlech ve vztahu k celkové rovině

daného ošetřovaného povrchu). Protože dopadové proudy energie a výkonu ze zdroje záření 11 se mění se sinem úhlu dopadu na určitý povrchový prvek, prvky, jež jsou nejkolmější k záření budou vystaveny větším proudům, než prvky, které jsou šikmé. Dále, elementy které jsou zastíněny (neexponovány) nebudou přijímat žádný tok energie. Tudíž, kumulativní účinek aplikace záření 11 je odstranit relativně více materiálu z kolmo orientovaných povrchových prvků, a méně ze šikmých anebo zastíněných elementů (označeno názorně následnými konturami 12B^I, 12B^{II} daného povrchu po jeho ošetření). Toto zase redukuje průměrnou hrubost příslušné povrchové vrstvy 12b.

788-97

č.j.	39616
DOŠLO	23. V. 97
URAD	PRŮMYSLUVEHO VLASTNICTVÍ
PŘÍL.	

P A T E N T O V É N Á R O K Y

1. Způsob selektivního odstraňování v podstatě kontinuální vrstvy nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu nějakého podkladu, bez postižení fyzikálních vlastností žádoucího materiálu, jenž je na ošetřovaném povrchu přilehlý anebo ležící pod tímto nežádoucím materiálem, obsahující kroky:

- zavedení proudu plynu, v podstatě inertního k danému podkladu, přes nežádoucí materiál, a
- ozařování nežádoucího materiálu energetickými fotony v časo-prostorové koncentraci dostatečné k uvolnění nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu a nedostatečné ke změně fyzikálních vlastností žádoucího materiálu.

2. Způsob selektivního odstraňování v podstatě kontinuální vrstvy nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu nějakého podkladu, bez postižení fyzikálních vlastností žádoucího materiálu, jenž je na ošetřovaném povrchu přilehlý anebo ležící pod tímto nežádoucím materiálem, obsahující kroky:

- zavedení proudu plynu, v podstatě inertního k danému podkladu, přes nežádoucí materiál, a
- ozařování nežádoucího materiálu energetickými fotony v energetických a výkonových úrovních toku, jež jsou dostatečné k rozbití přilínavých vazeb nežádoucího materiálu a nedostatečné ke zvýšení teploty žádoucího materiálu na úroveň, jež produkuje změny fyzikálních vlastností žádoucího materiálu.

3. Způsob tvoření struktur v ošetřovaném povrchu nějakého podkladu pomocí selektivního odstraňování nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu, bez postižení fyzikálních vlastností žádoucího materiálu, jenž je na ošetřovaném povrchu přilehlý anebo ležící pod tímto nežádoucím materiálem, obsahující kroky:

- zavedení proudu plynu, v podstatě inertního k danému podkladu, přes nežádoucí materiál,
- selektivní ozařování nežádoucího materiálu energetickými fotony v energetických a výkonových úrovních toku, jež jsou dostatečné k odstranění nežádoucího materiálu s ošetřovaného povrchu a nedostatečné ke změně fyzikálních vlastností žádoucího materiálu, a
- odstraňování s ošetřovaného povrchu tloušťky nežádoucího materiálu v prostorovém vzoru, jenž je potřebný ke zformování žádoucí struktury.

4. Způsob podle nároku 3, dále obsahující kroky:

- vytvoření na nežádoucím materiálu dopadového regionu záření, majícího rozměry vhodné ke zformování žádoucí struktury, a
- postupný pohyb (indexování) dopadového regionu záření přes řečený prostorový vzor.

5. Způsob podle nároku 3, dále obsahující kroky:

- uspořádání masky, odpovídající řečenému prostorovému vzoru, mezi ošetřovaný povrch a zdroj energetických fotonů, a
- v podstatě stejnoměrné ozařování, skrze tuto masku, tohoto prostorového vzoru na ošetřovaném povrchu.

