

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Lazerinių tyrimų centras

Urtė Kimbaraitė

METALINIŲ DANGŲ OPTINIO ATSPARUMO TYRIMAI:  
PRIKLAUSOMYBĖ NUO IMPULSO TRUKMĖS

Magistro studijų kursinis darbas  
Lazerinių technologijų studijų programa

Studentė  
Leista ginti  
Darbo vadovas  
Lazerinių tyrimų centro direktorius

Urtė Kimbaraitė  
  
doc. dr. Andrius Melninkaitis  
prof. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

# Turinys

Įvadas .....	3
1. Literatūros apžvalga.....	5
1.1. Aukštą atspindžio rodiklį turinčios metalinės dangos .....	5
1.2. Pažaidos mechanizmai metalinės dangose.....	7
1.2.1. Lazerine spinduliuote inicijuojama optinė pažaida metaluose .....	7
1.2.2. Optinis nuovargio efektas ir poveikio kaupimas daugelio impulsų atveju.....	11
2. Darbo metodika.....	15
2.1. „I-1“ ir „S-I-1“ PLSS testavimo protokolai .....	15
2.2. Eksperimentinė įranga .....	17
2.3. Eksperimentiniai bandiniai.....	19
3. Rezultatai ir jų aptarimas.....	20
Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	26
Literatūros sąrašas.....	28

## Įvadas

Vos pradėjus intensyviai vystyti didelės galios lazerines technologijas, greitai paaiškėjo, kad optinių sistemų maksimali generuojama galia yra apribota lazerine spinduliuote inicijuojamu pažaidos reiškiniu. Lazerinėse sistemose integruoti optiniai elementai, pastoviai juos veikiant didelio intensyvumo spinduliuote, turi atsparumo ribą - maksimalų slenkstinį įtėkį (žemiau slenkščio ribotą veikimo laiką iki pažaidos), kurį viršijus, elementas negrįžtamai suardomas. Toks elementas toliau nebegali būti naudojamas optinėje sistemoje, nes, įvykus pažaidai, jo optinės savybės nebeatitinka pradinių specifikacijų, o jei neveikia bent vienas sistemos elementas – neveikia ir visa optinė grandinė (prietaisas). Taigi, tokių elementų ilgaamžiškumas ir jo įvertinimas yra itin aktualus šiandien, kai dauguma lazerinių sistemų dirba arti savo galimybių ribos. Norint išvengti optinio ardymo reiškinių optinėse sistemose, praktikoje dažniausiai naudojamos mažais sugerties koeficientais pasižyminčios dielektrinės medžiagos: stiklas ir įvairūs kristalai, dengiami daugiasluoksnėmis interferencinėmis dangomis. Šių elementų atsparumas apibūdinamas eksperimentiškai išmatuojamu parametru – pažaidos lazerio spinduliuotei slenkščiu – PLSS (angl. LIDT – Laser-Induced Damage Threshold). PLSS nėra konstanta – jis priklauso tiek nuo elemento gamybai naudojamų medžiagų savybių, pasirinktų technologinių (poliravimo ar dengimo) procesų, tiek nuo apšvitos parametrų (dozės, bangos ilgio, pluošto diametro, impulso trukmės ir pan.). Dielektrinių elementų atveju yra žinoma, kad dominuojantys optinių elementų pažaidą sukeltantys mechanizmai gali skirtis, kai skiriasi impulso trukmė. Vadinas, norint turėti atsparų ir universalų optinį elementą skirtingų impulso trukmių lazerinėms sistemoms, reikia gerai suprasti medžiagoje vykstančius procesus kintant šiam parametru. Atlikus preliminarią literatūros apžvalgą pastebėta, kad yra atlikta nemažai tyrimų apie tai, kaip pasireiškia femto-, piko-, nano-, mikrosekundžių ir sekundžių impulsais inicijuojami pažaidos procesai dielektrinėse medžiagose, tačiau nuoseklių tyrimų metalinių dangų srityje – mažai arba jie apima tik siaurą impulso trukmių intervalą. Taigi, aiškaus ir eksperimentais patvirtinto metalinių dangų PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės dėsnio trūkumas įkvėpė šio darbo **tikslą** – praktiškai įvertinti metalinių dangų optinio atsparumo priklausomybę nuo lazerinio šaltinio impulso trukmės itin plačiame lazerinių impulsų trukmių ruože, t.y. nuo kelių šimtų femtosekundžių iki 10 sekundžių ir tokiom dangoms būdingą PLSS dėsningumą.

Tikslui pasiekti suformuluoti pagrindiniai darbo **uždaviniai**:

1. susipažinti su moksline literatūra susijusia su PLSS metalinėse dangose;
2. įsisavinti optinio atsparumo testavimo eksperimento metodiką;
3. taikant standartizuotus „1-į-1“ ir „S-į-1“ protokolus, ištirti įvairių metalinių dangų PLSS naudojant skirtingas lazerio impulso trukmes;

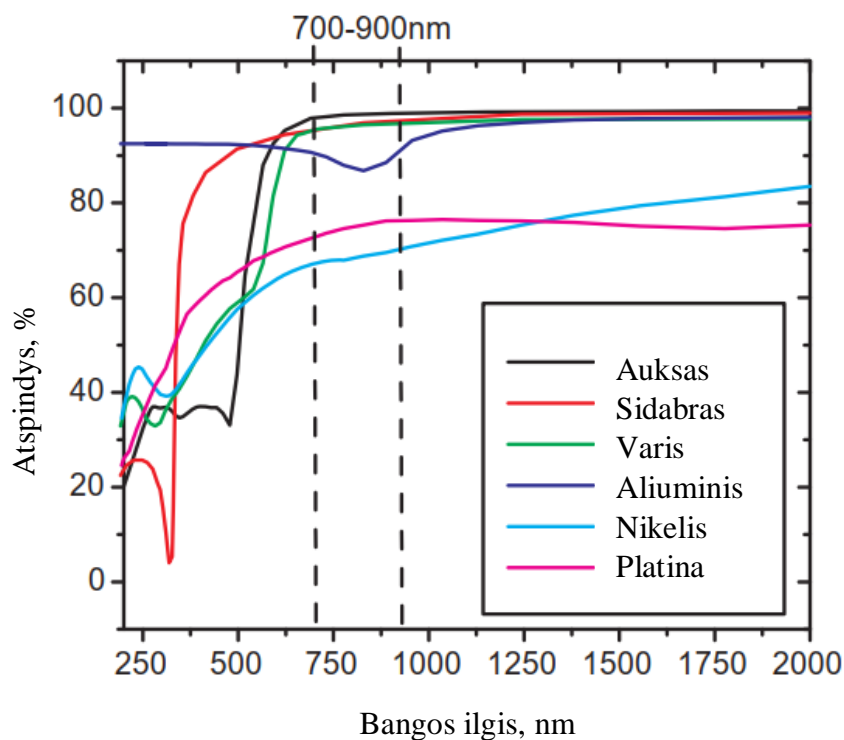
4. apibendrinti gautus rezultatus nustatant galimus PLSS dėsningumus.

# 1. Literatūros apžvalga

## 1.1. Aukštą atspindžio rodiklį turinčios metalinės dangos

Pagrindinė optinių elementų paskirtis yra perduoti ir atspindėti šviesą norimu būdu, priklausomai nuo elemento formos ir optinių savybių. Šias funkcijas dažniausiai atlieka poliruoti medžiagos paviršiai. Kai poliruoti stiklų ar kristalų paviršiai neturi reikiamų savybių norimam atspindžiui ar pralaidumui pasiekti – gelbsti papildomos, reikiamas savybes turinčios dangos, kombinuojamos su optiniu elementu. Optinė danga tai vienas ar keli ploni medžiagos sluoksniai, nusodinami ant elemento paviršiaus. Sluoksnių skaičius ar storis parenkami atsižvelgiant į norimą gauti rezultatą. Iš esmės šias dangas galima išskirti į dvi rūšis: skaidrinančios (angl. AR – anti reflective) ar aukštą atspindžio koeficientą turinčios (angl. HR – highly reflective) dangos. Šiame darbe plačiau panagrinėsime antrąją rūšį. Taigi, aukštą atspindžio koeficientą turinčios metalinės dangos yra naudojamos siekiant sumažinti pralaidumo ar sugerties nuostolius (tuo tarpu ir galimą lazerinės spinduliuotės sukeltą pažeidimą) atspindint lazerinę spinduliuotę. Jos dengiamos ant substrato, kuris dažniausiai yra stiklas (pvz., lydytas silicio dioksidas), o kai būtinos geros šiluminio laidumo savybės - metalas, pavyzdžiui, varis. Dažniausiai sutinkami metalai atspindinčiose dangose: aliuminis, auksas, sidabras, rečiau – berilis, varis, chromas, nikelis ir pan. Jie pasižymi skirtingomis

techninėmis savybėmis ir yra apibūdinami atspindžio, sugerties, difuzijos ir pan. koeficientais. Vis dėl to svarbiausias parametras veidrodžiams apibūdinti yra atspindžio koeficientas, kuris nurodo atspindėtos šviesos bangos amplitudės ties besikeičiančia terpe santykį su krintančiosios bangos amplitude. 1.1 paveikslėlyje pateikti kai kurių metalinių dangų atspindžio spektrai. Šie spektrai padeda „nuspręsti“ kokioje



1.1 pav. Kai kurių metalinių dangų atspindžio spektrai [1].

spektrinėje srityje ir kokių tikslu veidrodis bus naudojamas. Pavyzdžiui, auksas naudojamas 600 nm ir ilgesnių bangos ilgių regione ir ten siekia 95 % + atspindžio koeficientą, tačiau ties regimąja šviesa ar trumpesniais bangos ilgiais atspindžio koeficiento vertė tampa per maža naudingam pritaikymui. Tokiu atveju galima auksą keisti aliuminiu, kuris (dažniausiai su papildomu – apsauginiu SiO<sub>2</sub> sluoksniu) yra plačiai naudojamas matomame ir ultravioletiniame spektro regione su virš 90 % siekiančiu atspindžio koeficientu vizualioje spektro dalyje ir vos mažiau nei 90 % UV srityje. Kalbant apie veidrodžių ištvermę pažaidai, svarbus yra šilumos tolerancijos/šiluminio laidumo koeficientas ( $k$ , [W/mK]), apibūdinantis kaip gerai metalas praleidžia šilumą. Mat, kuo metalas greičiau atiduoda šilumą aplinkinei medžiagai, tuo lėčiau jis pasiekia struktūrai ekstremalias temperatūras ir, vadinasi, yra atsparesnis pažaidai (aptarta 1.2 skyriuje). Taigi, praktikoje yra aktualu ieškoti patvaresnių medžiagų derinių, todėl, pavyzdžiui, auksu gali būti dengiamas ne stiklinis, o varinis pagrindukas – tokia kombinacija leidžia turėti veidrodžius, pasižyminčius didelio šilumos kiekio tolerancija – būtent todėl jie plačiai naudojami didelės galios infraraudonajai spinduliuotei, pavyzdžiui, CO<sub>2</sub> lazerių sistemose. Veidrodžių atsparumui taip pat gali turėti įtakos ir dangos(ų) pozicija pagrinduko atžvilgiu. Metalų sluoksnis gali būti dengiamas ant pirmojo arba antrojo pagrinduko paviršiaus. Pirmojo atveju atspindinti danga yra krintančios šviesos pusėje, todėl šviesa tik šiek tiek prasiskverbia į dangą – nepasiekia pagrindo. Antrojo atveju atspindinti danga yra kitoje substrato pusėje: šviesa sklinda per substratą prieš ir po atspindžio. Toks dangos variantas dažniausiai pasirenkamas norint geriau apsaugoti dangą, tačiau nors ir šio tipo veidrodžiai yra naudojami buitiniams reikmėms – techninėse/mokslinėse srityse problemų gali kilti dėl Fresnelio atspindžių ant pirmo paviršiaus (patiriami galios nuostoliai) ar dėl chromatinės stiklo dispersijos. Šiame tyrime bus naudojami tik pirmojo paviršiaus veidrodžiai, kurių metalinis dangos sluoksnis dažnai yra padengtas plonu sluoksniu (arba keliais sluoksniais) dielektrinės medžiagos, tokios kaip, pavyzdžiui, amorfinis SiO<sub>2</sub> (silicio dioksidas) arba Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (silicio nitridas). Tai apsauginiai sluoksniai, kurių paskirtis yra saugoti dangą nuo oksidacijos ir įbrėžimų. Nepaisant to, papildomų dangų įvairovė turi ir trūkumų – skirtingi dangų šilumos plėtimosi koeficientai sukelia problemų veidrodžius naudojant plačiame temperatūrų kitimo regione, taip pat dengimo procese didėja tikimybė užteršti veidrodį. Pagrindiniai metalinių veidrodžių trūkumai – net ir labai grynai metalai sugeria dalį krintančios šviesos, tad šios dangos turi ribotą atspindžio koeficientą (apsaugoti sidabriniai veidrodžiai gali atspindėti apie 98%), taip pat jie pasižymi santykinai žemu optinio pažeidimo slenksčiu, kadangi absorbuota šviesa šildo medžiagą, o šiluma, pasiskirsčiusi ploname dangos sluoksnyje yra palanki terpė pažaidai atsirasti. Turint dideles lazerio spinduliuotės galias, net ir žemiau PLSS atsiranda šilumai efektai, tokie kaip šiluminiai lęšiai ar šiluminiai spindulių iškraipymai. Nepaisant šių trūkumų, metaliniai veidrodžiai atspindi šviesą labai plataus spektro diapazone ir tai yra pagrindinis jų privalumas. Taip pat atspindžio

priklausomybė nuo kampo yra sąlyginai nedidelė. Metalo sluoksnius lengviau pagaminti (lyginant su dielektriniais veidrodžiais) ir padengti ant pagrinduko, todėl jų kaina yra mažesnė. Kai kuriose lazerinėse sistemose platus spektrinis atspindžio diapazonas yra būtinybė, tad čia metaliniai veidrodžiai yra nepakeičiami. Kai kur jie yra tiesiog universalesnis, tuo pačiu ir pigesnis pasirinkimas labai aukšto atspindžio nereikalaujančiose sistemose.

