Výzkumné potřeby vývoje laserů pro vesmírné aplikace

Miroslav Krůs, Ph.D.

1. Zvýšení účinnosti metody LIBS pro prospekci surovin na asteroidech.....2

2. Spektroskopie meteoritů.....3

2.1. Ablace pevných látek 3

2.2. Lasery čerpané slunečním světlem 7

3. Odklonění asteroidu na kolizní dráze laserem.....11

4. Pracoviště v ČR schopné kosmické aplikace laserů vyvíjet 12

5. Závěr.....16

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

1. Zvýšení účinnosti metody LIBS pro prospekci surovin na asteroidech

LIBS (laser induced breakdown spectroscopy) je relativně jednoduchá metoda, jež nevyžaduje žádnou speciální přípravu vzorků, je to tzv. diagnostika v reálném čase, je schopna detekovat víceprvkové složení různých vzorků (pevné látky, kapaliny, plyny), bezkontaktní, minimálně invazivní metoda, ppm detekční limit.

V současné době probíhá snaha vylepšit citlivost a opakovatelnost LIBSu, pro tyto účely bylo navrženo několik způsobů zahrnujících studium vlivu různých experimentálních parametrů na ablační proces stejně tak, jak tyto parametry mohou ovlivnit celkový analyzovaný signál.

Tyto parametry zahrnují:

1. vliv vlnové délky laseru na indukované plazma
2. užití ultrakrátkých (femtosekundových) laserových impulzů
3. užití dlouhých (nanosekundových) laserových impulzů
4. vliv laserového ozáření na parametry plazmatu

Pro dvouimpulzní LIBS (DP-LIBS) pro kosmické aplikace (např. prospekce surovin) je relevantní pouze kolineární uspořádání svazků (další metody zahrnují např. i ortogonální uspořádání), kdy oba laserové impulzy mají stejnou osu propagace a jsou nasměrovány „kolmo“ k povrchu vzorku. První impulz obvykle vygeneruje plazma a následující impulz může dále vybalovat další materiál, ale zejména přispívá excitaci plazmatu jeho dalším ohřevem. Tím se zvýší detekovatelný signál, a tak i citlivost celé metody.

V současné době jsou intenzivně testovány různé kombinace laserových impulzů (krátké, dlouhé, stejné vlnové délky, různé vlnové délky – od infračervených po ultrafialové). Hlavní pozornost je věnována zvýšení výtěžku signálu z plazmatu.

Cílem je tak dosažení stabilních a reprodukovatelných měření. Protože hlavní důvody nepřesností LIBSu jsou způsobeny:

1. fluktuacemi energie laserového impulzu
2. vliv matrice (nehomogenity) vzorku
3. nehomogenita plazmatu
4. rozlišení spektrometrů
5. nerovný povrch vzorku
6. vliv vnějšího prostředí

V případě prospekce povrchu asteroidů jsme nuceni pracovat se všemi těmito obtížemi. Přesnost v kvalitativní i kvantitativní analýzy LIBSu může být zlepšena jak instrumentací samotného LIBSu, tak využitím pokročilých analytických metod.

Kromě DP-LIBS, dalšími metodami, jak zpřesnit LIBS analýzu, jsou tzv. prostorové uzavření vzorku (např. jeho umístěním do dutého válce), či umístěním do magnetického pole nebo jiskrového výboje (toto je pro kosmické aplikace nerelevantní způsob). Prostorový profil plazmatu lze modifikovat prostorovým tvarem budícího laserového svazku.

Veličiny, které mají vliv na opakovatelnost a přesnost metody LIBS, jsou:

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

1. elektronová hustota plazmatu a její časový vývoj
2. teplota plazmatu (při určování teploty plazmatu se obecně využívá předpoklad termodynamické rovnováhy)
3. intenzita emise plazmatu
4. objem plazmatu (při DP-LIBS je objem plazmatu několikrát věší než u obyčejné LIBS)
5. doba života plazmatu (u DP-LIBS je přibližně 2x delší než u obyčejné LIBS)
6. objem kráteru
7. ablační účinnost
8. vzájemné zpoždění laserových impulzů

Zvýšení signálu z emise plazmatu může být dosaženo optimalizací absorpce laserového impulzu v plazmatu (např. použitím různých vlnových délek laseru).

Obecně při užití DP-LIBS bylo pozorováno zvýšení výtěžku signálu, a to i více než 100násobné.

SHRNUTÍ:

Ačkoli v posledních dvou desetiletí byla věnována velká pozornost zvýšení účinnosti a stability LIBS metody, získané poznatky jsou často protichůdné, např. co se týká zvýšení či snížení teploty v závislosti na použité metodě – dvojimpulzní LIBS (femtosekundové a/nebo nanosekundové impulzy, kolineární či ortogonální geometrie), uzavření plazmatu, vliv okolní atmosféry a jiné. Dalším krokem by mělo být zejména systematické studium vedoucí ke zvýšení výtěžku signálu, jež je pro použití LIBS v kosmickém prostoru nezbytné. Toto by mělo zahrnovat zejména vícepulzní, kolineární schéma LIBS, jež je relativně jednoduché v podmínkách kosmické sondy realizovat. Systematická studie by se měla především soustředit zejména na výzkum vlivu délek impulzů (od femtosekundových impulzů po mikrosekundové délky, toto studium zahrnuje i vliv spektrálního čirpu a průběhu impulzu), vliv vlnových délek (od ultrafialového záření k záření infračervenému) a vliv energie jednotlivých laserových impulzů. Základním cílem by mělo tedy být najít takovou konfiguraci, aby byla co nejjednodušší na realizaci a poskytovala co největší výtěžek emisních spektrálních čar. Nedílnou součástí je také vývoj bezkalibrační LIBS metody, jež je nutná ke kvantitativnímu vyhodnocení prvkového složení daného materiálu.