6. Způsob planarizace ošetřovaného povrchu podkladu, majícího mnohost sdružených regionů s různou tloušťkou materiálu, prostřednictvím selektivního odstraňování různé tloušťky materiálu s každého regionu, bez poškození fyzikálních vlastností zbývajících materiálu, obsahující kroky:
 - určování pro každý region existující tloušťky materiálu v tomto regionu,
 - porovnání každé tloušťky existujícího materiálu s žáadoucí tloušťkou materiálu a z toho určení tloušťky nežádoucího materiálu, a
 - u každého regionu s nežádoucí tloušťkou materiálu selektivní ozařování tohoto regionu energetickými fotony, jež mají časo-prostorovou koncentraci dostatečnou k odstranění řečené tloušťky materiálu s tohoto regionu, a nedostatečnou ke změně fyzikálních vlastností zbývajících materiálu.
7. Způsob podle nároků 1, 2, 3 nebo 6, v němž materiálem, který zbyde na ošetřovaném povrchu, je nějaký kov a materiálem k odstranění je oxid tohoto kovu.
8. Způsob podle nároků 1, 2, 3 nebo 6, v němž materiál, který zbyde na ošetřovaném povrchu, je anorganický a materiál k odstranění je organický.
9. Způsob podle nároků 1, 2, 3 nebo 6, v němž materiál, který zbyde na ošetřovaném povrchu a materiál k odstranění s něho, mají v podstatě stejné chemické složení.

10. Způsob podle nároků 1, 2, 3 nebo 6, v němž materiálem, který zbyde na ošetřovaném povrchu, je křemen a materiálem k odstranění je polykrystalický křemík.
11. Způsob zmenšování hrubosti ošetřovaného povrchu majícího střední povrchovou rovinu a majícího jednotlivé povrchové prvky uspořádané v úhlech k této střední povrchové rovině, bez postižení fyzikálních vlastností ošetřovaného povrchu, obsahující kroky:
 - zavedení proudu plynu, v podstatě inertního k danému podkladu, přes řečený ošetřovaný povrch, a
 - ozařování tohoto ošetřovaného povrchu energetickými fotony v energetických a výkonových úrovních toku, jež jsou dostatečné k rozbití přilínavých vazeb ošetřovaného povrchového materiálu a tím uvolnění daného materiálu s ošetřovaného povrchu, a nedostatečné ke změně fyzikálních vlastností zbývajícího materiálu ošetřovaného povrchu, řečené fotony jsou aplikovány na ošetřovaný povrch v relativně šikmém úhlu ke střední povrchové rovině ošetřovaného povrchu.