## **1.2. Pažaidos mechanizmai metalinės dangose**

### **1.2.1. Lazerine spinduliuote inicijuojama optinė pažaida metaluose**

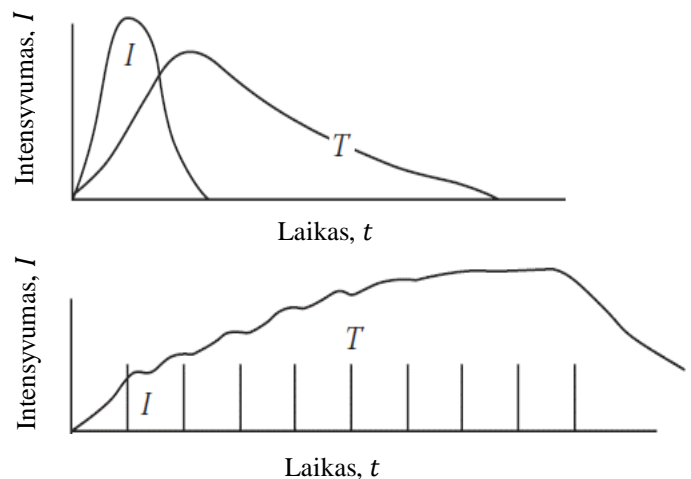
Norint apibūdinti lazerio spinduliuote sukeltą pažaidą, visų pirma, reikalingas kriterijus, kuris vienareikšmiškai apibrėžtų šią sąvoką. Nagrinėjant optinį atsparumą teoriniu aspektu, paprastai toks kriterijus atitinka kokią nors svarbaus fizikinio parametro vertę, susijusią su faziniu virsmu. Pavyzdžiui, istoriškai pirmą kartą stebint lazeriu inicijuotą pažaidą buvo pastebėti paviršiaus apsilydymo požymiai, tad nuo pat pradžių buvo manyta, kad pažaidą sukelia elementą sudarančios medžiagos lydymosi temperatūros pasiekimas [2]. Taip galvota, nes skaidriose terpėse pasiekus lydymosi tašką vyksta medžiagos struktūriniai pakitimai, kuriuos lydi draustinės juostos tarpo kolapsas ir, tuo pačiu, ženkliai padidėjęs medžiagos sugerties koeficientas. Vėliau buvo nustatyta, kad pažaidą gali sukelti ne vien lydymosi temperatūros pasiekimas, bet ir, pavyzdžiui, lokalaus mechaninio įtempio ar plazmos būsenos sukūrimas [3]. Kitais žodžiais tariant, pažaidą ne visada gali lemti tik vienas ir tas pats fizikinis procesas, bet skirtingi procesai arba jų visuma.

Nagrinėjant lazerinę pažaidą praktiniu aspektu dar svarbiau susitarti kaip atskirti ar bandinys po ekspozicijos jau pažeistas, ar dar ne. Taigi, pagal dabartinį apibrėžimą optinis pažeidimas yra bet koks lazerinės spinduliuotės sukeltas permanentinis medžiagos struktūros pokytis, kurį galima identifikuoti nustatytu detektavimo metodu ir jautrumu, susijusiu su tiriamo produkto veikimu [4]. Praktikoje pažaidai detektuoti dažniausiai naudojamas Nomarski interferencinio kontrasto mikroskopas, su ne mažesniu kaip 100x nominaliu optinės sistemos didinimu. Yra du pagrindiniai lazeriu inicijuojamos pažaidos mechanizmai – lokaloji šilumos akumuliacija (ir su ja susijęs fazinis virsmas) ir atsitiktinių defektinių būsenų kūrimas ir su tuo susijusio medžiagos mechaninio nuovargio lemiamą pažaidą (pastarasis labiau būdingas pasikartojančių impulsų atveju). Lokaloji šilumos akumuliacija yra stebima gerai šviesą sugeriančiose terpėse. Bendru atveju medžiagos ne visada būna homogeniškos: praktikoje dažnai pasitaiko atveju, kai pažaidą vyksta lokalizuotai – įvairių, gamybos metu susiformavusių, atsitiktinių defektų vietose. Šiuo atveju nuovargio efektas defektų vietose

beveik nestebimas – defektų pažeidimai vyksta momentiška – vos tik lokaliai viršijamas slenkstinis intensyvumas. Atsitiktiniais defektais lemiamas pažeidimas yra aktualus tiriant dielektrines dangas, tačiau optikai su metalinėmis dangomis jos įtaka yra labai maža, nes metalinės dangos sugertis yra labai palyginama su pačios dangos sugertimi.

Optines medžiagas pasikartojančiai ekspozuojant itin ilgus impulso trukmės (nuo  $10^{-8}$  s iki nuolatinės veikos) lazeriniais impulsais,

neskaidriuose šviesai bandiniuose inicijuojama pažeidimas – tiesiogiai susijusi su bendrai sukaupta sugertą optine energija. Tarkime, kad, paveikus bandinį pirminiu lazerio impulsu, medžiaga absorbuoja šviesą ir ją paverčia šiluma. Jeigu atvėsimui reikalingas laikas yra daug kartų ilgesnis už lazerio impulsų pasikartojimo trukmę, apšviesta medžiagos dalis nespės atvėsti iki kito lazerinio impulso – šiluma bus kaupiama pakartotinai (1.2 pav.), kol



1.2 pav. Lazerinio impulso intensyvumas ( $I$ ) ir medžiagos temperatūra ( $T$ ) laiko atžvilgiu ( $t$ ). Viršuje - trumpas impulsas, apačioje - didelio pasikartojimo dažnio impulsai [5].

pasiekiamas medžiagos lydymosi ar garavimo temperatūra. Toks procesas vadinamas lokaliaja šilumos akumuliacija arba šiluminiu nuovargio efektu. Jam pasireiškiant medžiagos gardelinėje struktūroje įvyksta pokyčiai, ji pakeičia savybes ir nebegali funkcionuoti kaip anksčiau – galiausiai inicijuojama pažeidimas. Kai lazerinio kaitinimo (sužadavimo) laikas yra panašus arba trumpesnis už elektronų-fononų susidūrimo laiką, klasikinis šilumos difuzijos dėsnis nėra tinkamas apibūdinant elektronų ir gardelės temperatūrų pokyčius. Trumpų impulsų srityje metalinėse dangose šilumos kaupimas gali būti apibūdinamas dviejų temperatūrų modeliu [6]. Šis modelis apibūdina energijos perdavimą ir elektronų bei gardelės temperatūrų (atitinkamai  $T_e$  ir  $T_g$ ) pokyčių metaluose, kurie yra veikiami lazerine spinduliuote femtosekundinių impulsų srityje. Čia kalbama apie tai, kad, visų pirma, lazerinės spinduliuotės suteikta energija tiesiogiai perduodama elektronų sistemai ir tik tuomet dalis elektronų kinetinės energijos per kitus elektronus difunduoja į gilesnius medžiagos regionus. Kai ultratrumpas impulsas nustoja veikti medžiagą, šiluminė elektronų ir fononų sąveika (šilumos laidumas) medžiagoje tęsis iki įsivyravus pusiausvyrai. Šių temperatūrų kitimas laike gali būti apskaičiuojamas išsprendžiant elektronų ir gardelės ryšinio šilumos laidumo lygtis:



$$C_e \frac{\delta T_e}{\delta t} = \nabla(K_e \nabla T_e) - g(T_e - T_g) + S(z, t), \quad (1.1)$$

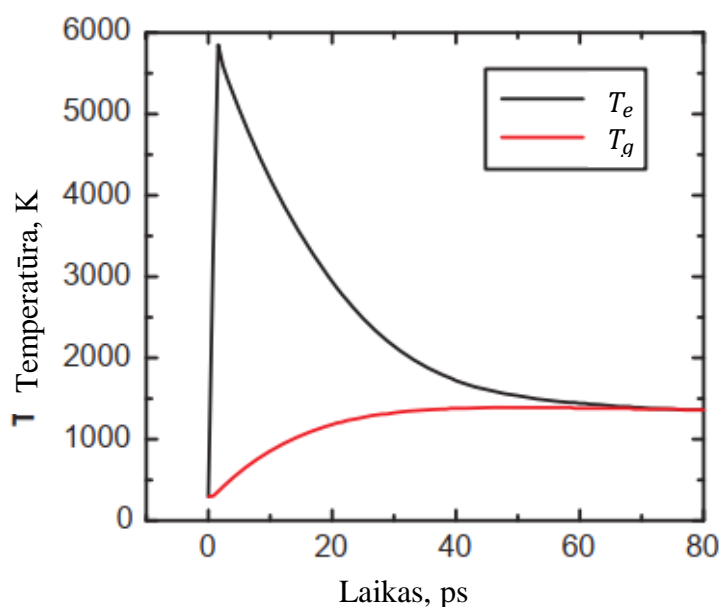
$$C_g \frac{\delta T_g}{\delta t} = \nabla(K_g \nabla T_g) - g(T_e - T_g), \quad (1.2)$$

kur  $C_e$  ir  $C_g$  yra elektronų ir gardelės šiluminės talpos ( $Jm^{-3}K^{-1}$ ), o  $K_e$  ir  $K_g$  atitinkamai – savitieji šiluminiai laidžiai ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ),  $g$  – charakterizuoja energijos mainų tarp elektronų ir gardelės sistemų tempą ( $Wm^{-3}K^{-1}$ ),  $S(z, t)$  – šilumos šaltinį aprašantis lygties narys, proporcingas lazerinės spinduliuotės ( $Wm^{-3}$ ) sugerčiai. Čia šiluminės talpos, laidžiai ir elektronų-fotonų ryšį apibūdinantis daugiklis yra priklausomi nuo elektronų temperatūros. Kaip pavyzdys 1.3 paveikslėlyje yra pavaizduotas apskaičiuotasis 500 fs lazerinio impulso, eksponuojančio aukso plėvelę ant silicio dioksido pagrindo, atvejo

modeliavimas, kur matome, kad per labai trumpą laiko tarpą elektronai nespėja perduoti energijos į aplinkinę medžiagą ir sulaiko visą šilumą. Siekiant geriau suprasti pažaidos procesus medžiagose daug vertingos informacijos gali suteikti ir pažaidos morfologija. Tam tikri morfologijos ypatumai, gali suteikti papildomos informacijos apie vykstančius procesus.