2. Spektroskopie meteoritů

2.1. Ablace pevných látek

Při dopadu laserového záření na pevný terč dochází k ablaci jeho povrchu. Energie laseru absorbovaná povrchem rychle ohřívá materiál terče, způsobí také, že materiál vyvržený z terče expanduje vysokou rychlostí (poté se vytvoří plazma, se kterým interaguje zbytek laserového impulzu). Interakce laseru s plazmatem a vedení absorbované energie do terče má za následek řadu komplexních mechanismů, které mohou snižovat účinnost ablačního procesu. Ablovaná hmota terče vytváří tzv. koronální plazma, které expanduje a svou reakcí působí na terč tzv. raketovým jevem, tj. urychluje terč (generuje rázovou vlnu) opačným směrem. Laserový impulz již dále nedosáhne povrchu terče ale jen tzv. kritického povrchu, kde dochází k absorpci jeho energie (energie laseru je také absorbována

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

v koroně tzv. inverzním brzdným zářením). Z kritického povrchu k ablačnímu čelu se energie předává termálním transportem zprostředkovaným horkými elektrony. Obecně kratší vlnové délky (ultrafialové) laseru mají, kvůli vyšší kritické hustotě, vyšší účinnost absorpce energie než vlnové délky delší (infračervené). Kritická hustota n_c pro laser o vlnové délce λ je dána vztahem

$$\mathrm{n_c}[\mathrm{cm}^{-3}] = \frac{1{,}1 \times 10^{21}}{\lambda^2[\mu\mathrm{m}]}.$$

Studie zaměřené na ablaci prováděnou s lasery o vysokém špičkovém výkonu se soustředily na ustanovení škálovacích zákonů ablačního tlaku či rychlosti na intenzitě laseru, vlnové délce, délce impulzu, materiálu terče atd. Z teoretických modelů vyplývá škálování ablačního tlaku $P \propto I^{\alpha}$. Pro relativně nízké absorpci inverzním brzdným zářením (absorpce na kritické hustotě) α = 0,667, pro silnou absorpci inverzním brzdným zářením (relativně nízká intenzita laserových impulzů) v plazmatu s exponenciálně klesající hustotou je α = 0,75. (Pokud se elektronová hustota mění s polohou, α = 0,777, experimentálně byly naměřeny hodnoty α = 0,71 či α = 0,833.) V současné době jsou nejčastěji používány následující (zejména 2 a 3) škálovací zákony: (1) Phipps, (2) Fabbro – pro absorpci inverzním brzdným zářením, (3) Lindl – pro absorpci na kritické hustotě, (4) Mora:

$$(1) \quad P = 5{,}83 \times 10^{-3} A^{-1/8} \left\{\frac{A}{2}[Z^2(Z+1)]^{1/3}\right\}^{9/16} \left(\frac{I}{10^{12}}\right)^{3/4} \left[\frac{\lambda}{10^4}\sqrt{\frac{\tau}{10^9}}\right]^{-1/4}$$

$$(2) \quad P = 12{,}3 \left[\frac{A}{2Z}\right]^{1/3} \left(\frac{I}{10^{14}}\right)^{2/3} \lambda^{-2/3}$$

$$(3) \quad P = 8{,}6 \left[\frac{A}{2Z}\right]^{1/3} \left(\frac{I}{10^{14}}\right)^{2/3} \lambda^{-2/3}$$

$$(4) \quad P = 11{,}6 \left[\frac{A}{2Z}\right]^{7/16} \left(\frac{I}{10^{14}}\right)^{3/4} \lambda^{-1/4} \left(Z\frac{\tau}{3{,}5}\right)^{-1/8}$$

Variace škálovacích zákonů mohou být zejména způsobeny nestacionárním tokem a radiačními ztrátami do vakua, pro kratší laserové impulzy plazma není v lokální termodynamické rovnováze, kdy elektronová a iontová teplota jsou různé, různými procesy odehrávajícími se během ablace materiálu – termální jevy, tání materiálu, difúze tepla dovnitř terče atd. Experimentální studie získané pomocí laserů s vysokým výkonem jsou zejména ovlivněny přítomností horkých skvrn v intenzitním profilu, kdy dochází k vrtání materiálu apod.

Studie zaměřené na ablaci materiálu využívají jak infračervené, viditelné, tak ultrafialové lasery. Tyto studie se soustředily na výzkum rychlostí expanze ablovaného materiálu, množství odstraněného materiálu pro různé chemické prvky. Typické rychlosti expanze plazmatu leží v intervalu 1 – 50 km/s [Beilis et al.] v závislosti na použitém materiálu a intenzitě laseru. Pro Nd:YAG laser (1064 nm, 9 ns, 875 mJ) byly naměřeny následující hodnoty odbalovaného materiálu [Torrisi et al.]:

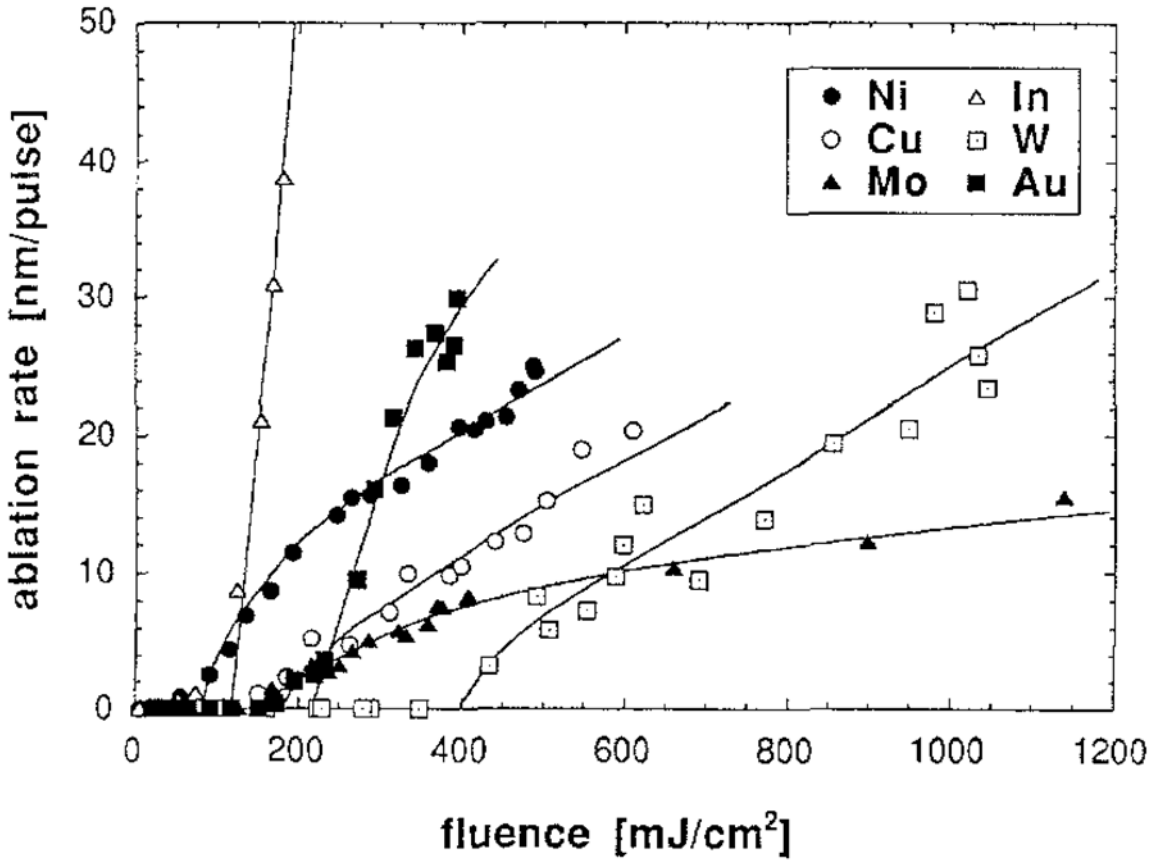
prvek	**prahová fluence**	**prahová intenzita**	**ablovaný materiál**
Al	0,17 J/cm^2	0,19 x 10^8 W/cm^2	0,51 µg/impulz
Ti	1,10 J/cm^2	0,12 x 10^9 W/cm^2	1,0 µg/impulz
Ni	1,35 J/cm^2	0,15 x 10^9 W/cm^2	0,55 µg/impulz