788-94

1/6

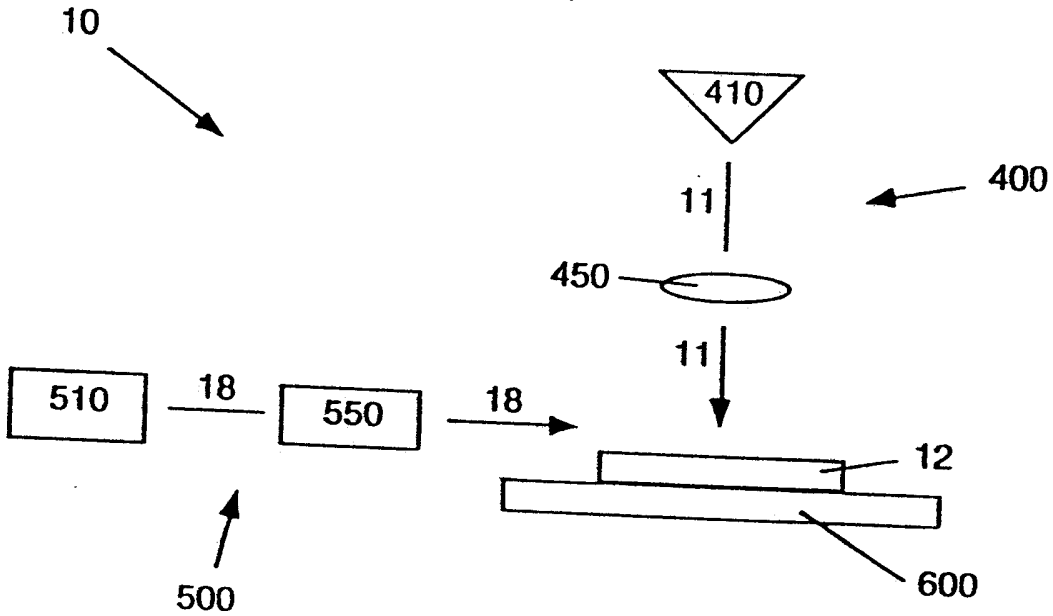


FIG. 1

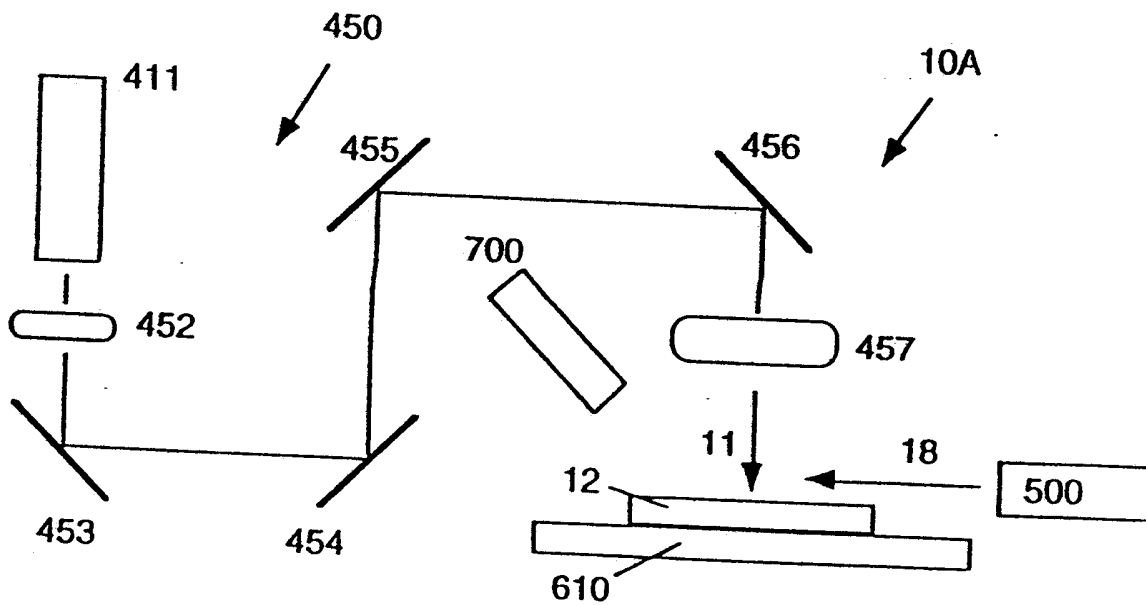
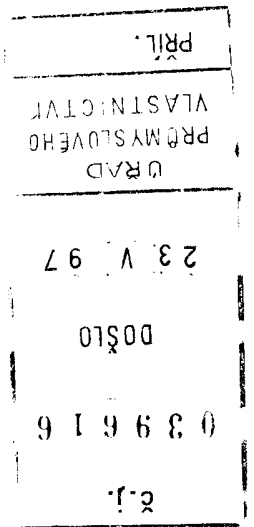