Kalbant apie metalinių dangų pažaidos morfologijas, Y. Jee ir kiti [7] aprašė gautąsias po vieno 1064 nm lazerinio impulso ant varinės dangos (1.4 pav.). Taigi, autoriai pastebėjo, jog tikėtini įvairūs scenarijai: paviršiaus valymas,

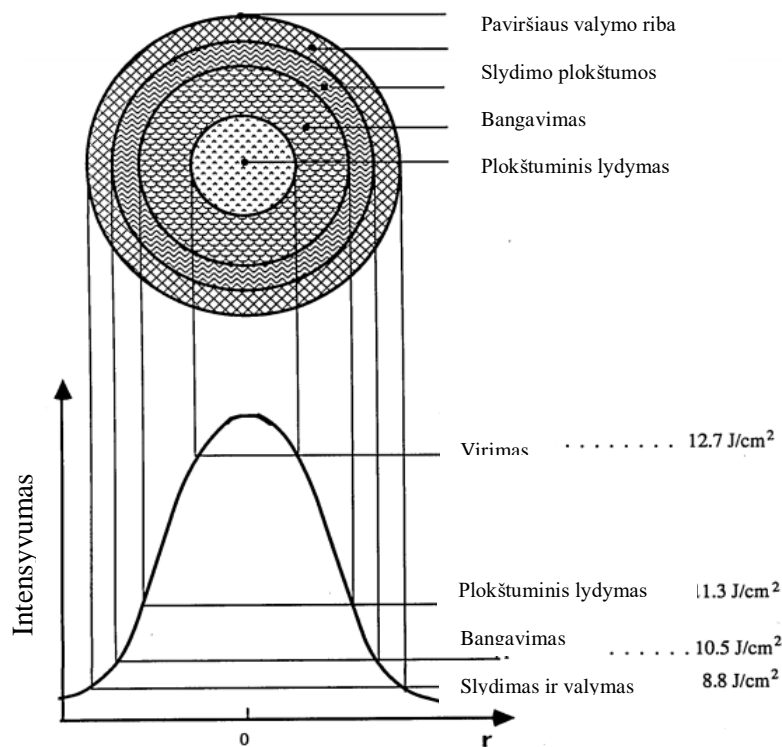
slydimo plokštumų susidarymas, medžiagos paviršiaus bangavimas, plokštuminis lydymasis ir virimas. Paviršiaus valymo atsiradimas ir slydimo plokštumų susiformavimas buvo pastebėtas tuo pačiu metu. Paviršiaus valymą galima paaiškinti tuo, kad heterogeninės paviršiaus medžiagos, tokios kaip, pavyzdžiui, oksido sluoksniai (atsiradę ruošiant bandinį arba po ruošimo) bent dalinai pašalinamos lazerio spinduliu. Pavyzdžiui, ant varinių paviršių toks oksido sluoksnis (CuO ar CuO<sub>2</sub>) laikui bėgant nuolat auga ir turi mažesnę pažaidos slenkstį nei pats substratas [8, 9]. Prieš paties



1.3 pav. Impulsiniu lazeriu apšviestos aukso plėvelės temperatūriniai profiliai ( $T_e$  – elektronų temperatūra,  $T_g$  – gardelės temperatūra). Lazerio bangos ilgis – 800 nm, impulso trukmė - 500 fs, o energijos įtėkis - 0,85 J / cm<sup>2</sup>. Auksinės plėvelės storis – 100 nm, substratas – silicio dioksidas [6].

substrato pažeidą oksidavęsi paviršiai gali būti desorbuoti, ištirpinti ar išgarinti. Toks heterogeninės medžiagos sluoksnio pašalinimas gali būti tiesiogiai susijęs su pagrinduko dangos aukščio ir tuo pačiu kokybės kitimu. Taip pat kartu su paviršiaus valymo reiškiniu stebimas ir slydimo plokštumų susiformavimas (plačiau 1.2.2. skyriuje), kuris rodo, kad metalinių paviršių sąveika su lazerio impulsais šalia pažeidimo ribos yra termomechaninė. Toliau didinant lazerinio impulso intensyvumą stebimas medžiagos bangavimas. Nors dažniausiai bangų kryptis yra statmena veikiančiam optiniam elektriniam laukui, metalinėse dangose ji priklauso nuo slydimo plokštumų krypties, o tarpai tarp bangelių yra artimi spinduliuotės bangos ilgiui [10]. Nors vienareikšmiško atsakymo nėra, egzistuoja nuomonė, kad „bangavimas“ arba periodiniai raibuliai susidaro dėl konstruktyvios krintančios ir atsispindėjusios nuo paviršiaus šviesos interferencijos. Egzistuoja ir kitokių nuomonių, kur periodinių struktūrų susidarymas siejamas su plazmos bangų sužadinimų paviršiuje. Jei lazerinio impulso energija yra pakankamai stipri, bet vos mažesnė nei lydymosi riba – dėl šviesos interferencijos paviršiaus sluoksnis gali būti lokaliai išlydomas. Ten, kur formuojasi bangavimasis, lydymas yra tolygus. Šis mechanizmas įtraukia ir prieš pasibangavimus atsirandančias slydimo plokštumas, kurios sukuria palankią terpę šviesai sklaidyti. Toliau didinant šviesos intensyvumą atsiranda plokštuminis lydymas, pasižymintis lygia plokštuma (kartais galima matyti tik labai ilgų periodų ir mažos amplitudės bangavimus). Tipinė

plokštuminio lydymosi morfologija – išsilydymas visame tūryje, apsuptas pasibangavimų ir slydimo plokštumų. Toliau didinant lazerinės spinduliuotės įtekį atsiranda virimo sukeltų pėdsakų. Šiuos požymius galima lengvai atpažinti pagal netaisyklingą formą ir „krateriavimą“. Šią morfologiją visada lydi žiediniai regionai, susidarantys iš plokščio tirpimo, pasibangavimo ir didelio slydimo linijų ploto aplinkinėje medžiagoje. Virimo tipo pažeidimų židiniai dažnai yra

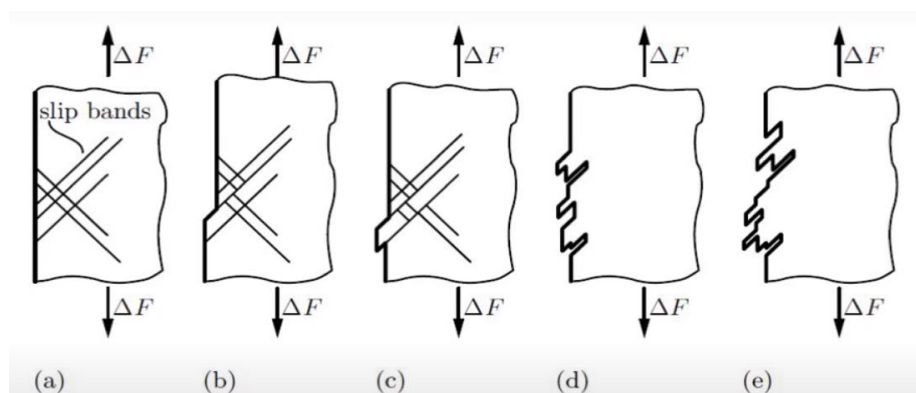


1.4 pav. Pažeidos morfologija po 1-į-1 testo. Didėjant lazerio energijai atsiranda paviršiaus valymas ir slydimo plokštumos, pasibangavimai, plokščias tirpimas ir virimas. Lazerinės spinduliuotės įtekio vertės yra pateiktos chemiškai poliruotiems Cu

gamybiniai arba lazerio spinduliuote sukelti paviršiaus defektai. Virš virimo ribos medžiaga išstumama iš paviršiaus kartu su šviesos blyksniu ar kibirkštimi [11]. Blyksnis gali atsirasti, nes staigus temperatūros padidėjimas nedideliame tūryje sukelia aukšto slėgio bangą arba smūginę bangą [12], o tada medžiaga išgarinama ir išstumama su didele kinetine energija. Eksperimentiniu būdu Y. Jee gauti 1-į-1 testo pažaidos slenkščiai nanosekundėse (1064 nm): variui – 10,7 J/cm<sup>2</sup>, tuo tarpu aliuminio pažaidos kreivė yra statesnė, o slenkstis gerokai žemesnis – 0,88 J/cm<sup>2</sup>. Aliuminio pažaidos morfologija buvo panaši į vario, tik nebuvo stebėtas paviršiaus valymas. Taip galėjo atsitikti, nes iš karto po gamybos susiformavo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksido sluoksnis, kuris neleido toliau oksido sluoksniui augti.

### 1.2.2. Optinis nuovargio efektas ir poveikio kaupimas daugelio impulsų atveju

N. Koumvakalis ir kiti [13] paaiškino, kad pažaidą, atsirandančią metalinėse dangose (konkrečiai nagrinėti – variu dengti veidrodžiai) po daugiau nei vieno impulso, lemia plastinės deformacijos kaupimasis, atsirandantis dėl lazerinės spinduliuotės sukkelto pasikartojančio šiluminio įtempio. K. Differt ir U. Essmann konkrečiau apibrėžė, kad gerai paruoštiems, švariems paviršiams dominuojantis pažaidos mechanizmas yra slydimo plokštumų susidarymas [14]. Tokios plokštumos susidaro iš plokščių, orientuotų lygiagrečiai pagrindinei slydimo plokštumai, į kurią koncentruojasi krūvis. 1.5 paveikslėlyje matome slydimo plokštumų susidarymo morfologiją, o pagrindinis ją sukeliantis parametras – medžiagos plastinės šlyties deformacijos amplitudė – yra priklausoma nuo temperatūros. Taigi, turint daugelio impulsų spinduliuotę, su kiekvienu impulsu didėjanti medžiagos temperatūra lemia plastinių deformacijų susidarymą. Toks medžiagos plokštumų slydimas skirtingomis kryptimis pasireiškia kaip paviršiaus šiurkštumo padidėjimas. Šiurkštumas lemia gerokai žemesnį pažaidos slenkstį nei reikalingą katastrofiniam pažeidimui įvykti, nes tokia terpė



1.5 pav. Slydimo plokštumų (įsibrovimų ir išspaudimų) – šiurkštumo formavimasis metaluose dėl ciklinės apkrovos. Ciklo skaičius didėja iš kairės į dešinę [15].

šviesą absorbuoja geriau ir yra mechaniškai netvirta. Toliau su kiekvienu impulsu ši plastinė deformacija kaupiasi kol įvyksta katastrofinė pažeida. Kai turime daug impulsų, žinome, kad medžiagoje atsiranda nuovargio efektas ir, didėjant impulsų skaičiui, PLSS mažėja. Akumuliacijos kreivės nuolydis yra tiesiogiai proporcingas atsparumui plastinei deformacijai, kuris priklauso nuo medžiagos kristalinės orientacijos. Lazerinę akumuliaciją galima aprašyti pasinaudojant mechaniniu metalų nuovargio morfologija, nes, pasirodo, kad mechaniškai veikiami metalai nuovargio morfologija yra panašiai į lazerinę akumuliacijos sukeltą nuovargį [7]. Toliau palyginsime lazerio sukeltą ciklinį stresą su medžiagos parametrais, gautais atliekant mechaninio nuovargio bandymus. Terminio streso (šiluminio plėtimosi jėgos)  $\sigma$  amplitudė  $s$ , sukelta lazerinės spinduliuo (1.3) proporcinga paviršiaus temperatūrų pokyčiui  $dT$ :

$$\sigma = -\frac{E\alpha dT}{(1-\nu)},$$

kur  $\nu$  – Puasono (Poisson) koeficientas,  $E$  – Jungo (Young) modulis ir  $\alpha$  – terminio plėtimosi koeficientas. Tuo tarpu temperatūrų pokytis  $dT$  priklauso nuo lazerinės spinduliuotės įtėkio  $F$  ir medžiagos sugerties  $A$  koeficiento (laikoma, kad impulso metu jis nekinta):

$$dT = \frac{2A}{(\pi K C t_p)^{1/2}} F, \quad (1.4)$$

kur  $K$  yra šiluminis medžiagos laidumas,  $C$  – šiluminė metalo talpa,  $t_p$  – tolygaus stačiakampio lazerinio impulso plotis. Taigi, iš lygčių (1.3) ir (1.4) matome, kad indukuotos deformacijos amplitudė tiesiogiai priklauso nuo lazerinės spinduliuotės įtėkio. Kai sukeliama deformacija amplitudė yra didesnė už reikiamą jėgos kiekį, po kurio metale atsiranda plastinė deformacija – pasireiškianti slydimo plokštumų susidarymu ir padidėjusiu šiurkštumas medžiagos paviršiuje. Ši deformacija yra kaupiamoji ir geriau išryškėja turint pakartotinius lazerinius impulsus – paviršiaus šiurkštumas didėja. Turime galimybę nustatyti plastinės deformacijos energiją  $W$  per lazerio impulsą:

$$dW = \sigma \epsilon_p - \int_0^{2\sigma} \epsilon_p d\sigma = 2\sigma \epsilon_p (1-n)/(1+n), \quad (1.5)$$

