

SZABÓ PÉTER IMRE* – GÁRDIÁN ANETT ZSUZSANNA**

LÉZERES FEKETÍTÉS

* PhD, adjunktus,
NKE HHK
Természettudományi
Tanszék, SZTE
Fizika Intézet,
Nagyintenzitású Lézer
Laboratórium. ORCID:
0000-0002-8088-4963

** Szegedi
Tudományegyetem,
Fizika Intézet,
Nagyintenzitású Lézer
Laboratórium ORCID:
0009-0003-3592-8968

Összefoglalás: Szilíciummintákon négy különböző lézerberendezés segítségével felületmegmunkálást végeztünk, majd megvizsgáltuk, hogyan változik meg a minták fényvisszaverő képessége. Megállapítottuk, hogy a megmunkált felületekről visszavert fény intenzitása jelentős mértékben – akár az eredeti érték 2%-ára is – csökkenhet. A megmunkált felületeket pásztázó elektronmikroszkóppal tanulmányozva azt tapasztaltuk, hogy a mintafelületeken a megmunkáló lézerberendezések típusára jellemző új struktúrák jelentek meg, amelyek felelősek a felület visszaverési képességének csökkenéséért. A megjelenő különböző felületi struktúrák eltérő fényvisszaverési értékeket adtak.

Kulcsszavak: lézer, felület mikromegmunkálása, impulzushossz, visszaverődés, pásztázó elektronmikroszkópia

Abstract: The surfaces of silicon samples were machined using four different laser devices to modify their reflexivity of light. The intensity of light reflected from the surfaces could be significantly reduced, even to 2% of the original value. We studied the machined surfaces with a scanning electron microscope, and found that new structures characteristic of the type of machining laser equipment appeared on the sample surfaces, which were responsible for the decrease in the reflectivity of the surface. The different surface structures that appeared typically gave different light reflectance values.

Keywords: laser, surface micromachining, pulse length, reflection, scanning electron microscopy

1. ÁBRA. A lopakodó-
technológia alkalmazása
a Lockheed F-117A
Nighthawk repülőgépen
(A szerzők szerkesztése)

A „fekete” szó mérnöki-tudományos értelemben vett jelentése, hogy egy test csak kis mértékben vagy egyáltalán nem veri vissza a rá eső sugárzást. Az emberi szem számára ez azt jelenti, hogy az adott irányból nem érkezik érzékelhető fény, és feketének látjuk az

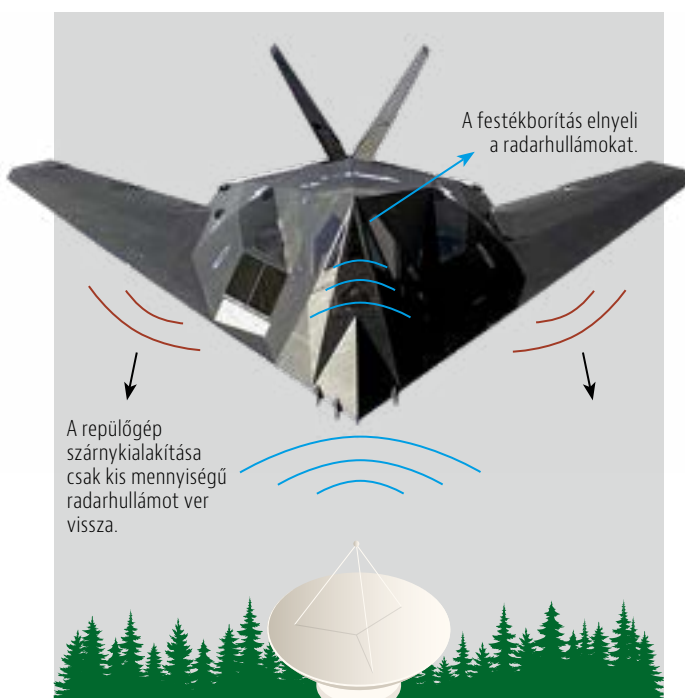
adott testet vagy objektumot. Ami fekete, azt és annak részleteit sem észleljük, kizárólag a fény hiányát. Ha pedig a szemünk helyett, annak mintegy kiterjesztéseként egy dektort használunk, legyen az például egy radar, akkor azonnal érthető a feketítés folyamatának katonai lényege: bármi, amit feketítünk, kevésbé veri vissza a rá bocsájtott jelet, így kevésbé lesz látható az ellenséges felderítés számára, emberi szemmel vagy akár radaron. Az elektromágneses sugárzást a hullámhossza szerint csoportokra bonthatjuk, például rádióhullámra, mikrohullámra, infravörösre, láthatóra – melyet az emberi szem érzékel –, továbbá ultrabolyára stb. Az emberi szem számára feketének észlelt tárgyakról érkezik más, a nem látható tartomány hullámhosszába tartozó sugárzás, tehát a fekete tulajdonságot valójában az érzékelő számára releváns hullámhosszúságon kell vizsgálni. A feketítés a biológiában is ismert rejtőzködési módszere bizonyos állatoknak. Például egyes lepkék szeme szintén „rossz” fényvisszaverő tulajdonságúvá fejlődött az evolúció során, hiszen így éjszaka nem látják őket a ragado-