FIG. 2A

788-97

2/6

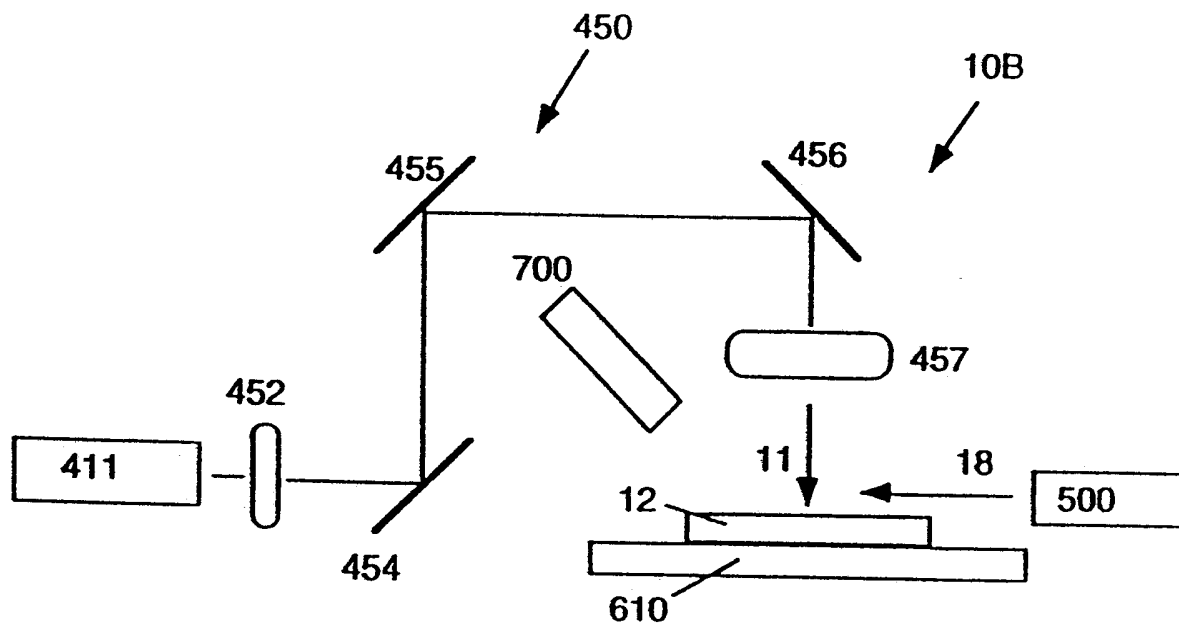


FIG. 2B

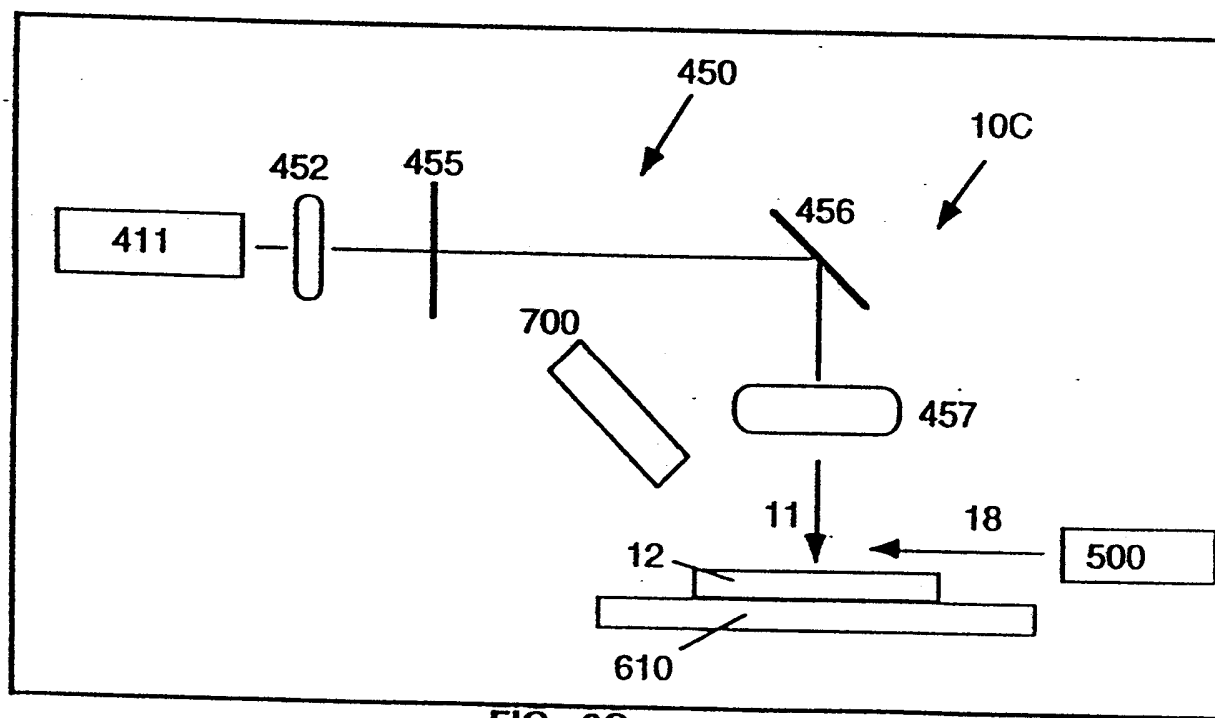