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Cu	0,25 J/cm^2	0,27 x 10^8 W/cm^2	0,25 µg/impulz
Ta	0,60 J/cm^2	0,66 x 10^8 W/cm^2	0,83 µg/impulz
W	1,58 J/cm^2	0,18 x 10^9 W/cm^2	0,87 µg/impulz
Au	0,13 J/cm^2	0,14 x 10^8 W/cm^2	0,83 µg/impulz
Pb	0,13 J/cm^2	0,14 x 10^8 W/cm^2	10,5 µg/impulz

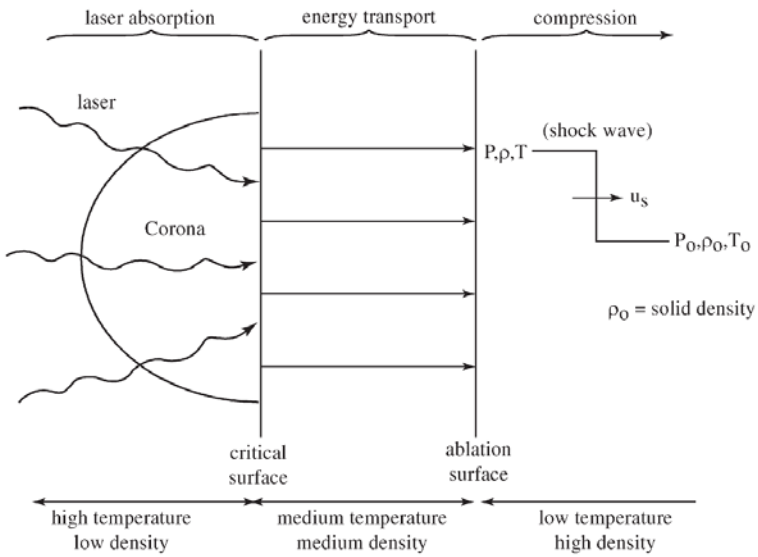
Pro laser 0,5 ps, 248 nm byly měřeny hloubky kráterů pro fluenci 0,3 J/cm^2 [*Preuss et al.*]:

prvek	prahová fluence	prahová intenzita	hloubka kráteru
Ni	0,1 J/cm^2	0,2 x 10^{15} W/cm^2	15 nm
In	0,125 J/cm^2	0,25 x 10^{15} W/cm^2	90 nm
Cu	0,175 J/cm^2	0,35 x 10^{15} W/cm^2	8 nm
Mo	0,15 J/cm^2	0,3 x 10^{15} W/cm^2	6 nm
Au	0,21 J/cm^2	0,42 x 10^{15} W/cm^2	17 nm

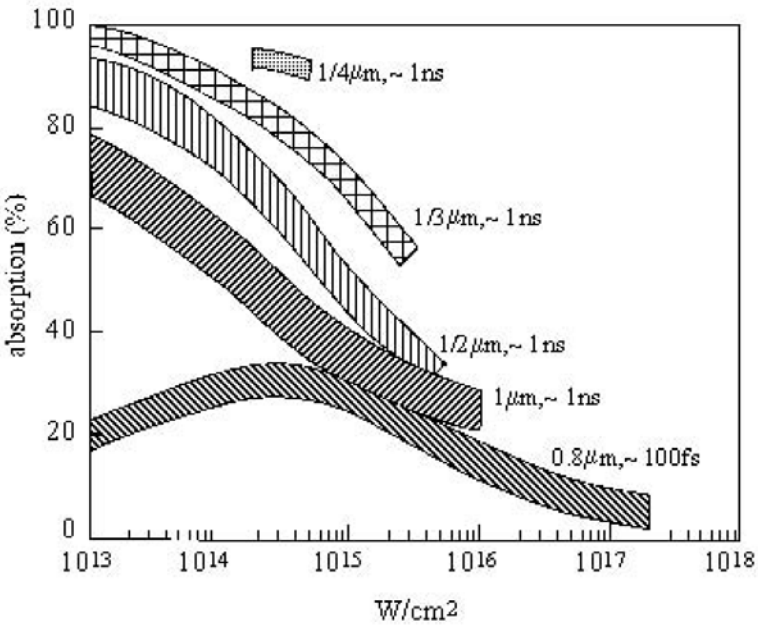


Obrázek 1: Ablace kovů UV krátkým laserovým impulzem. Rychlost ablace v závislosti na fluenci záření [Preuss et al.]

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 2: struktura plazmatu vytvořeného laserovým impulzem



Obrázek 3: účinnost absorpce laserového záření pro různé vlnové délky a délky laserových impulzů