zók. A lepkék ezen adottságát optikai elemek előállításánál a gyakorlatban is alkalmazzák. [1] Hasonlóan, egyes lopakodó repülők is azért kaptak adott alakú és anyagú külső borítást, hogy a radar által kibocsájtott jeleket ne verjék annyira vissza, így „álcázva” magukat. [2] [3]

A lézeres felületmegmunkálás nem csupán katonai, hanem egyéb alkalmazásokat is lehetővé tesz. Egyszerű példa, hogy a napsugarakat elnyelő tartály felmelegszik, ezáltal energiát nyerhetünk ki belőle. A feketítés hatására a tartály jobban felmelegszik, ezért a kivonható energia is nagyobb. Lézeres megmunkálással megváltoztathatók a fotovoltai tulajdonságok [4], a sűrűdési tulajdonságok [5], vagy akár felületeket tehetünk szuperhidrofóbbá, esetleg víz alatt szuperolajfóbbá [5]. Ez utóbbi például a víz olajos szennyeződéstől történő megtisztítására lehetne alkalmazható.

Világszerte számos kutatócsoport vizsgálta már a lézeres feketítést. Munkájuk során a minta megmunkálás előtti és utáni fényvisszaverési tulajdonságait hasonlították össze. Általános tapasztalat, hogy a visszavert fény intenzitása akár az eredeti érték tizedénél is kisebb értékre csökkenthető, bár ez függ a rá eső fény hullámhosszától is. [5] Ez utóbbi függés sem feltétlenül egyértelmű: különböző hullámhosszúságok esetén más-más megmunkálás lehet célszerű. A megmunkálást és a végeredményt számos paraméter határozza meg, amelyek közül alább többet is bemutatunk. Az optimális paraméterek megtalálása, valamint a felületkezelés során végbemenő fizikai folyamatok leírása továbbra is nyitott kérdés.

Felületmegmunkálási kísérleteink a Szegedi Tudományegyetem Nagyintenzitású Lézer Laboratóriumában (High Intensity Laser Laboratory – SZTE HILL) [6] történtek. A megmunkálást négy különböző lézerberendezéssel is elvégeztük, ezek eredményeit



összehasonlítottuk. Az általunk végzett megmunkálás során újdonságot jelentett az alkalmazott berendezések egyike, egy hibrid festék-KrF lézerefényforrás használata. (2. ábra) Ez egy széles körben még el nem terjedt lézertípus, amelynek egyes paramétere (hullámhossz, nyalábenergia, impulzushossz) ritkán fordulnak együttesen elő, ezért más kutatók számára egyszerre nem elérhető paraméterekkel végezhattünk felületmegmunkálást. Fontos megjegyezni, hogy ez a lézerberendezés az SZTE HILL laboratóriumában épült, és fejlesztése folyamatos. Három további, elterjedtebb berendezéssel is elvégeztük a megmunkálást.

Az eredeti, valamint a megmunkált minták (a továbbiakban mintáknak nevezzük a vizsgált anyagdarabokat) visszaverési tulajdonságát monokromatikus, azaz adott hullámhosszúságú, 656 nm-es lézerefénnyel vizsgáltuk. A vizsgált mintát a felületére merőlegesen világítottuk meg, és mértük a visszavert fény intenzitását. A berendezés mérte egyrészt a mintáról spekulárisan (a minta felületéről merőlegesen) visszaverődött fényt, másrészt a mintáról oldalra (diffúzan) szórt fénynek azon részét is, amely a felület normálisával legfeljebb 60 fokos szöveget zárt be. A következőkben a mintáról visszavert fény alatt a fenti kétféle visszavert fény együttesét értjük.

AZ ALKALMAZOTT LÉZERBERENDEZÉSEK TULAJDONSÁGAI

A lézerberendezéseket sokféle szempont alapján csoportosítják. Rögtön két csoportra osztja őket azon tulajdonságuk, hogy fényük időben folytonos-e – mint például egy lézerpointer esetén –, vagy pedig impulzusokból áll. Utóbbi esetben a berendezés szükségszerűen nem állandóan, hanem csak egy adott ideig bocsájt ki fényt, azaz rendre fel-felvillan valamennyi ideig. Kísérleteinkben impulzusüzemű berendezéseket használtunk, a négy alkalmazott lézerberendezés ebből a szempontból megegyezett.