FIG. 2C

788-94

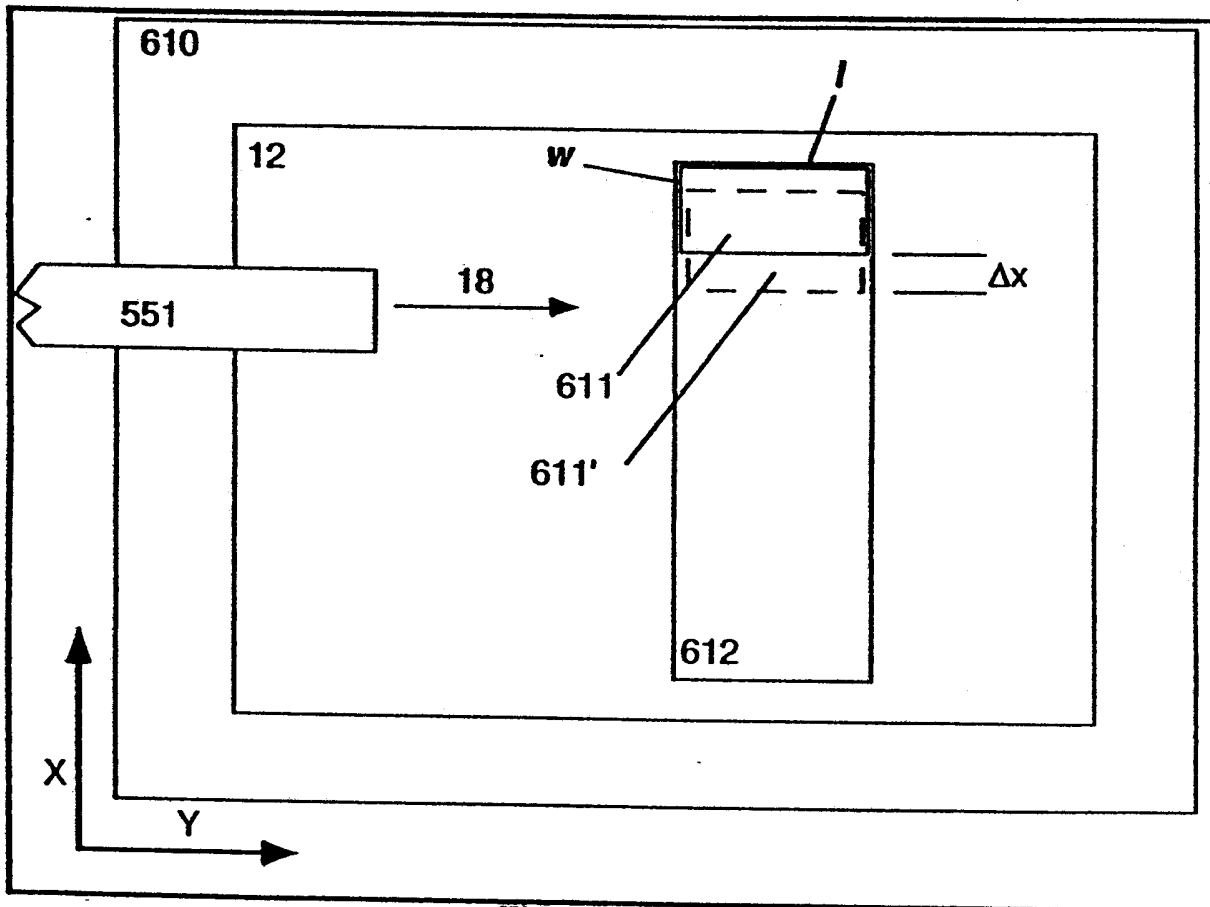


FIG. 3

488-94