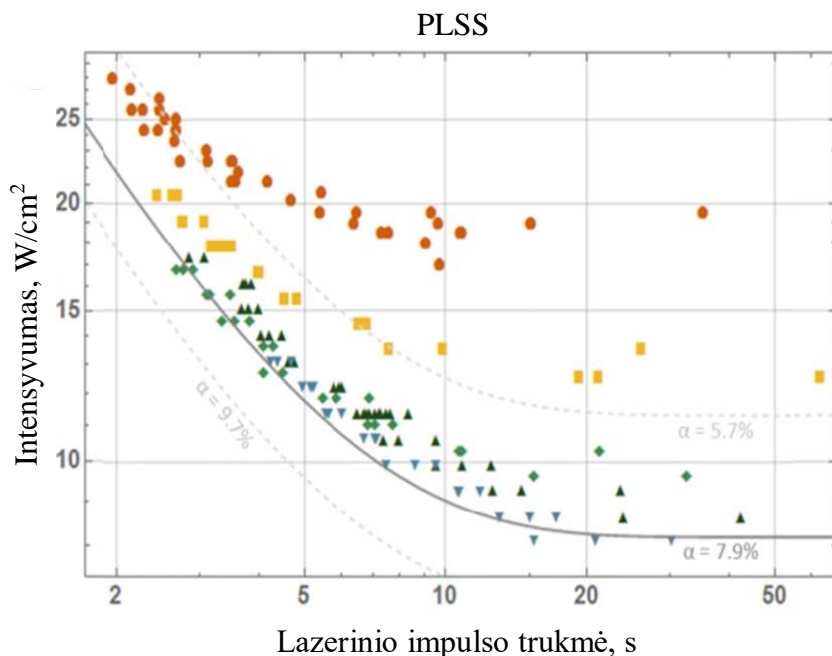
o visa energija yra gaunama viską padauginant iš impulsų skaičiaus:

$$W = dWN = 2 \frac{1-n}{1+n} \sigma_f \epsilon_f N^{b+c+1}, \quad (1.6)$$

kur  $n$  yra ciklinis metalo stiprinimo plastinės deformacijos pagalba rodiklis,  $b$  – atsparumo senėjimo procesui rodiklis,  $c$  – plastiškumo apkrovos metu rodiklis,  $\epsilon_f$  – plastiškumo apkrovos metu koeficientas,  $\sigma_f$  – atsparumo senėjimo procesui koeficientas,  $\epsilon_p$  - plastinė deformacija ties pažeidimo riba. Kalbant apie metalinių dangų PLSS priklausomybę nuo impulso trukmės literatūroje egzistuoja

nuomonė, kad pažeidimo mechanizmai femtosekundiniams ( $10^{-15}$  s) impulsams skiriasi nuo pažeidimo mechanizmų nanosekundiniams ( $10^{-9}$  s) impulsams [16]. Nanosekundinių impulsų atveju pažeidimas atsiranda dėl medžiagos kaitinimo, kuris sukelia tirpimą ar abliaciją – elektronai sugeria lazerio energiją ir lieka šiluminėje pusiausvyroje su aplinkine atominė gardele. Tuo tarpu femtosekundiniai impulsai perduoda energiją jonizuodami atomus (iš pradžių per daugiafotonę jonizaciją, o tada jei turime dielektrikus – per griūtinę jonizaciją) ir įgreitindami laisvuosius elektronus lazerinės šviesos lauke. Tuomet, gavę iš lazerio energiją, šie neterminiai elektronai grįžta į nesužadintą būseną per elektronų-elektronų susidūrimus ir atiduoda energiją į šiluminės energijos „rezervuarą“, kuris atiduoda energiją aplinkinei gardelei per elektronų-fononų susidūrimus. Toks energijos išsklaidymas vyksta labai trumpame ilgio ruože, (lyginant medžiagos sąveika su ilgesniais impulsais) ir rezultatas yra deterministiniai pažeidimo plotai, turintys mažą morfologinį pokytį aplinkinėje medžiagoje.

Atlikti eksperimentiniai metalinių dangų PLSS tyrimai [17] (aptariamu atveju tirtas auksinis veidrodis) ultratrumpų impulsų ruože rodo, kad PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės femtosekundinėje ir pikosekundinėje srityje beveik nėra. Priklausomybė atsiranda nuo nanosekundinių impulsų trukmių, kur PLSS nuo 100 ps iki 1 ns padidėjo maždaug 2 kartus. Toliau kalbant apie metalų PLSS priklausomybę nuo impulso trukmės santykinai ilgų impulsų regione – PLSS intensyvumas gali būti aprašomas tokiu dėsniu [18]:



1.6 pav. PLSS intensyvumo priklausomybė nuo lazerinio impulso trukmės logaritmėje skalėje. Tirti bandiniai - 55  $\mu\text{m}$  storio lankšios polietileno tereftalato (PET) plėvelės, dengtos 80 nm Al + 100 nm  $\text{MgF}_2$  sluoksniais. Skirtingos spalvos taškai žymi skirtingą lazerinio pluošto diametrą: raudoni – 0,32 cm, geltoni – 0,61 cm, žali – 0,94 cm, mėlyni – 2,5 cm. [19].

$$I_{PLSS}(t) = \frac{2h_{ef}(T_{kritisė}-T_{oro})}{\alpha(1-e^{-t/\tau})}, \text{ kai } T_0 = T_{oro}, \quad (1.7)$$

$$t' = \frac{L}{2h_{ef}} c_p \rho, \quad (1.8)$$

kur  $T_0, T_{oro}, T_{kritinė}$  – atitinkamai pradinė medžiagos, aplinkos ir kritinė pažaidos temperatūros,  $h_{ef}$  – efektyvusis konvekcijos koeficientas [ $W/m^2K$ ],  $\alpha$  – santykinis sugerties koeficientas tam tikram bangos ilgiui,  $L$  – medžiagos storis,  $\rho$  – jos tankis, o  $c_p$  – savitoji šiluma: nurodo energiją, kurios reikia 1 kg medžiagos norint pakelti temperatūrą 1 K. [ $J/kgK$ ]. Jį patikrino K. Slinkeris su kolegomis [19] ir, atlikę eksperimentus su plonomis polietileno tefalato plokštelėmis, dengtomis Al ir MgF<sub>2</sub> sluoksniais, pamatė, kad rezultatai (1,6 pav.) sutampa su turimu dėsniu (pažymėtas pilka linija).

## 2. Darbo metodika

Šiame skyriuje pateikiamos eksperimentų atlikimui reikalingos priemonės, aptariami naudojami metodai, algoritmai ir schemas.

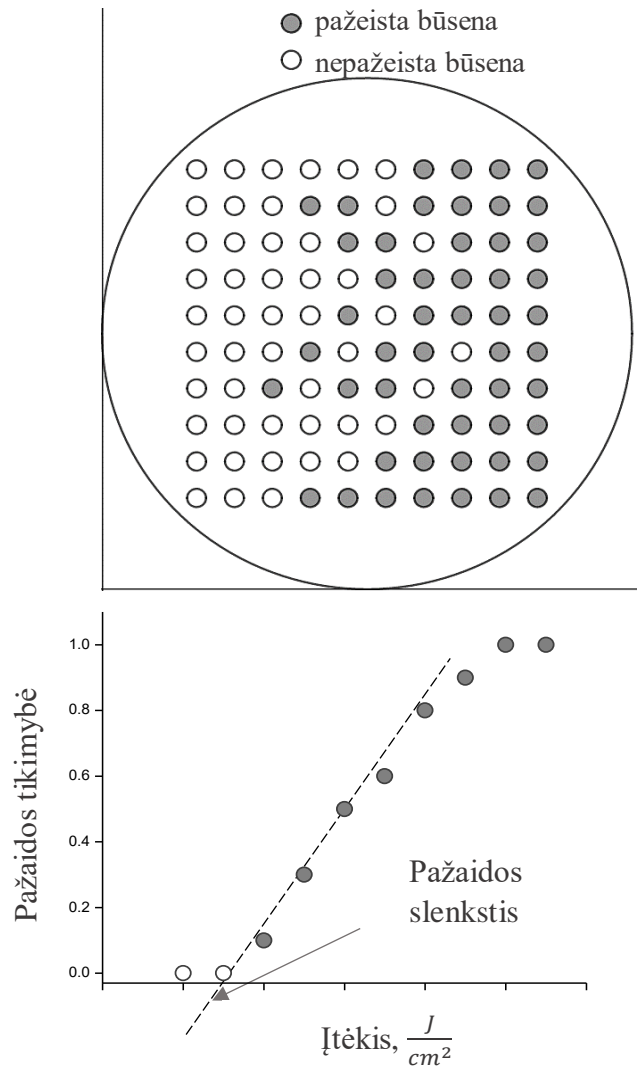
### 2.1. „1-į-1“ ir „S-į-1“ PLSS testavimo protokolai

Optinio atsparumo tyrimų procedūras apibrėžia tarptautiniai ISO standartai [20, 4]. Pagal ISO 11254-2 pažeidimo slenksčio nustatymas remiasi pažeidimo tikimybe (santykinio pažeidimo dažnio) metodu. Taigi, siekiant pateikti vertinimus apie optinį atsparumą reikia surinkti eksperimentinius duomenis – statistinę informaciją, kurią būtų galima apdoroti ir apibendrinti. Tokias duomenų imtis galima gauti eksperimentiškai: atliekant realius matavimus – lazeriu eksponuojant bandinį. Pagrindiniai PLSS testai, tokie kaip „1-į-1“ ir „S-į-1“, yra reglamentuoti ISO standartuose.

„1-į-1“ testas yra gana greitas ir dažniausiai naudojamas norint nustatyti ne nuovargio sukeltą bandinio pažeidimo slenksčio ribą, o įvertinti optikos poliravimo ar dangų kokybę nustatant konkretaus bandinio defektų tankį. Testo eiga: tarkime, turime bandinį, kurio pažeidimo slenkstį norime nustatyti: suskirstome jo paviršių į 100 atskirų plotelių –  $10 \times 10$  celių (testavimo vietų) matricą (2.1 pav. viršuje). Atstumas tarp atskirų celių turėtų būti ne mažesnis kaip  $6r$ , kur  $r$  yra Gausinio pluošto spindulys  $\frac{1}{e^2}$  lygyje. Kiekviena celė testo metu bus eksponuojama lazerio spinduliuote. Kiekvieną iš 10 matricos stulpelių eksponuojame parinkdami vis kitą apšvitos intensyvumą (įtėkį): kiekvienam stulpeliui naudojame fiksuotą vidutinį įtėkį. Jeigu kiekvieną stulpelio plotelį apšviečiame po vieną kartą – sakome, kad vykdomas „1-į-1“ testas (jei kiekvienam plotui tenka 1000 pasikartojančių lazerio impulsų sakome, jog atliekamas „S(=1000)-į-1“ testas). „Prabėgus“ visą stulpelį, didiname smailinį apšvitos intensyvumą ir eksponuojame kitus stulpelius, kol baigiasi bandiniui skirtų nepanaudotų celių skaičius. Kitų lazerio parametrų testo metu nekeičiame. Taip nuskenavus visą bandinį, galime apskaičiuoti pažeidimo tikimybę kiekvienam stulpeliui, priklausomai nuo mus dominančio parametro, apibūdinančio pažeidimo slenkstį (šiuo atveju – smailinio įtėkio). Tikimybės reikšmė  $i$ -tajam stulpeliui apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_i(I_i) = \frac{n_{p_i}}{n_{n_i} + n_{p_i}}, \quad (2.1)$$

kur  $n_p$  ir  $n_n$  atitinkamai yra pažeistų ir nepažeistų plotelių skaičius. Kitaip tariant, pažaidą patyrusių celių suma dalijama iš bendro celių skaičiaus stulpelyje (eksponuojant tą pačią intensyvumo vertę), o smailinis intensyvumas kurio atžvilgiu matuojama tikimybė – vidurkinamas. Gautas pažaidos tikimybės priklausomybės nuo lazerio pluošto intensyvumo rezultatas matomas 2.1 paveikslėlio apačioje. Pažaidos tikimybės verčių, kurios nėra lygios 1 arba 0, tiesinė aproksimacija ir ekstrapoliacija padeda rasti pažaidos slenksčio vertę [5]: ieškome tokios tiesės susikirtimo su x ašimi vertės, kuri ir atitiks ieškomą pažaidos slenksčio vertę. Ši vertė turės atitinkamą neapibrėžties intervalą. Bendru atveju pažaidos tikimybės ir įtekio sąryšis nebūtinai yra tiesinis. Jį lemia konkretaus bandinio paviršiuje esantys defektai, o tiksliau, jų lokalių pažaidos slenksčių skirstinys. Norint pažaidos slenksčių nustatyti kuo realesnėmis naudojimui sąlygomis, atsižvelgiant į senėjimo procesą ir nuo spinduliuotės pasikartojimo dažnio priklausančius efektus, atliekami „S-į-1“ testai. Kadangi optikos senėjimo procesas yra susijęs su medžiagos nuovargiu, daugiau nei 1 impulsas į celę padeda įvertinti kaip greitai vyksta kaupiamieji medžiagos procesai arba kaip greitai inkubuojamos defektinės būsenos. Tokius duomenis galima ekstrapoliuoti, norint sužinoti kada duotajam įtekiui bus pasiekta gyvavimo trukmės riba.