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

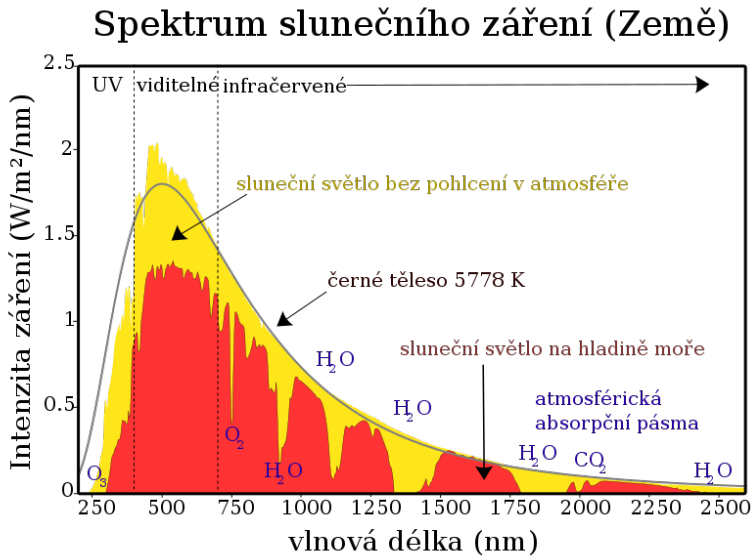
2.2. Lasery čerpané slunečním světlem

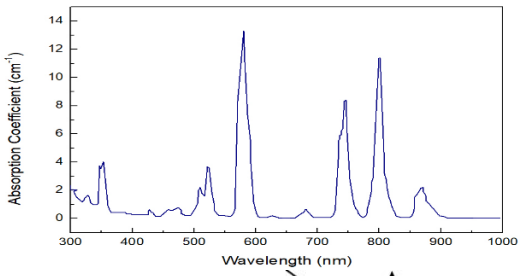
Sluneční energie je výborný obnovitelný a téměř nevyčerpatelný zdroj energie, proto se přímo nabízí využít Slunce k čerpání laserů. První sluncem čerpaný laser (optický maser) byl demonstrován v roce 1963. Od té doby probíhá intenzivní studium těchto speciálních laserů. Sluncem čerpané lasery je možné prakticky rozdělit do dvou kategorií podle čerpání – přímé a nepřímé a tří kategorií podle druhu laserujícího prostředí – pevnolátkové, polovodičové a plynné (představují je jodové lasery, avšak kvůli malé intenzitě slunečního záření v ultrafialové oblasti – kolem 290 nm, kde je fotodisociační maximum a složité rekuperaci plynného média – představují spíše kuriozitu s účinností typicky 0,5 %). Široce studované jsou pevnolátkové lasery dosahující až 10% účinnosti. Typickým a široce užívaným laserovým materiálem je Nd:YAG (neodymiem dopovaný yttrito-hlinitý granát), který má výborné tepelné a optické vlastnosti. Avšak kvůli malému překryvu jeho absorpčního spektra a slunečního spektra, tyto lasery dosahují maximálně 4% účinnosti. Účinnost je zvýšena pokud se vedle neodymiových iontů přidají také ionty chromu, nejvyšší účinnosti dosahuje keramika Nd:Cr:YAG – výše zmíněných 10 %. Cr:YAG (chromem dopovaný yttrito-hlinitý granát),) má širší absorpční spektrum, které se více překrývá s absorpčním spektrem Nd:YAG, energie k načerpání neodymiových iontů je právě přenesena s chromových iontů, či jiné materiály určené pro konverzi např. CSGG (gadoliniovo-skandiovo-galiový granát), LICAF (fluorid hlinito-vápenato-litný), Ti:safír. Dalším studovaným pevnolátkovým laserem je laser založený na čerpání alexandritu.

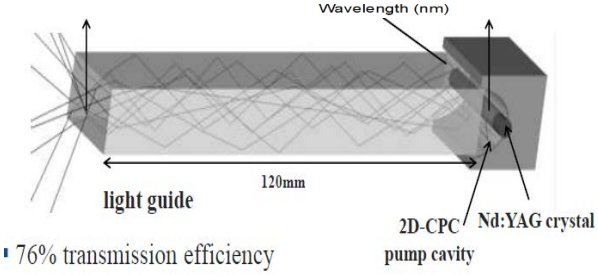
Všechny výše zmíněné lasery spadají do skupiny laserů přímo čerpaných slunečním světlem. Polovodičové lasery mohou být ideální pro jejich čerpání slunečním světlem. Laserové diody mohou teoreticky dosáhnout 100 % (v poslední době se objevuje dosažení účinnosti větší než 100 %), avšak běžná účinnosti se pohybuje kolem 75 %. Nicméně, všechny přímo čerpané lasery kvůli prahové intenzitě vyžadují koncentrační optiku – parabolická zrcadla, Fresnelovy čočky, vlnovody či luminofory. Intenzita slunečního světla na povrchu Země je přibližně 0.1 W/cm^2. Prahová intenzita čerpání pro Nd:YAG je přibližně 270 W/cm^2 – tj. 2700 Sluncí, pro Nd:Cr:YAG je 160 W/cm^2 – tj. 1600 Sluncí, přímo čerpané polovodičové laserové diody mají práh 2 W/cm^2 – tj. 20 Sluncí, optimalizací materiálu a PN přechodu je možné dosáhnout prahové intenzity 1 W/cm^2 – tj. 10 Sluncí. Další výzvou pro přímo čerpané lasery představuje současné získání vysoké kvality laserového záření a vysokého výkonu, bylo tedy dosaženo buď jen kvalitního svazku s nízkým výkonem anebo vyššího výkonu laseru se špatným prostorovým profilem – s ním mj. souvisí schopnost fokusovatelnosti svazku k získání vysokých intenzit laserového záření. Špatný prostorový profil laserové intenzity je také daný nehomogenním rozložením intenzity zafokusovaného slunečního záření do koncentrační dutiny (vlnovodu). Navíc, další problém představuje kolekční optika sama, jež pro dosažení prahových intenzit a získání vysokého výkonu musí mít značné rozměry a také protože musí být relativně velmi přesně orientovaná vůči Slunci. Koncentrace světla také vede k obrovské tepelné zátěži ve velmi malých objemech, ať v samotném laserujícím prostředí, tak v koncentrační dutině či homogenizéru svazku. Tuto nevýhodu odstraňují nepřímo čerpané polovodičové lasery, které pro sběr slunečního světla využívají solární panely, jež mohou být orientovány vůči Slunci jen hrubě. Účinnost solárních panelů, zejména s multipřechodem

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

PN, může dosáhnout až 50 %, ve vesmíru kvůli nepřítomnosti chlazení je účinnost fotovoltaických panelů nižší.







SHRNUTÍ:

Z technologického hlediska a z vývoje zvyšování účinnosti jak laserových polovodičových diod, tak solárních panelů se nejúčinnější sluncem čerpané lasery jeví právě tyto nepřímo čerpané lasery, založené na kombinaci solárních panelů a laserových diod.

LITERATURA:

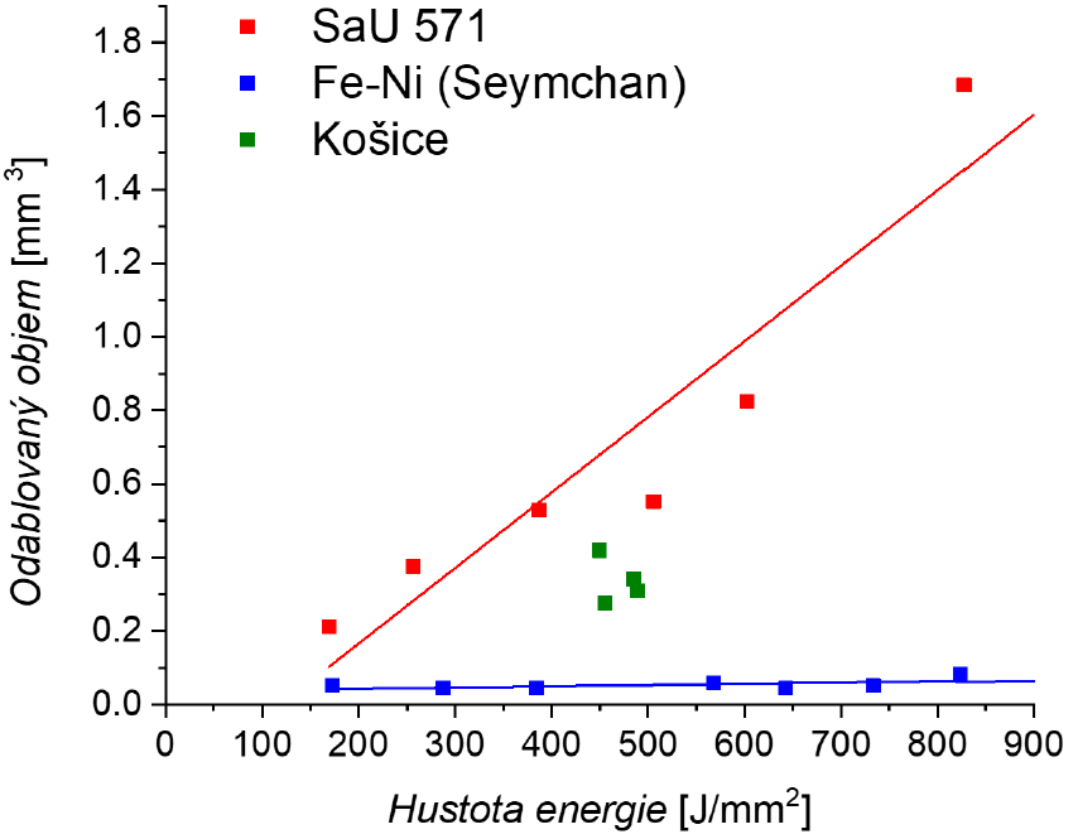
This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Preuss et al. Applied Physics A 61, 33 (1995) – měření rychlosti ablace pro UV sub-pikosekundové laserové impulzy (délka impulzu 0,5 ps, vlnová délka laseru 238 nm), hledala se prahová energie, při které začíná ablace, z ablační rychlosti (hloubka vyvrtaného materiálu na impulz – viz Obr. 1 a tabulka) je možné extrapolovat fluenci, případně intenzitu laseru, jaká je nutná na vyvrtání kráteru o požadované hloubce. Za předpokladu požadované hloubky 10 cm pro prospekci surovin, vychází fluence astronomických $10^{43400000}$ J/cm^2 na jeden laserový impulz. Současné lasery, např NIF mající celkovou energii 1 MJ, jsou schopné dodat fluenci 10^{12}J/cm^2.

Torrisi et al. Review of Scientific Instruments 71, 4330 (2000) – měření hmotnostní ablační rychlosti materiálu infračerveným laserem (1064 nm, 9 ns), hledala se prahová energie, při které začíná ablace materiálu (při těchto experimentech se neměřila hloubka kráteru). Ve srovnání s Preussem se pozorovaly nižší hodnoty prahové fluence pro relativně dlouhé laserové impulzy, což indikuje užití spíše nanosekundových impulzů před pikosekundovými, nicméně hloubka kráterů se dá očekávat podobná, takže celková fluence pro vrtání do hloubky 10 cm bude prakticky nerealistické.

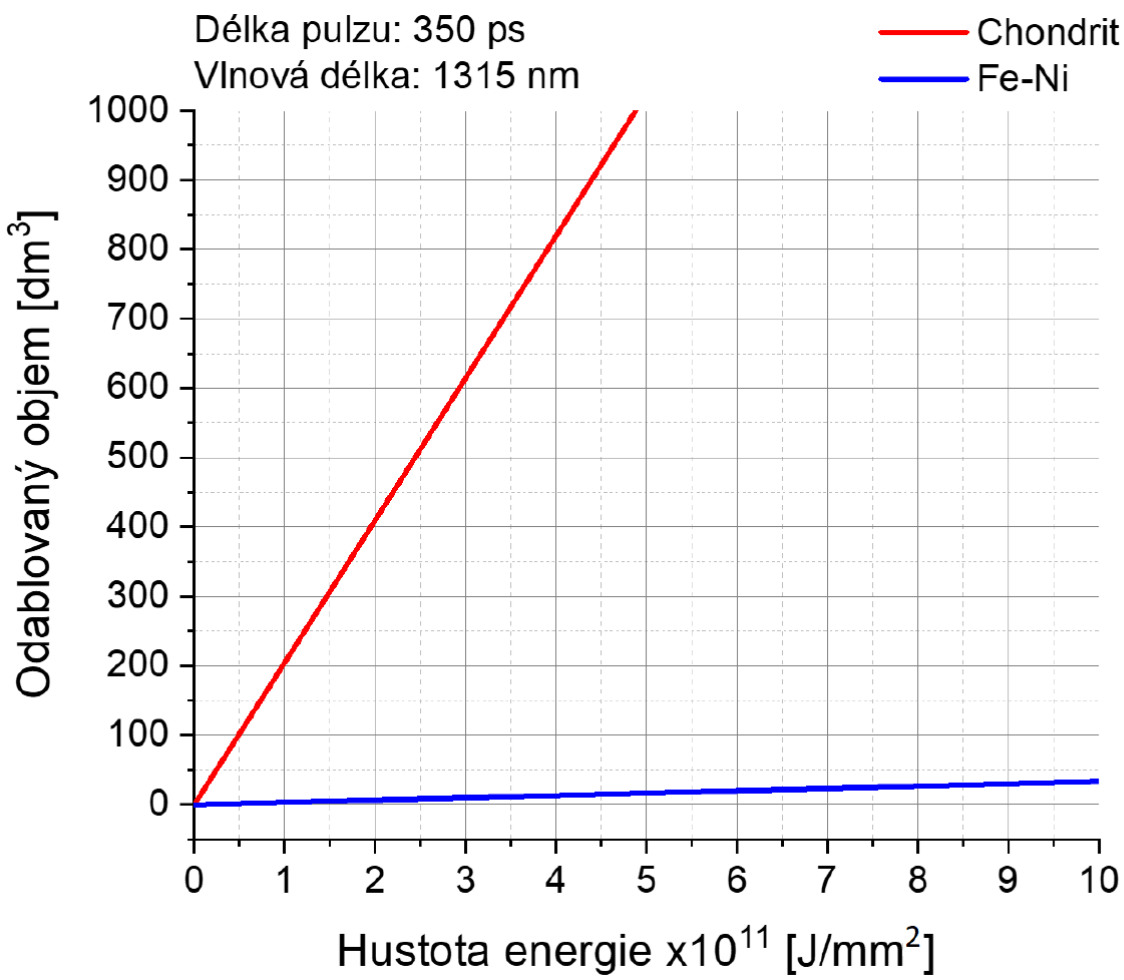
Beilis et al. Laser Particle Beams 30, 341 (2012) – (a reference v něm) měření rychlosti expanze plazmatu pro laserové impulzy s intenzitami v rozmezí 10^6 – 10^{10} W/cm^2.