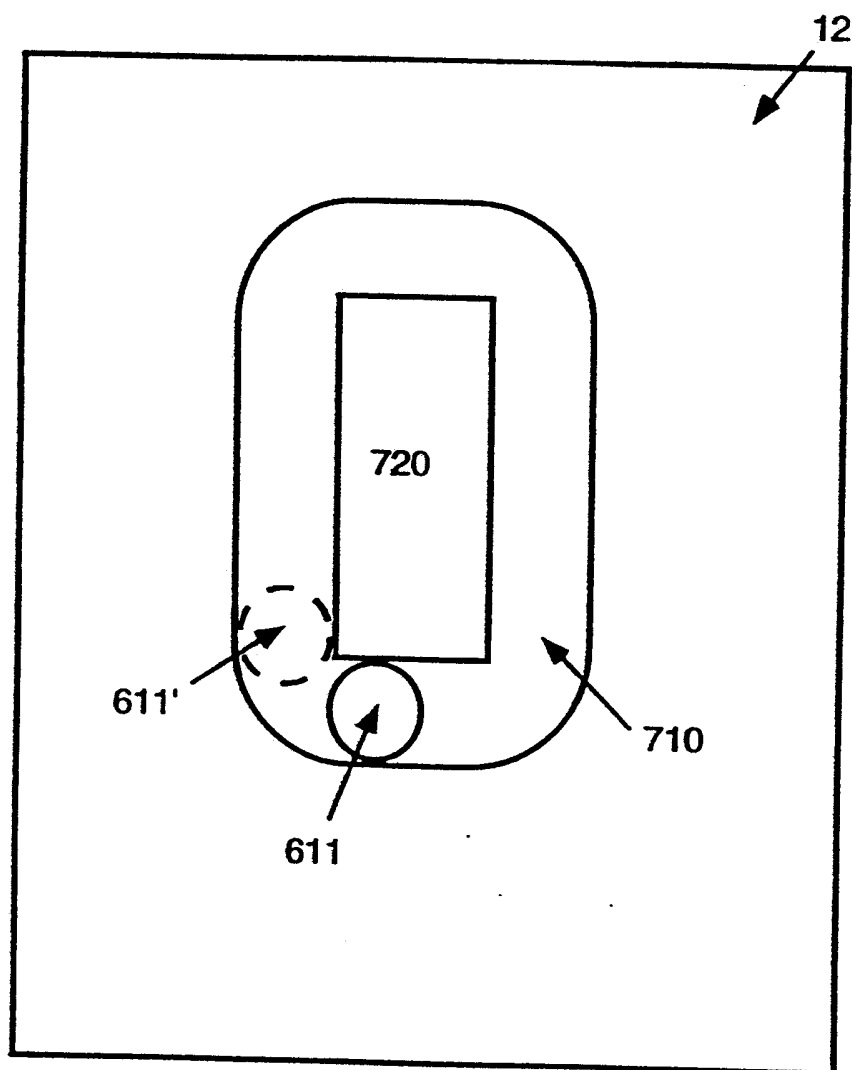


FIG. 4

5/6

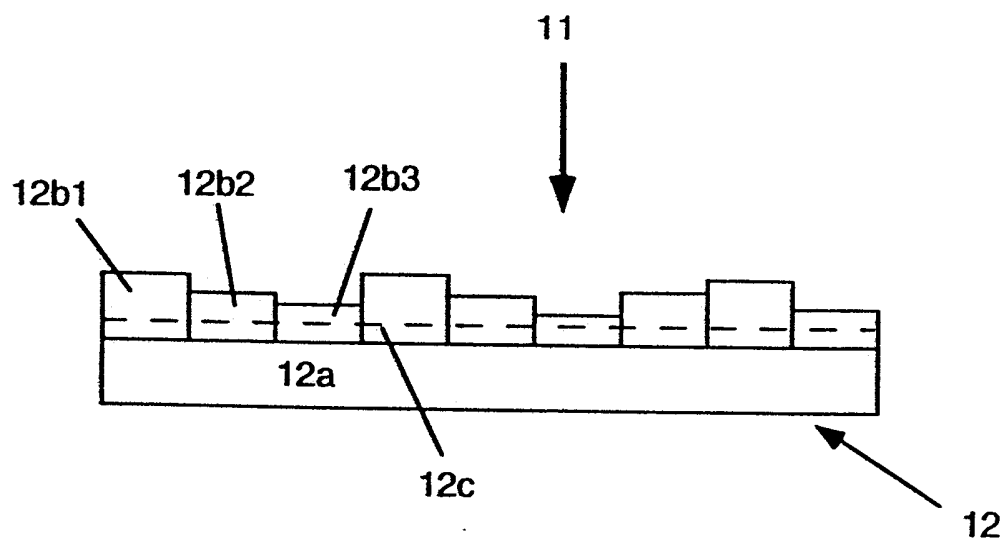


FIG. 5