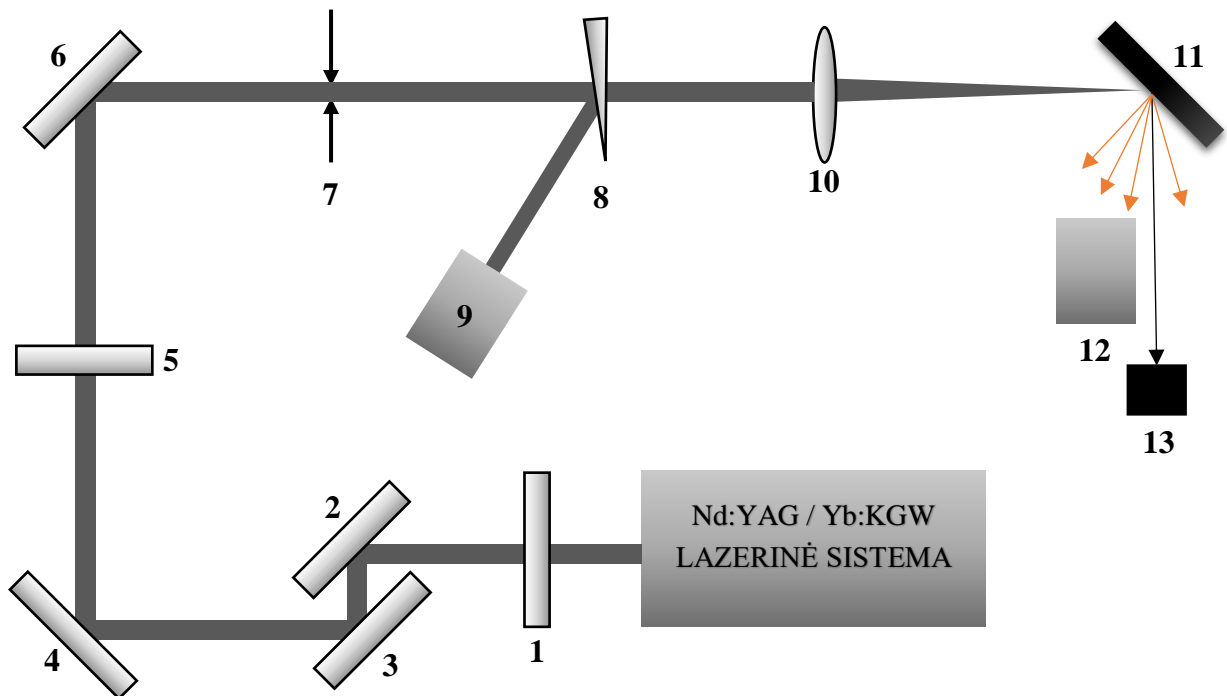


2.1 pav. Pažaidos slenksčio nustatymas remiantis pažaidos tikimybės metodu. Viršuje – bandinys, padalintas į celes, apačioje – apskaičiuotoji pažaidos tikimybė.

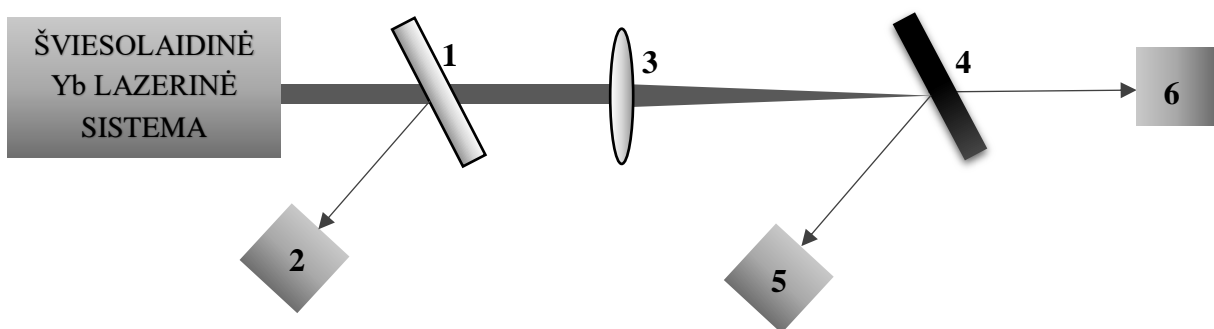


## 2.2. Eksperimentinė įranga

Pažaidos slenksčio eksperimentai buvo matuojami Nd:YAG (Innolas, Spitlight Hybrid II), Yb:KGW (Light conversion, Pharos) ir šviesolaidine Yb (IPG, YLS-6000) lazerinėmis sistemomis. Nd:YAG lazeris 100 Hz dažniu generuoja pasikartojančius ~100 mJ energijos impulsus, kurių vidutinė trukmė ~8,8 ns, o centrinis bangos ilgis – 1064 nm. Pharos sistema turi derinamą 200 fs – 10 ps lazerinio impulso trukmę, o centrinis bangos ilgis yra 1030 nm. Šviesolaidinis Yb lazeris generuoja nuolatinės veikos 1070 nm bangos ilgio spinduliuotę, kurios maksimali vidutinė galia siekia iki 6000 W, o trukmė gali būti keičiama nuo 1 ms iki minučių. Vis dėl to šio darbo eksperimentuose maksimali impulso trukmė buvo apribota iki 10 s, siekiant sumažinti gaisro pavojaus ir pašalinių terminių reiškinų riziką (esant didelei nuolatinei galiai galimas stiprus netoli spinduliuotės esančių elementų įkaitinimas ar net išlydymas). Principinės lazerinių sistemų schemas pavaizduotos 2.2 ir 2.3 paveikslėliuose. 2.2 paveikslėlyje pateikta principinė Nd:YAG ir Yb:KGW lazerių schema: iš lazerio išeinančio pluošto energija reguliuojama fazine plokšte ir poliarizatoriais; didelio atspindžio veidrodžiais pluoštas nukreipiamas į kompiuteriu valdomą sklendę, kuri kontroliuoja lazerinių impulsų kiekį tenkanti konkrečiai bandinio vietai; tuomet pleištinė plokštelė dalį šviesos atspindi į fotodiodą, skirtą impulsų energijos stebėjimui matavimų metu (atspindėta šviesos dalis yra tiesiogiai proporcinga tai daliai, kuri apšviečia bandinį); lęšiu lazerinis pluoštas fokusuojamas į bandinį, kuris su lazerio pluoštu sudaro norimą kampą; nuo bandinio atsispindėjęs pluoštas nukreipiamas į gaudyklę; pažaidos atveju paviršius suardomas ir dalis pluošto patenka į sklaidą registruojantį diodą, kuris suteikia informaciją apie bandinio pažaidą: jei bandinys nepažeistas – lazerio pluoštas atsispindės tokiu kampu, koku ir krito (į fotodiodą nepateks), tačiau, jei pažaida įvyksta, toks paviršius sklaido lazerio pluoštą ir fotodiodas užfiksuoja padidėjusį signalą; šiuos signalus kiekvienam impulsui registruoja kompiuteris ir iš jų suteikiamos informacijos galima pasakyti po kelinto kritusio lazerio impulso įvyko pažaida. Toliau 2.3 paveikslėlyje matome principinę nuolatinės veikos lazerio schemą: iš lazerio išeinančio pluošto energija gali būti reguliuojama skirtingo atspindžio veidrodžiais ir toliau ji yra fokusuojama į testuojamą bandinį; mūsų atveju bandinys testuojamas minimaliu šia sistema galimu matuoti 12 laipsnių kampu; lazerinės spinduliuotės atspindžiai yra sustabdomi pluošto gaudyklėmis.



2.2 pav. Principinė optinio atsparumo tyrimų eksperimento schema tyrimams trumpų lazerinių impulsų ruože (200 fs – 8 ns. 1 – fazinė plokštelė, 2;3 – poliarizatoriai, 4;6 – nukreipiamieji veidrodžiai, 5 – sklendė, 7 – apertūra (naudojama tik nestabilios lazerio pluošto energijos tyrime), 8 – pleištinis veidrodis, 9;12 – fotodiodai, 10 – lęšis (bandymams su skirtingo diametro pluoštais naudoti skirtingi lęšiai), 11 – bandinys, 13 - gaudyklė.



2.3 pav. Optinio atsparumo tyrimų eksperimento schema nuolatinės veikos režimui. 1 – kreipiantysis veidrodis, 2;5;6 – lazerinio pluošto gaudyklės, 3 – glaudžiamasis lęšis, 4 – testuojamas bandinys.

### 2.3. Eksperimentiniai bandiniai

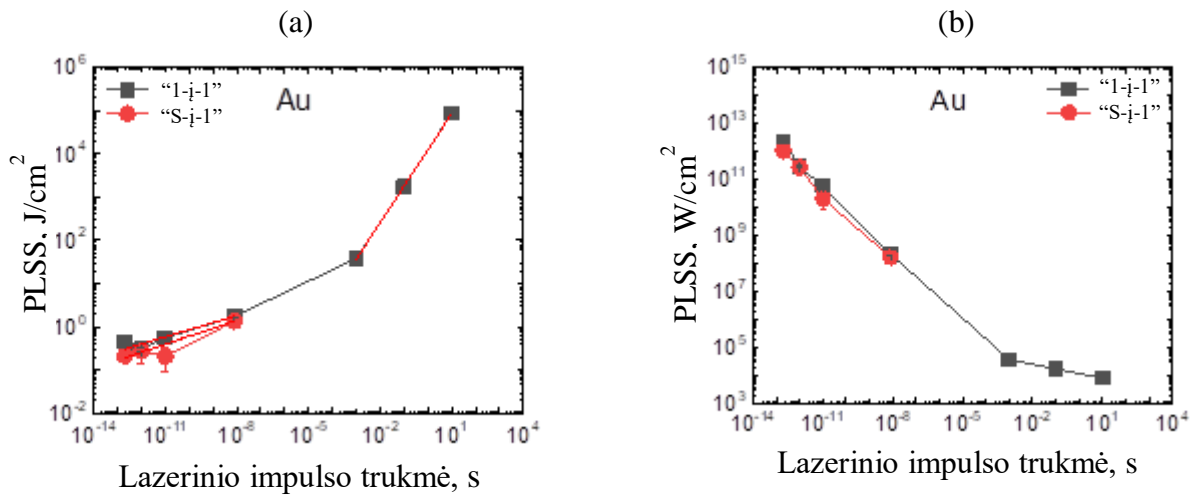
Specialiai šiam tyrimui Hanoverio mieste, Vokietijoje, esančiame Lazerių centre buvo pagaminti 10-ties rūšių bandiniai. Daugiausiai – ant borosilikatinio stiko pagrindukų padengti metaliniai veidrodžiai ir keli puslaidininkiniai bandiniai (Si ir Ge). Bandinių diametras – 63 mm ir tokio ploto užtenka atlikti eksperimentus su visomis aprašytomis lazerinėmis testavimo sistemomis. Dangų sluoksniai ir pasluoksniai (tikslus storis nėra žinomas) sudaro tokią sistemą: pagrindukas - rišantysis sluoksnis - metalinis sluoksnis - apsauginis sluoksnis - oras. Apibendrinta informacija apie bandinių sudėtį pateikta lentelėje 2.1.