Az impulzusüzemű lézereket az impulzushosszuk, azaz egy-egy felvillanásuk időhossza szerint szokás további csoportokra bontani. Ez az időhossz széles skálán, rengeteg nagyságren-



den keresztül változhat, és akár extrém rövid is lehet. Extrém rövid idejű impulzusra jó példa a Magyarországon széles körben ismert, szegedi Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source (ELI-ALPS), Attoszekundumos Fényimpulzus Forrás, hazánk egyik világviszonylatban is kiemelkedő kutatóintézete. Az „atto” egy SI-prefixum (előtag), jelentése 10^{-18} , tehát a milliárdod rész milliárdod része. A hétköznapi életben természetesen nem találkozunk az attoszekundumos (jele: as) időhosszal, de például a fentebb említett ELI-ALPS kutatóintézetben ilyen rövid ideig tartó impulzusokkal kapcsolatos kutatásokat végeznek. Léteznek olyan lézerberendezések is, amelyek impulzushosszára ennél kevésbé szigorú feltételt szabnak, és a kereskedelmi forgalomban is könnyen beszerezhetők, például amelyek impulzushossza 1 pikoszekundum alatti, tehát 10^{-12} másodpercnél rövidebb ideig tartó lézerimpulzusokat bocsájtanak ki. Ezeket több vállalat is készíti, forgalmazza, telepítésük nem igényel nagy vagy különleges teret. A szakirodalomban általában szubpikoszekundumosnak vagy ultrarövid impulzusúnak nevezik őket. Az 1 ps rövidségét mutatja, hogy a fény, amelynek terjedési sebessége vákuumban körülbelül 300 000 km/s, és a Holdról körülbelül 1 másodperc alatt ér a Földre, az 1 ps idő alatt csak 0,3 millimétert tesz meg. Még szemléletesebb példa egy szuper sportautó, amely 360 km/h sebességgel száguld, és 1 ps idő alatt csak annyit mozdul el, amennyi körülbelül egy atom mérete. Már több évtizede vizsgálják, alkalmazzák a szubpikoszekun-

dumos impulzushosszúságú lézereket is. Mint látni fogjuk, a megmunkáláshoz használt lézerimpulzusok időhossza alapvető fontosságú.

A kutatások eredményei szerint a lézerimpulzus időbeli hosszának függvényében a megmunkálás során más-más fizikai folyamatok a jelentősek. Hosszabb impulzusok esetén hőtani folyamatok határozzák meg a lézerrel megmunkált felület alakját [7] [8] [9], míg pikoszekundumnál rövidebb impulzusok esetén a fázis- és Coulomb-robbanás lesz jelentős. [4] [10] Ezen utóbbi impulzusok olyan rövid idejűek, hogy a besugárzás során közölt energia csak alig-alig tud hő formájában elvezetődni, így csak a besugárzott felület közvetlen közelében hoznak létre módosulást. [11]

Vizsgálataink során két ultrarövid impulzusú, azaz szubpikoszekundumos berendezést alkalmaztunk, és két másikat, amelyeknek impulzushossza nagyságrendileg 10 ns. Az előbbi kettő egy hibrid festék-KrF és egy titán-zafír lézer, utóbbi kettő pedig egy KrF és egy Nd:YAG lézer.

Az alkalmazott lézerek működése részletesen megtalálható a [12] és [13] közleményekben. A legtöbb lézer esetén, mint az alkalmazott berendezéseknél is, a lézerefényt aktív közeg szolgáltatja. Ez határozza meg, hogy milyen hullámhosszúságú fényt bocsájt ki, ami a megmunkálás szempontjából egy további fontos paraméter lehet. Az aktív közeget az alkalmazott Nd:YAG lézer esetén az ittrium-alumínium-gránát kristályrácsba beépített neodímiumionok adják, a titán-zafír lézer esetén pedig a zafírkristályba