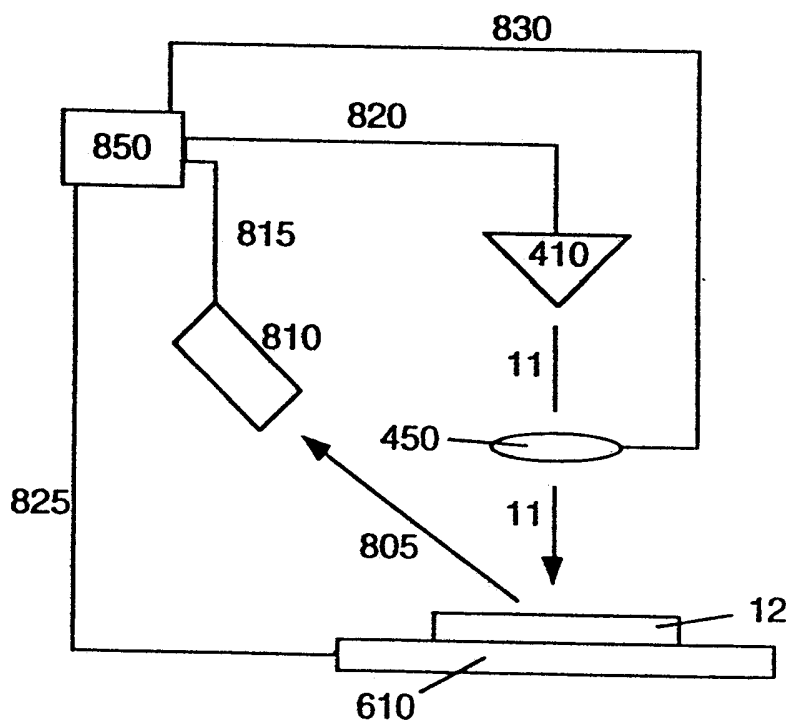


FIG. 6

788-97

6/6

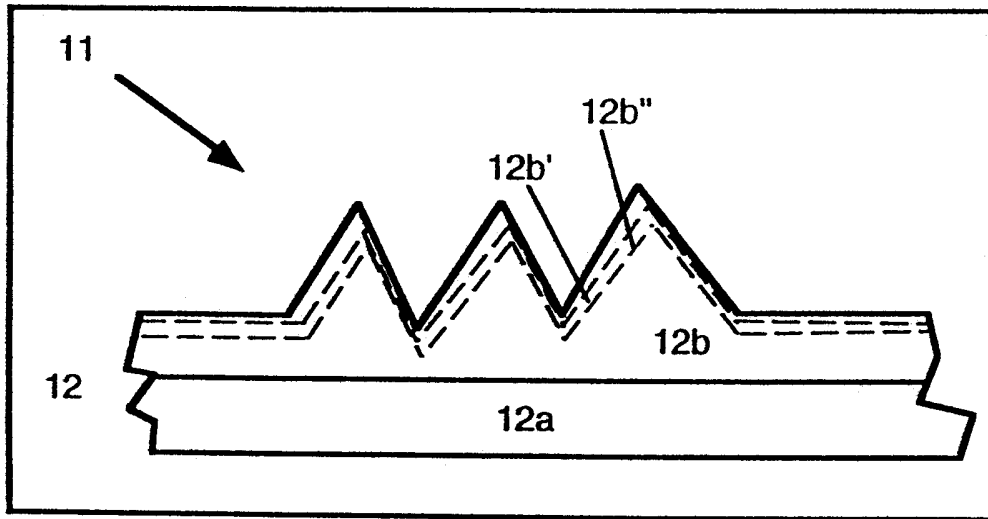


FIG. 7