Lentelė 2.1. Tiriamų optinių elementų dangų dizainai

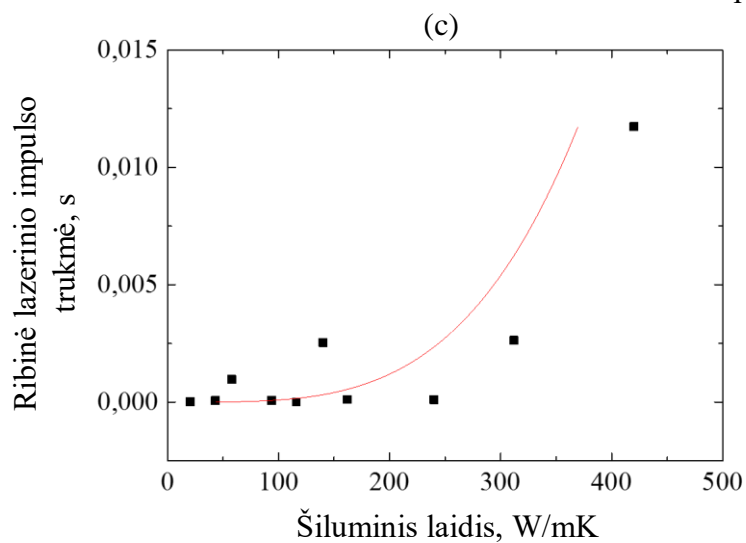
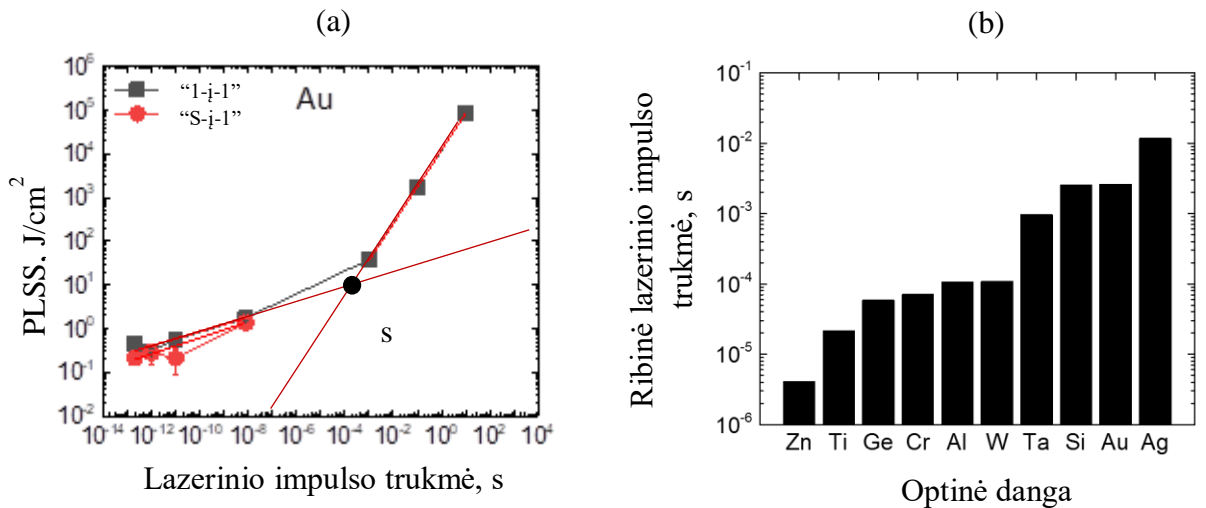
Bandinio numeris	Techninis dangos numeris	Rišantysis sluoksnis	Metalinis sluoksnis	Dangos storis, nm	Apsauginis sluoksnis	Pagrindukas
1	Z201119	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Cr	50,4	-	Stiklas
2	Z201203	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Ti	12,5	SiO <sub>2</sub>	Stiklas
3	Z201118	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Au	300,0	-	Stiklas
4	Z201127	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Ta	86,0	SiO <sub>2</sub>	Stiklas
5	Z201120	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Ag	105,0	-	Stiklas
6	Z202216	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	48,0 - 73,6	SiO <sub>2</sub>	Stiklas
7	Z201102	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	W	50,5	-	Stiklas
8	Z201202	-	Ge	1000,0	-	Stiklas
9	Z201127	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Al	Zn	-	-	Stiklas
10	Z201204	-	Si	1000,0	-	Stiklas

### 3. Rezultatai ir jų aptarimas

Atliekant pažaidos slenkščio tyrimą buvo ištirti visi 2.1 lentelėje pateikti bandiniai: eksperimentiniu būdu nustatytos būdingos PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės (išlaikant beveik tokį patį pluošto diametrą ir artimą tarpusavyje bangos ilgį, impulso trukmė buvo keičiama 13-os eilių ribose). Matavimai buvo atlikti pagal „S-į-1“ ir „1-į-1“ testavimo protokolus: „S-į-1“ – taikytas tik trumpų impulsų ruože (nuo  $10^{-13}$  s iki  $10^{-8}$  s), tuo tarpu „1-į-1“ testai atlikti visame impulso trukmių ruože (nuo  $10^{-13}$  s iki 10 s). Atlikus testus analizės buvo padarytos dviems pažaidos tipams – inicijuotajai (bet koks matomas pokytis) ir katastrofinei pažaidai (aiškiai matomas paviršiaus suardymas). Išanalizavus duomenis paaiškėjo, kad abiejų tipų pažaidų PLSS rezultatų dėsningumai yra labai panašūs, tad toliau buvo pasirinkti nagrinėti tik katastrofinės pažaidos rezultatai. Kiekvienam bandiniui PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės pirmiausia buvo pateiktos pagal energijos dozę ploto vienetui – smailinį įtekį ( $J/cm^2$ ). Tai dažniausiai naudojamas matas pažaidos slenkščio įvertinimui, kai kalbama apie trumpus impulsus. 3.1 (a) paveikslėlyje matome aukso (Au) pavyzdį. 3.1 (b) dalyje pateikta aukso PLSS priklausomybė nuo impulso trukmės pagal galios ploto vienetui ( $W/cm^2$ ) (apšvitos arba intensyvumo) kriterijų. Šis mato vienetas labiau naudojamas ultratrumpųjų impulsų ir medžiagos netiesinei sąveikai apibūdinti. Lyginant „1-į-1“ testavimo protokolo rezultatus su „S(1000)-į-1“ protokolu, matome, kad tirtose lazerinio impulso trukmėse pastarasis turi žemesnį PLSS. Tai patvirtina, kad medžiagai iš ties būdingas nuovargio efektas (galimai vyksta šilumos kaupimas), todėl jos suardymui reikalingi mažiau galingi impulsai nei vieno impulso atveju (ši tendencija buvo matoma visuose tirtuose bandiniuose). Žiūrint į 3.1 pav (a) dalyje pateiktus rezultatus akivaizdu, kad pažaidos slenkstis, lazerinio impulso trukmei kintant nuo  $10^{-3}$  s iki 10 s kinta ženkliai (10 000 kartų) – per 4 eiles, o trumpesnių (nuo  $10^{-13}$  s iki  $10^{-8}$  s) impulsų sritimi – pokytis gerokai mažesnis – nuo 2 iki 10 kartų. Taigi, peršasi išvada, kad pažaidos mechanizmai ilgų ir trumpų lazerinių impulsų srityse yra skirtingi. Galima, numanyti, kad toks „lūžis“ kreivėje atskiria sritis, kur pažaidą lemia sugerta energijos dozė ir vidutinė galia (lyginant 3.1 pav. (a) ir (b) dalis tarpusavyje). Skiriamoji riba greičiausiai susijusi su medžiagos šiluminėmis savybėmis – šiluminiu laidžiu ( $k$ ) ir kalba apie tai, kad jei per impulso trukmę medžiagai suteikta energija nespėja pasklisti į aplinką – pažaidos slenkstis apibūdinamas vienu dėsniu, o jei impulsas trunka ilgai ir tuo metu šiluma jau sklinda iš apšviestos vietos – kitu dėsniu (tai pamatysime ir 3.4 paveikslėlyje pateiktose morfologijose). Taigi, abiejose srityse rezultatus buvo bandoma aproksimuojami įvairiais empiriniais modeliais, tačiau geriausiai rezultatus abiejose srityse pavyko apibendrinti laipsniniu dėsniu  $y = ax^b$  dėsniu. Ilgų ir trumpų impulsų srities aproksimuotos atskirai – nepriklausomai viena nuo kitos (3.2 pav. (a)).



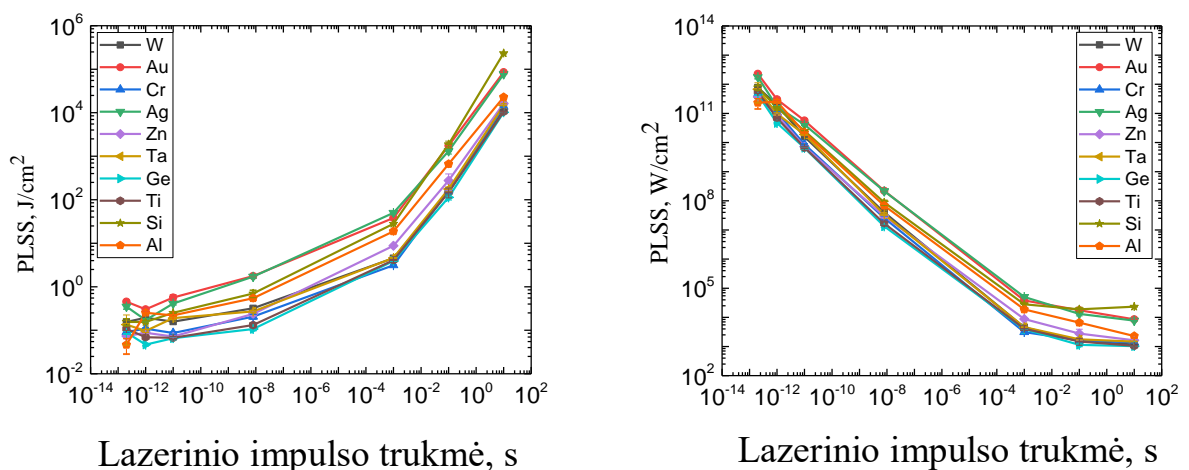
3.1 pav. PLSS priklausomybė nuo impulso trukmės "1-i-1" ir "S-i-1" testavimo protokolų atvejais pagal energijos dozės ploto vienetui (a) ir galios ploto vienetui (b) kriterijus.



3.2 pav. PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės "1-i-1" testavimo protokolo atveju aproksimacijos pagal  $y = ax^b$  dėsnį susikirtimo taško (s) radimas (a), ribinės optinių dangų lazerinio impulso trukmės (aproksimacijų susikirtimo taškai) (b) ir ribinių trukmių koreliacija su medžiagos šiluminio laidumo koeficientu (c).

Ribinė lazerinio impulso trukmė įtariamai yra gautų aproksimacijų susikirtimo taške (3.2 pav. (a) pažymėta raide „s“). 3.2 pav. (b) dalyje pateikti šių taškų rezultatai kiekvienai tiriamai dangai. Čia matome, kad ribinė lazerinio impulso trukmė priklausomai nuo medžiagos kinta per 1000 kartų. Šią tendenciją įdomu palyginti su galimai glaudžiai susijusiu šiluminiu laidžiu. Rezultatai pateikiami 3.2. paveikslėlio (c) dalyje. Kaip matome, didesnę šiluminį laidį turinti medžiaga pasižymės ir didesne ribine impulso trukme. Mat tokia medžiaga geriau perduoda šilumą aplinkinei medžiagai, vadinasi, vyksta lėtesnis taškinis šilimas, todėl pažeidai pasiekti reikalingas ilgesnis eksponavimas lazeriniu impulsu. Taip pat rezultatų triukšmingumą galėjo lemti įvairūs faktoriai: optinių dangų parametrų (grynumo, storio ir pan.), dangų dengimo technologijų (jos nėra žinomos) skirtumų ir pan.

Bandinių tarpusavio palyginimui, 3.3 paveikslėlyje pateikiami visų tiriamų dangų PLSS dėsningumai „1-į-1“ testavimo protokolui. Iš čia matome, kad aukščiausią PLSS beveik visame trukmių ruože turi auksas (Au) ir sidabras (Ag). Galima atkreipti dėmesį, kad gauta šių metalų ribinė impulso trukmė taip pat yra didžiausia. Gauta bendra PLSS tendencija parodo, kad trumpų impulsų ruože slenkstinė galia yra didesnė (3.3 pav. (b)), o reikalinga dozė mažesnė, lyginant su ilgų lazerinių impulsų sritimi. Taip yra todėl, kad: 1. galios atveju eksponuojant medžiagą ilgiau, atsiranda papildomi medžiagos suardymo mechanizmai ir pažeidai pasiekti reikalinga galia yra mažesnė; 2. dozės atveju trumpesnių impulsų ruože medžiaga nespėja perduoti šilumos į aplinkinę medžiagą ir impulso vietoje sukaupiama visa šiluma, o ilgesnių impulsų atveju šiluma spėja difunduoti į tolimesnius medžiagos sluoksnius ir kritinei temperatūrai pasiekti reikalinga didesnė dozė.