A. Křivková: Diplomová práce FJFI ČVUT (2020)



Obrázek 4: Srovnání měřených závislostí odablovaného objemu na fluenci (hustotě energie) laserového záření (vlnová délka 1315nm, délka impulzu 350 ps) pro chondritický (červená) a kovový (modrá) meteorit.

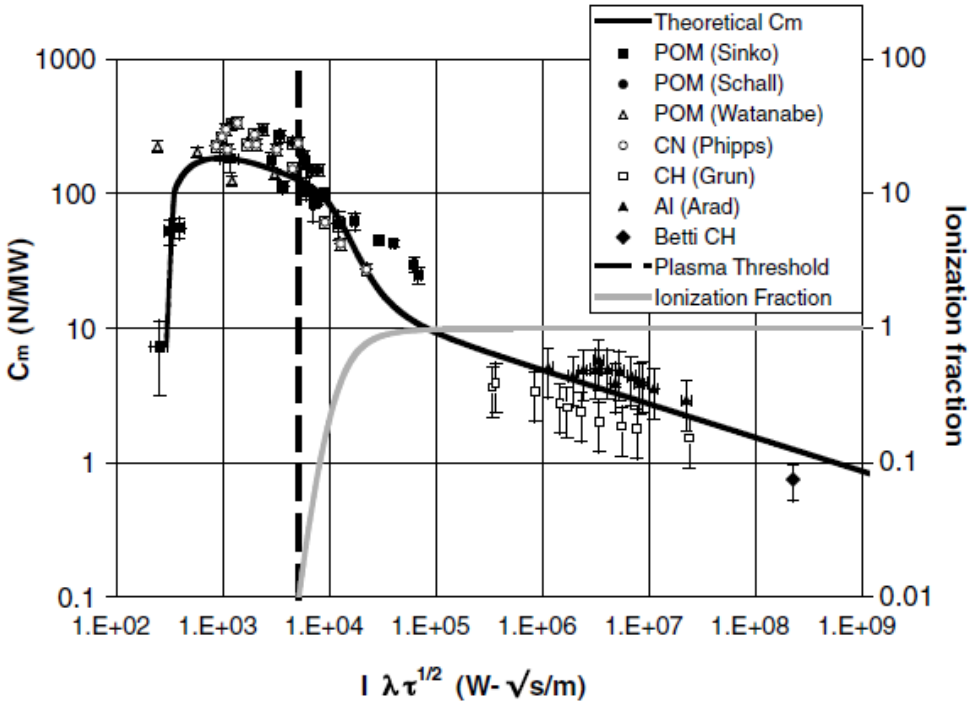
This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 5: Extrapolace odablovaného objemu pro chondritické a železné asteroidy. Data jsou v souladu s výše zmíněnými výpočty pro odklon asteroidu a vrtání do povrchu asteroidu pro prospekci.

Phipps et al. Journal of Propuslion and Power 26, 609 (2010) – studie impulzu generovaného ablací na výkon laseru (další reference v něm, srovnání různých dat). Z této studie vyplývají optimální podmínky na intenzitu/fluenci laseru, aby těleso ablačním tlakem dostalo co nejvíce užitečný impulz.

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 6: Závislost přeneseného impulzu na výkon laseru na laserových parametrech, tj. součinu intenzity, vlnové délky a délky impulzu.

Lubin et al.: Advances in Space Research 58, 1093 (2016) a další práce – představení základních myšlenek na využití laseru pro odklonění asteroidu, je zde prezentováno, že k odklonění asteroidu je dostatečný kontinuální výkon 35 kW a intenzity řádově kW/cm^2, pro získání a obhajobu těchto čísel byly využity základní termodynamické vztahy včetně termodynamiky vypařování (tlak nasycených par atd.). Ve svých výpočtech nicméně neuvažují, z dostupných prací toto nevyplývá, reálnou interakci laseru s pevným terčem, proto jeho a jeho spolupracovníků práce jsou zřejmě značně podhodnocené. Intenzity v řádu kW/cm^2 jsou hluboce pod ablačním prahem (jež je v řádu MW/cm^2) materiálů, v práci **Gibbing et al. 2011 IAA Planetary Defense Conference** je zmíněno získání vypařovací (ablační) rychlosti 100 µg/s za použití laseru s intenzitou 35 kW/cm^2, Lubin v práci **Directed Energy Planetary Defense** uvádí hodnotu 400 µg/s za použití laseru o intenzitě 4 kW/cm^2, což se zdá být v hlubokém rozporu s prací Gibbinga (pokud byly v obou případech použity kontinuální lasery). Nicméně v obou pracích nelze o těchto experimentech dohledat základní experimentální parametry.

3. Odklonění asteroidu na kolizní dráze laserem

Pro odklon asteroidů je možné z těchto výsledků (rychlost hmotnostní ablace a expanze plazmatu) extrapolovat parametry budoucích laserů nutných pro odklonění asteroidu z kolizní dráhy se Zemí. Z jednoduchého výpočtu, za předpokladu Ciolkovského raketové rovnice, a že