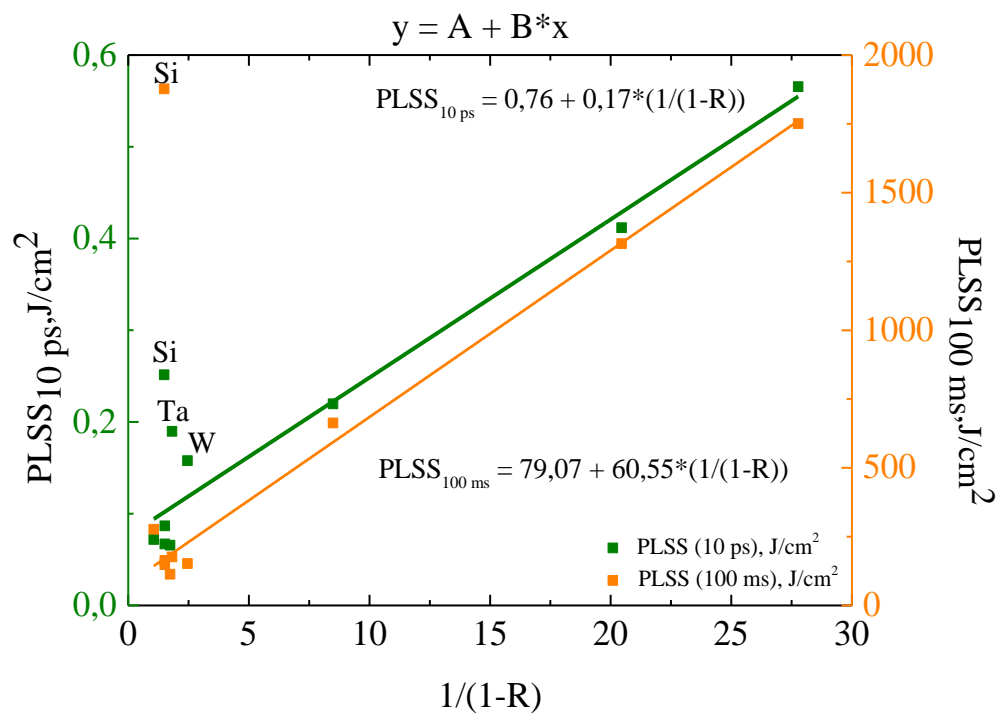


3.3 pav. Tiriamų optinių dangų pažeidos lazerinei spinduliuotei slenkščio priklausomybė nuo lazerinio impulso trukmės „1-į-1“ matavimo protokolui.  $10^{-13}$  s,  $10^{-12}$  s ir  $10^{-11}$  s ribose matavimai atlikti turint 1030 nm lazerinę spinduliuotę,  $10^{-8}$  s – 1064 nm,  $10^{-3}$  s,  $10^{-1}$  s ir 10 s – 1070 nm.

Lentelė 2.1. Tiriamų optinių dangų rezultatai bei parametrai.

	PLSS <sub>10 ps</sub> , J/cm <sup>2</sup>	PLSS <sub>100 ms</sub> , J/cm <sup>2</sup>	Kritinė lazerinio impulso trukmė, s	Lydimosi temperatūra, °C [21]	Šiluminis laidumas, W/mK [22]	Atvirkštinė sugertis, 1/(1-R)
Ge	0,066	113,4	0,000059	938,2	43,2	1,733970
Ti	0,067	148,2	0,000022	1 670	20,4	1,517195
Zn	0,072	276,6	0,000004	419,5	116,0	1,059821
Cr	0,087	163,1	0,000071	1 860	93,9	1,514132
W	0,158	152,0	0,000109	3 422	162,0	2,453653
Ta	0,190	176,3	0,000969	2 980	57,8	1,815981
Al	0,220	662,9	0,000108	660,3	240,0	8,490566
Si	0,252	1 877,3	0,002540	1 411	140,0	1,491548
Ag	0,412	1 314,4	0,011730	961	420,0	20,454545
Au	0,565	1 750,6	0,002630	1 063	312,0	27,777778

Pasirinkus reprezentacinius PLSS rezultatų duomenis trumpų ir ilgų lazerinių impulsų sritims – atitinkamai 10 ps ir 100 ms – buvo rasta PLSS sąsaja su medžiagos sugerties parametru. 3.4

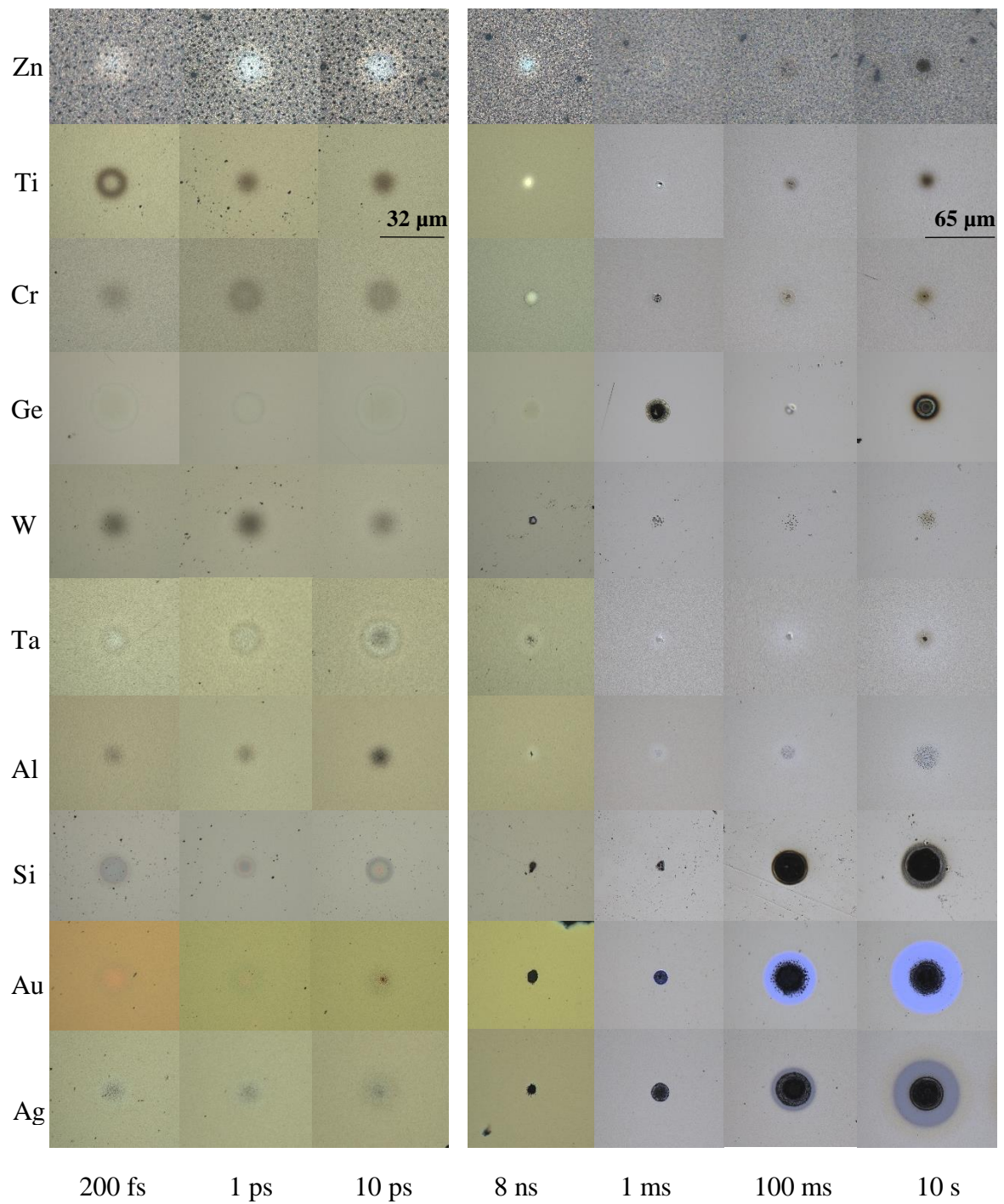


3.4 pav. Tiriamų optinių dangų pažaidos lazerinei spinduliutei slenksčio priklausomybė nuo medžiagos sugerties parametro (1/(1-R)).

paveikslėlyje matome, kad PLSS tiek ilgų, tiek trumpų impulsų srityje yra proporcinga parametrui  $1/(1-R)$ , o tai reiškia, kad, didesnę sugertį turintis metalas turės žemesnę PLSS (tokia medžiaga lengviau kaupia šilumą ir taip greičiau pasiekia kritinę jos vertę). Pastebėjime, kad rezultatuose yra keli nuo dėsnio nutolę taškai, grafike pažymėti atitinkamais metalinių dangų pavadinimais: silicis (Si), tantalas (Ta) ir volframas (W). Silicio „išsišokimą“ galimai lėmė tai, kad šis sluoksnis buvo storiausias iš visų (žr. 2.1 lentelę), tuo tarpu tantalas ir volframas turėjo didžiausią lydymosi temperatūrą (3.1 lentelė). Vadinasi, dangos storis ar kiti šiluminiai parametrai, tokie kaip lydymosi temperatūra, taip pat turi įtakos medžiagos pažaidos lazerinės spinduliuotės slenksčiui.

Toliau 3.5 paveikslėlyje pateikiamos gautos tiriamųjų dangų pažaidos morfologijos: 200 fs, 1 ps ir 10 ps lazerinio impulso trukmių nuotraukos turi 10x, o 8 ns, 1 ms, 100 ms ir 10s - 20x Nomarski mikroskopo didinimą. Pažaidų morfologijos pateiktos prie slenkstinės pažaidos dozės (neviršijant 20% jos reikšmės).





3.5 pav. Nomarskio mikroskopu užfiksuotos būdingos metalinių dangų pažaidos morfologijos (prie slenkstinės pažaidos dozės (neviršijant 20% jos reikšmės)), turinti 10x didinimą 200 fs, 1 ps, 10 ps ir 20x didinimą 8 ns, 1 ms, 100 ms ir 10s lazerinių impulsų trukmėms.

Taigi, iš turimų morfologijų pirmiausia matome, kad trumpų impulsų srityje pirminė pažaida yra inicijuota pažaida, ilgų impulsų atveju – iš karto turime daugiau katastrofinių pažeidimų, kurie aplink kraterį turi ir iš šilumos paveiktų zonų. Tai patvirtina išvadą, kad pažaidos mechanizmai trumpų ir ilgų impulsų srityje vis dėl to skiriasi. Kadangi trumpų impulsų srityje elektronai nespėja perduoti šilumos aplinkinei medžiagai ir iš karto sugeria visą šilumą – turime anksčiau pasireiškiančią, bet dažnai ne katastrofinę pažaidą, nes lazerio spinduliuotės dozė yra mažesnė. Tuo tarpu ilgų impulsų srityje elektronai spėja šilumą pasidalinti su aplinkine medžiaga, todėl pažaidai reikalingos dozė didėjimas lemia ir didesnio masto pažeidimus. Taip pat galime pastebėti, kad pažaidos morfologija skiriasi ir tarp metalų: vieni turi didelę šilumos paveiktą zoną, kiti – vietoje vieno didelio kraterio – daug mažų.

## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Eksperimentiškai ištyrus metalinių dangų pažaidos lazerinei spinduliuotei slenksčio priklausomybę plačiame trukmių ruože nustatyta, kad visoms dangoms būdingos dvi sritys kur PLSS dėsningumai skiriasi: trumpų lazerinių impulsų srityje (200 fs – 8 ns) PLSS kito iki 10-ties kartų ir buvo proporcingas įtėkiui (energijos dozei), o ilgų impulsų srityje (1 ms – 10 s) per 10000 kartų ir buvo proporcingas vidutinei galiai; šioje srityje pažaidos morfologijos pasižymėjo ir šiluminio poveikio zona, todėl galima teigti, kad pažaidos mechanizmai ilgų ir trumpų lazerinių impulsų srityse yra skirtingi.

2. Empiriškai nustatyta, kad visų tirtų dangų atvejais, abiejose (ilgų ir trumpų lazerio impulsų) srityse pažaidos lazerinei spinduliuotei slenksčio priklausomybė nuo impulso trukmės gali būti apibūdinama laipsniniu ( $PLSS = at^b$ ) dėsniu (kur  $t$  – impulso trukmė), o skiriasi tik koeficientų  $a$  ir  $b$  reikšmės: trumpų impulsų srityje laipsnis  $b$  kito nuo 0,01 iki 0,24, o ilgų – nuo 0,77 iki 0,94. Abiejų sričių skiriamoji riba gali būti nustatyta surandant aproksimacijos susikirtimo tašką, kurio skaitinė vertė koreliuoja su šiluminio medžiagos laidumo konstanta, nes didesnis metalo šiluminis laidis sąlygoja efektyvesnę šilumos pernašą aplinkinei medžiagai todėl ilgų impulsų srityje pažaidai pasiekti reikalinga didesnė vidutinė galia.

3. Lyginant visų tirtų optinių dangų (cinko, titano, chromo, germanio, vilframo, tantalio, aliuminio, silicio, aukso ir sidabro) pažaidos lazerinei spinduliuotei slenksčio priklausomybę nuo impulso trukmės, nustatyta, kad ilgų impulsų srityje (ties  $10^{-1}$  s) PLSS tarpusavyje skyrėsi nuo 1877 J/cm<sup>2</sup> (silicis) iki 113 J/cm<sup>2</sup> (germanis), o trumpų (ties  $10^{-11}$  s) – nuo 0,57 J/cm<sup>2</sup> (auksas) iki 0,07 J/cm<sup>2</sup> (germanis, titanis). Tokius skirtumus (ypač ilgų impulsų srityje) didžiaja dalimi nulėmė

medžiagos sugertis – didesnės sugerties metalas turės žemesnį PLSS, nes tokia medžiaga lengviau kaupia lazerio šviesos energiją ir večia ją į šilumą ir taip greičiau pasiekia kritinę jos vertę (galimai – lydymo tašką).

4. Trumpų lazerinių impulsų srityje (200 fs – 8 ns) tirtoms optinėms dangoms lyginant “S(1000)-į-1” ir „1-į-1” testavimo protokolų pažaidos lazerinei spinduliuotei slenksčio vertes, buvo įvertintas nuovargio efektas, nes paskartojančiais impulsais veikiama medžiaga kaupia perteklinę šilumą arba dėl ciklinės apkrovos degraduoja jos vidinę sandara. PLSS “S(1000)-į-1” atveju buvo iki 80 % žemesnis (sidabras) ir skyrėsi tarp tirtų bandinių, kur mažiausią PLSS kritimas stebėtas (30 %) chromo dangoje. Lyginant šių metalų savybes pastebėta, kad chromas išsiskiria 2 kartus didesne lydymosi temperatūra, todėl galimai šis parametras yra susijęs su optikos nuovargio efektu.

## **Padėka**

Dėkoju Laser Zentrum Hannover eV (LZH) mokslininkams (M. Jupe ir kolegoms) už eksperimentinių bandinių paruošimą bei UAB Lidaris už suteiktą galimybę savo tyrimams panaudoti didelės galios nuolatinės nuolatinės veikos optinio atsparumo testavimo sitsemą (bendradarbiavimo sutartis BS-120000-1018, 2015-04-30). Taip pat didelis dėkui kolegai Erikui Atkočaičiui už suteiktą pagalbą matuojant ir analizuojant duomenis.

## Literatūros sąrašas

- [1] Wang, B., & Gallais, L. A theoretical investigation of the laser damage threshold of metal multi-dielectric mirrors for high power ultrashort applications. *Optics Express*, **21**(12), 14698. doi:10.1364/oe.21.014698 (2013),
- [2] D. Ristau, *Laser-induced damage of optical materials*, **7132**, 551, CRC Press, (2014),
- [3] I. V. Aleshin, S. I. Anisimov, A. M. Bonch-Bruевич, Y. A. Imas, and V. L. Komolov, Optical breakdown of transparent media containing micro-inhomogeneities, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **70**, 1214-1224 (1976),
- [4] *Lasers and laser-related equipment – test methods for laser-induced damage threshold-Part 1: Definitions and general principles (ISO 21254-1:2011)*,
- [5] R. M. Wood, *Laser-induced damage of optical materials*, Institute of Physics, 241, CRC Press (2003),
- [6] Wang, B., & Gallais, L. A theoretical investigation of the laser damage threshold of metal multi-dielectric mirrors for high power ultrashort applications. *Optics Express*, **21**(12), 14698. doi:10.1364/oe.21.014698 (2013),
- [7] Jee, Y., Becker, M. F., & Walser, R. M. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America B*, **5**(3), 648. doi:10.1364/josab.5.000648 (1988),
- [8] M. F. Becker, F. D. Domann, A. F. Stewart, and A. H. Guenther, Charge emission and related precursor events associated with laser damage, in *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1983*, Natl. Bur. Stand. U.S. Spec. Pub. 688, 429 (1985),
- [9] J. O. Porteus, D. L. Decker, J. L. Jernigan, W. N. Faith, and M. Bass, Evaluation of metal mirrors for high-power applications by multi-threshold damage analysis, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-14, 776 (1978),
- [10] J. F. Young, J. S. Preston, H. M. van Driel, and J. E. Sipe, Laser-induced periodic surface structure, *Phys. Rev. B* **27**, 1155 (1983); Z. Guosheng, P. M. Fauchet, and A. E. Siegman, Growth of spontaneous periodic surface structures on solids during laser illumination, *Phys. Rev. B* **26**, 5366 (1982); S. R. J. Brueck and D. J. Ehrlich, Stimulated surface-plasma-wave scattering and growth of a periodic structure in laser photodeposited metal films, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1678 (1982),
- [11] C. S. Lee, N. Koumvakalis, and M. Bass, Spot-size dependence of laser-induced damage to diamond-turned Cu mirrors, *Appl. Phys. Lett.* **41**, 625 (1982),
- [12] J. F. Ready, Effects of High-Power Laser Radiation, *Academic*, New York, p. 95 (1971),
- [13] Koumvakalis, N., Lee, C. S., & Bass, M. Single And Multiple Pulse Catastrophic Damage In Diamond-Turned Cu And Ag Mirrors At 10.6, 1.06, And 0.532  $\mu\text{m}$ . *Optical Engineering*, **22**(4). doi:10.1117/12.7973137,
- [14] K. Differt, U. Essmann, Dynamical model of the wall structure in persistent slip bands of fatigued metals in *Fundamental Aspects of Dislocation Interactions* (1993),
- [15] J. Roesler, H. Harders and M. Baeker *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*.

doi:10.1007/978-3-540-73448-2 (2007),

[16] Poole, P., Trendafilov, S., Shvets, G., Smith, D., & Chowdhury, E. Femtosecond laser damage threshold of pulse compression gratings for petawatt scale laser systems. *Optics Express*, **21**(22), 26341. doi:10.1364/oe.21.026341 (2013),

[17] Stuart, B. C., Feit, M. D., Herman, S., Rubenchik, A. M., Shore, B. W., & Perry, M. D. Optical ablation by high-power short-pulse lasers, *Journal of the Optical Society of America B*, **13**(2), 459. doi:10.1364/josab.13.000459 (1996),

[18] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids* in *Oxford University Press* (1959),

[19] K. Slinker, J. Pitz, S. Sihn, J. P. Vernon, Determining and scaling continuous-wave, laser-induced damage thresholds of thin reflectors, *Optics Express* (2019),

[20] Lasers and laser-related equipment – test methods for laser-induced damage threshold-Part 2: Threshold determination (ISO 21254-2:2011).

[21] <https://steelforge.com/literature/metal-melting-ranges/> (žiūrėta 2021-05-20)

[22] Engineering ToolBox. Thermal Conductivity of Metals, Metallic Elements and Alloys. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html) (žiūrėta 2021-05-20).

## Santrauka

Urtė Kimbaraitė

### METALINIŲ DANGŲ OPTINIO ATSPARUMO TYRIMAI: PRIKLAUSOMYBĖ NUO IMPULSO TRUKMĖS

Didelio intensyvumo lazerine spinduliuote eksponuojami optiniai lazerinių sistemų elementai turi tam tikrą atsparumo ribą – maksimalų slenkstinį įtėkį (PLSS) (žemiau slenkščio ribotą veikimo laiką iki pažaidos), kurį viršijus elementas negrįžtamai suardomas. Pažaidą patyręs optinis elementas nebegali būti naudojamas sistemoje, todėl nustoja veikusi visa optinė grandinė. PLSS nėra konstanta – jis priklauso nuo įvairių, tuo tarpu ir apšvitos parametrų: dozės, bangos ilgio, pluošto diametro, impulso trukmės ir pan. Nuoseklių metalinių dangų PLSS priklausomybės nuo impulso trukmės tyrimų – mažai arba jie apima tik siaurą impulso trukmių intervalą. Todėl, šio darbo tikslas yra eksperimentiniu būdu įvertinti metalinių dangų optinio atsparumo priklausomybę nuo lazerinio šaltinio impulso trukmės itin plačiame lazerinių impulsų trukmių ruože – nuo 200 fs iki 10 s.

Darbo metu, taikant ISO standarte aprašytas „1-į-1“ ir „S-į-1“ testavimo metodikas buvo pamatuoti 10-ties rūšių bandiniai: aukso, sidabro, aliuminio, cinko, titano, chromo, volframo, tantalo bei germanio ir silicio veidrodžiai. Iš gautų rezultatų matyti, kad šioms dangoms būdingas PLSS trumpų lazerinių impulsų srityje (200 fs – 8 ns) kito iki 10 kartų, o ilgų impulsų srityje (1 ms – 10 s) per 10000 kartų. Tai reiškia, kad pažaidos mechanizmai ilgų ir trumpų lazerinių impulsų srityse yra skirtingi – trumpų impulsų srityje pažaidą lemia vidutinė galia, ilgų – sugerta energijos dozė. Ilgų ir trumpų lazerio impulsų srityse PLSS priklausomybė nuo impulso trukmės gali būti apibūdinama laipsniniu  $y = ax^b$  dėsnio - skiriasi tik koeficientų reikšmės, o šių sričių skiriamoji riba gali būti nustatyta surandant aproksimacijų susikirtimo tašką, kurio skaitinė vertė koreliuoja su šiluminio medžiagos laidumo konstanta - didesnis metalo šilumins laidis atitinka didesnę ribinę impluso trukmės vertę. Ištirtų metalų PLSS priklausomybė nuo impulso trukmės tarpusavyje skyrėsi, o skirtumus (ypač ilgų impulsų srityje) lemia medžiagos sugertis – didesnės sugerties metalas turės žemesnę PLSS, nes tokia medžiaga lengviau kaupia šilumą ir taip greičiau pasiekia kritinę jos vertę. Trumpų lazerinių impulsų srityje (200 fs – 8 ns) tirtoms optinėms dangoms lyginant “S(1000)-į-1” ir „1-į-1” PLSS vertes buvo įvertintas nuovargio efektas ir PLSS “S(1000)-į-1” atveju buvo iki 80 % žemesnis (sidabras) ir skyrėsi tarp tirtų badinių, kur mažiausią PLSS kritimą (30 %) turėjo chromas. Lyginant šių metalų savybes – chromas turi 2 kartus didesnę lydymosi temperatūrą, vadinasi šis parametras taip pat gali būti svarbus vertinant optikos senėjimo procesą.

## Summary

Urtė Kimbaraitė

### INVESTIGATION INVESTIGATION OF OPTICAL RESISTANCE SCALING LAWS IN METALLIC COATINGS WITH RESPECT TO LASER PULSE DURATION

Optical elements of laser systems exposed to high intensity radiation have a certain resistance limit – laser induced damage threshold (LIDT), beyond which the element is irreversibly destroyed. The damaged optical element can no longer be used in the system, causing the entire optical circuit to fail. LIDT is not constant - it depends on various, meanwhile, exposure parameters: dose, wavelength, beam diameter, pulse duration, and so on. There are very little studies of the dependence of LIDT on sequential metal coatings on pulse duration or they only cover a narrow range. Therefore, the aim of this work is to experimentally evaluate the dependence of the optical resistance of metal coatings on the pulse duration of a laser pulse in a very wide range of laser pulse durations - from 200 fs to 10 s.

10 types of samples (gold, silver, aluminum, zinc, titanium, chromium, tungsten, tantalum and germanium and silicon mirrors) were measured using the „1on1“ and „Son1“ test procedures described in the ISO standard. The obtained results show that the PLSS characteristic of these coatings in the range of short laser pulses (200 fs - 8 ns) varied up to 10 times, and in the range of long pulses (1 ms - 10 s) over 10,000 times. This means that the damage mechanisms in the areas of long and short laser pulses are different – in the area of short pulses the damage is determined by the average power, in the area of long pulses – by the absorbed energy dose. In the regions of long and short laser pulses, the dependence of PLSS on the pulse duration can be described by the power law  $y=ax^b$  – only the values of the coefficients differ – the boundary of these regions can be determined by finding the point of intersection of approximations. This parameter correlates to a materials' thermal conductivity: a higher thermal conductivity of the metal corresponds to a higher LIDT value. The dependence of the LIDT of the studied metals on the pulse duration differed from each other, and the differences (especially in the field of long pulses) are due to the absorption of the material - higher absorption metal will have lower PLSS. In the field of short laser pulses (200 fs - 8 ns), the fatigue effect and PLSS “S(1000)on1” were evaluated by comparing the PLSS values of “S(1000)on1” and “1on1” Was up to 80% lower (silver) and differed among the studied starvations, where chromium had the lowest drop in LIDT by 30%. Comparing the properties of these metals - chromium has 2 times higher melting point, which means that this parameter can also be important in assessing the aging process of optics.