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

asteroid letí přímo na Zemi kolmo k její dráze a zbývá rok do dopadu), nanosekundový laser o energii 1 J v impulzu stačí na urychlení tělesa o hmotnosti 12,5 miligramů na rychlost 8 m/s (tato rychlost odpovídá takové rychlosti jakou musíme přidat asteroidu, aby minul Zemi o vzdálenost rovné 10 jejich průměrům – obvykle se bere průměr pouze jeden – a když k Zemi doletí až za 1 rok). Laser NIF (v USA, největší laser světa) urychlí těleso o hmotnosti 12,5 kg na rychlost 8 m/s. K odklonění asteroidu Apophis by tak byla třeba energie $5x10^{15}$ J (miliarda laserů typu NIF), pokud by se impulzy vypouštěly s opakovací frekvencí 10 Hz (NIF dodává jeden impulz za cca 5 hodin), energie laseru by se snížila na 20 MJ. Na odklonění tělesa o velikosti asteroidu Chicxulub při opakovací frekvenci 10 Hz je nutná energie 10^{18} J.Tyto výpočty řádově odpovídají výpočtům prezentovaných v pracích C. Phippse.Lasery, které budou použitelné pro odklonění asteroidu z kolizní dráhy se Zemí či prospekci surovin jak pro vrtání povrchu asteroidu, tak pro následnou analýzu pomocí LIBS, budou dosahovat extrémně vysokých výkonů a energií v impulzu či v kontinuálním režimu. V prvotních fázích proto bude nutné vybudovat speciální laboratoř vybavenou jedním či několika (femtosekundové, pikosekundové a nanosekundové) lasery s relativně nízkou energií (jednotky až desítky J) pro optimalizaci laserových parametrů (intenzita, polarizace, vlnová délka, délka impulzu, prostorový profil, vlnoplocha, víceimpulzní schémata – vzájemné zpoždění, poměry intenzit), jež sníží celkové nároky na energii laserového impulzu a také stanoví základní škálovací zákony (v dnešní době je k dispozici několik škálovacích zákonů, jež dávají výrazně odlišné výsledky) pro budoucí výstavbu laseru vhodného k těmto kosmickým aplikacím. Výhody využití víceimpulzních schémat ostatně ukazují mnohé aplikace ať ve výzkumu inerciální fúze, plazmových rentgenových laserů, laserových urychlovačů částic, tak i LIBS (výrazné zvýšení účinnosti detekce LIBS bude také jedním ze základních úkolů systematického výzkumu) či laserového vrtání. Do dnešního dne byla udělána řada studií pro různé materiály s různými lasery, avšak základní experimentální podmínky jako profil svazku, velikost stopy laseru, polarizace často neumožňují přímé srovnání jednotlivých naměřených výsledků, z nichž by bylo možné získat základní jednotné škálování. Tento výzkum také může přispět k významnému pokroku v inerciální termojaderné fúzi. Pro tento systematický výkon se zřejmě uplatní pevnolátkové lasery s vysokým výkonem, které umožní generaci různě dlouhých laserových impulzů s vysokým výkonem a laditelnou vlnovou délkou, např. lasery umožňující parametrické zesilování či generaci bílého světla. Výsledky těchto studií pak v dlouhodobém výhledu mohou sloužit pro vývoj a výrobu polovodičových laserů, sluncem čerpaných, o dané konkrétní vlnové délce, délce impulzu a výkonu, které již budou přímo využitelné pro prospekci či odklon asteroidu.

4. Pracoviště v ČR schopné kosmické aplikace laserů vyvíjet

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT

Dlouhodobě vychovává vědce a techniky v oblasti laserových technologií, v podstatě je to jediná vysoká škola v ČR, která se uceleně zabývá vzděláváním studentů v laserech tak, že absolventi jsou schopni postavit fungující laser z optických součástek. Výzkum je zaměřen zejména na pevnolátkové lasery, testování jednotlivých komponent, vývoj nových pevnolátkových laserových typů a jejich aplikace, např. pro navigaci a měření vzdáleností v kosmickém prostoru. (Na FJFI se dříve vyvíjely lasery např. pro medicínské aplikace.)

Hlavní představitelé:

H. Jelínková - pevnolátkové lasery, testování laserových krystalů

A. Novotný - pevnolátkové lasery, testování laserových krystalů

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

I. Procházka - vesmírné aplikace laserů - navigace a měření vzdáleností

Fakulta strojní, ČVUT

Výzkumná skupina ústavu přístrojové a řídící techniky Fakulty strojní se zabývá návrhem a konstrukcí optomechanických zařízení, vyvíjí speciání přístroje a technologie přístrojové techniky, včetně mikrotechnologií, mikroobrábění a využití nanotechnologií.

Hlavní představitelé:

J. Hošek - vedoucí odboru přesné mechaniky a optiky

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i.

Výzkumný tým vláknových laserů a nelineární optiky se soustředí na výzkum zaměřený na výkonové vláknové lasery a jejich aplikace v materiálovém průmyslu, medicíně či nelineární optice. Studuje mechanismy kombinování laserových svazků, generování a zesilování laserových impulzů, přenos světla a jeho interakci s materiály. V oblasti nelineární optiky se zabývá využitím výkonových vláknových laserů pro čerpání generátorů záření ve střední infračervené oblasti s využitím v laserové spektroskopie.

Hlavní představitelé:

P. Honzátko - vedoucí týmu

J. Čtyroký - vědecký pracovník

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

Fyzikální ústav má dlouhou tradici ve výzkumu laserů, první „skutečný funkční laser“ v Československu byl právě sestaven K. Pátkem ve fyzikálním ústavu. V současné době součástí ústavu jsou dvě velká laserová centra Hilase - zabývající se aplikací laserů v průmyslu a dalších odvětví a centrum ELI - využívající lasery s vysokým výkonem pro základní i aplikovaný výzkum. Výzkumná skupina z oddělení polovodičů (kolem A. Hospodkové) se zabývá základním výzkumem nitridových polovodičů s jejich heterostruktur včetně polovodičových laserů (E. Hulicius). Výzkumná skupina z oddělení optických materiálů (kolem M. Nikla) se zabývá studiem kvantových jam a teček, jež mohou zvýšit účinnost fotovoltaických panelů.

Hlavní představitelé:

A. Hospodková – vedoucí laboratoře
E. Hulicius – polovodičové lasery
M. Nikl – zástupce ředitele, vedoucí oddělení optických materiálů
T. Mocek - Hilase

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

B. Rus - ELI

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.

Výzkum se soustředí na vývoj He-Ne laserů stabilizovaných pomocí saturované absorpce v parách jodu, zvyšováním přesnosti interferometrických systémů, metrologií, laserovými normály délky, etalony optických frekvencí, stabilizací polovodičových laserů.

Hlavní představitelé:

J. Lazar - vedoucí oddělení koherenční optiky

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.

Centrum TOPTEC se soustředí na výzkum optiky, optoelektroniky a jejich aplikací. Dále se zabývá výzkumem a vývojem opracování optických prvků, realizaci tenkých vrstev a velmi přesnými měřeními. Centrum se zabývá řešením problémů v oblasti metrologie a vývoje optických systémů pro výzkum kosmu (ať družicový nebo pozemní, např. Solar Orbiter), či pro vývoj supervýkonných laserů.

Hlavní představitelé:

V. Lédl – výkonný ředitel centra TOPTEC

Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, v. v. i.

Výzkumná skupina se zabývá studiem složení meziplanetárních těles, spektroskopií meteorů a studiem meteoritů pomocí metody LIBS (včetně užívající vysokovýkonných laserů).

Hlavní představitelé:

M. Ferus - vedoucí oddělení spektroskopie

Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

Katedra optiky se zabývá výzkumem manipulace a přenosu informace pomocí světelného signálu, přesnými měřeními vlastností světla na úrovni jednotlivých fotonů a kvantového šumu, vzájemným působením světla a hmotných objektů, záznamem a transformací obrazu atd.

Hlavní představitelé:

J. Řeháček – výzkumný pracovník

CEITEC, VUT

CEITEC je evropské výzkumné vědecké centrum zaměřené na oblast živých věd, pokročilých materiálů a nanotechnologií. Výzkumná skupina (kolem J. Kaisera) se zabývá charakterizací materiálů,

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

vyvíjí nové metody a postupy pro charakterizaci materiálů. V rámci svých aktivit se soustředí na využití metody LIBS. Další výzkumná skupina centra CEITEC (kolem T. Šikoly) se zabývá vytvářením a charakterizací nanostruktur, vývojem nových metod pro výrobu nanostruktur.

Hlavní představitelé:

J. Kaiser - vedoucí výzkumné skupiny, LIBS
T. Šikola - vedoucí výzkumné skupiny, nanostruktury

Crytur

Přední český a světový výrobce laserových krystalů s více než 75-letou tradicí. Specializuje se zejména na produkci YAG laserových krystalů pro nanosekundové lasery.

Hlavní představitelé:

J. Houžvička - majitel

K. Nejezchleb

J. Preclíková

Preciosa

Společnost je předním výrobcem křišťálového skla, zabývá se obrábění/broušením/leštěním skel či krystalů a specializuje se na přesné broušení/leštění malých komponent.

Hlavní představitelé:

M. Matocha - Preciosa Strojírny - obchodní zástupce

P. Sekanina - Preciosa Strojírny - vedoucí výroby

Meopta

Společnost se zabývá vývojem a výrobou optiky, speciální optiky a optomechanických součástí či návrhem a výrobou celých komplexních optických sestav. V začátcích laserové éry v Československu vyráběla lasery.

Hlavní představitelé:

P. Přikryl - vedoucí optického týmu

K. Krč - projektový manažer

NETWORK group

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

Společnost se od roku 2010 také specializuje na výrobu (návrh a vývoj) optických prvků – jako vláknové optiky – a senzorických systémů. (2010 bylo založeno Středisko speciální vláknové optiky.)

Hlavní představitelé:

R. Helán - vedoucí oddělení výzkumu a vývoje

TTS – Tenkovrstvý technologický servis

Společnost se zabývá návrhem a depozicí tenkých vrstev pro elektroniku, optiku a další aplikace. Využívá know-how zakladatelů společnosti získané ve Vakuových laboratořích a divizi mikroelektroniky bývalého Výzkumného ústavu pro sdělovací techniku TESLA – VÚST.

Hlavní představitelé:

L. Mikuličková - jednatelka

Solartec

Firma dodává fotovoltaické panely, dříve panely i vyráběla, nicméně znalosti výroby solárních panelů stále má, „know-how“ získala v bývalé TESLA Rožnov, kde se fotovoltaické panely vyvíjely a vyráběly.

Hlavní představitelé:

J. Řehák - ředitel, jednatel

AtomTrace

Společnost AtomTrace vznikla jako „start-up“ z CEITEC v roce 2014. Jedním z jejích cílů je komercionalizace perspektivních technologií. Společnost se zaměřuje zejména na výrobu přístrojů a vývoj technologií založených na metodě LIBS včetně zlepšování této metody samotné.

Hlavní představitelé:

Karel Novotný – statutární ředitel

5. Závěr

Výše zmíněné skupiny mohou v podstatě přispět ke všem uvažovaným aplikacím

- meziplanetární či mezihvězdné lety,
- prospekce surovin či odklon asteroidu z kolizní dráhy,
- úklid kosmického smetí,

protože pro tyto aplikace je pouze podstatný typ laseru, tj. zda je pevnolátkový, vláknový či polovodičový. Pro daný typ laseru bude určující jeho celkový výkon – vyzářená energie -, na kterou

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

konkrétní aplikaci jej bude možné využít. Lasery s relativně nižším výkonem např. na úklid kosmického smetí, lasery s velmi vysokým – dnes nedostupným – výkonem na prospekci surovin a odklon asteroidu.

Nicméně výše jmenované skupiny mohou také tvořit logické celky v návaznosti na typ laseru, který bude pro dané aplikace použitý, tj. skupina pevnolátkových laserů, skupina vláknových laserů a skupina polovodičových laserů.

V současné době největšího pokroku ve výkonu laserů dosáhly pevnolátkové lasery, nicméně jejich celková účinnost je relativně nízká (menší než 10 %), proto se z tohoto hlediska mohou v budoucnosti uplatnit pole polovodičových laserů, mající účinnost téměř 100 %, napájených fotovoltaickými panely (ty navíc mohou sloužit jako zdroj energie pro všechny typy laserů), které dosahují vysoké účinnosti a zřejmě v budoucnu ještě dosáhnou účinnosti mnohem vyšší.

V úvahu také musí být vzata údržba takovéhoto systému, kdy z dnešního pohledu nejsnazší údržbu nabízejí pevnolátkové lasery, kdy se relativně snadno mohou nahradit veškeré jednotlivé komponenty systému - nejčastěji vyměňovaným prvkem jsou xenonové výbojky a to zpravidla jednou ročně, podle celkového využití. Na druhou stranu polovodičové lasery jsou prakticky bezúdržbové, avšak jejich životnost se pohybuje mezi 20000 - 50000 hodinami, tj. 2 - 6 lety, poté kvůli tomu, jakým způsobem jsou vyráběny, se v podstatě musí celé zařízení vyměnit.

Lasery pro kosmické aplikace je možné také rozdělit do dvou skupin podle toho, kde bude laser umístěn. Lasery umístěné na povrchu Země by měly mít vlnovou délku kolem 4 mikrometrů (infračervená oblast spektra) z důvodu prakticky nulové absorpce v atmosféře a také kvůli reziduálnímu zpětnému rozptylu laserového záření - tyto vlnové délky spadají do kategorie tzv. oku bezpečných laserů. Kdežto lasery umístěné na oběžné dráze Země či v meziplanetárním prostoru by měly naopak mít vlnové délky v ultrafialové oblasti, kde absorpce ozářeného materiálu může dosáhnout i 100 %. (Kdežto účinnost absorpce je za dobrých podmínek maximálně 50 %.)

Z ekonomického hlediska může být zajímavé, pravděpodobně velmi žádoucí, pro jednotlivé aplikace využití konkrétní vlnové délky laseru, délky laserového impulzu, polarizace laseru či využití vláčku impulzů, jak ostatně ukazují mnohé aplikace ať ve výzkumu inerciální fúze, plazmových rentgenových laserů, laserových urychlovačů částic, tak i LIBS či laserového vrtání. Více impulzů, vzájemně vhodně zpožděných s vhodnými intenzitami, může snížit celkový výkon laseru potřebný pro dosažení chtěného jevu, např. odklon asteroidu či úklid kosmického smetí. Pro tento systematický výkon se zřejmě uplatní v krátkodobém horizontu pevnolátkové lasery s vysokým výkonem, které umožní generaci různě dlouhých laserových impulzů s vysokým výkonem a laditelnou vlnovou délkou, např. lasery umožňující parametrické zesilování či generaci bílého světla. Výsledky těchto studií pak v dlouhodobém výhledu mohou sloužit pro vývoj a výrobu polovodičových laserů o dané konkrétní vlnové délce, délce impulzu a výkonu.

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”