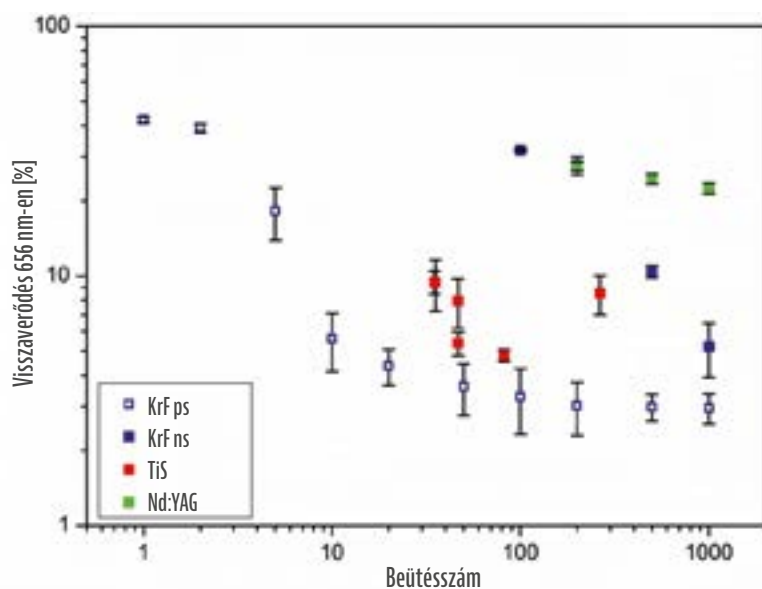
2. ÁBRA.

A megmunkáláshoz használt hibrid festék-KrF lézerberendezés
(A szerzők felvétele)

1. TÁBLÁZAT. Az alkalmazott lézerberendezések jellemzői (A szerzők szerkesztése méréseik alapján)

A lézerberendezés fajtája	Nd:YAG	KrF	titán-zafír	festék-KrF
Hullámhossza [nm]	532	248	800	248
1 impulzusának időhossza	10 ns	30 ns	0,1 ps	0,5 ps
Ismétlési frekvenciája [Hz]	10	10	200	2
Impulzusenergiája [mJ]	55	35	0,15	5
Alkalmazott teljesítménysűrűség [W/cm ²]	6,7·10 ⁸	6,3·10 ⁷	1,4·10 ¹²	4,6·10 ¹¹

3. ÁBRA. Az eredetihez viszonyított visszaverődés 656 nm-en, a mérési eredményeket mérési hibával együtt ábrázoltuk. A tengelyek osztása nem lineáris, mindkét tengely logaritmikus. A „KrF ps” jelöli a hibrid festék-KrF szubpikuszekundumos, a „KrF ns” címke a nanoszekundumos KrF lézert, a „TiS” címke a titán-zafír lézert (A szerzők szerkesztése méréseik alapján)



épített titánionok. Mindkettő szilárd halmazállapotú. Ezzel ellentétben a KrF és a hibrid festék-KrF lézer esetén az aktív közeg gáz-halmazállapotú: kripton és fluor vegyülete. Ezek egyszerű körülmények között nem alkotnának KrF molekulát, hanem külön kripton és fluor gázként lennének jelen, de nagy nyomáson elektromos szikra hatására a kripton és fluor gázból gerjesztett állapotú KrF molekulák keletkeznek. Ez a KrF molekula rövid élettartamú, és legerjesztődése során 248 nm hullámhosszúságú fotont bocsájt ki, majd alapállapotában szétbomlik, és ismét kripton és fluor gázá válik.

A KrF és a hibrid festék-KrF lézer közti különbség abban áll, hogy míg az előbbi esetén csak a KrF közeg szolgáltatja a lézerimpulzust, ezáltal nanoszekundumos impulzust bocsájt ki, az utóbbi esetén festéklézerrel előállított magimpulzust alakítás, formálás után erősítünk a KrF közegben, és végül egy szubpikuszekundumos impulzust kapunk. [14]

A nagyon rövid impulzusidő nagyon nagy teljesítmény eredményez

az impulzus, azaz a felvillanás alatt. Az általunk alkalmazott, az 1. táblázatban leírt jellemzőkkel rendelkező hibrid festék-KrF berendezés impulzusonként akár több tíz mJ energiát is ki tud bocsájtani, miközben impulzushossza körülbelül 0,5 ps. Ebből számolva a teljesítménye az impulzus tartama alatt több tíz GW, ezzel szemben például a paksi atomerőmű teljesítménye 2 GW, bár ez utóbbi folytonos, míg előbbi csak egy nagyon rövid ideig tart, tehát összehasonlításuk nem minden tekintetben jogos és értelmes. Ugyanígy összehasonlítható az eszköz például lézerfényvel működő fegyverekkel is, amelyeknek teljesítménye több kW [15], tehát számos nagyságrenddel alacsonyabb, mint az egyik általunk alkalmazott berendezése. Ebből is látszik, hogy egyes jellemzők értelmezése alapos körütekintést igényel. Érdemes megjegyezni, hogy a Rafael Iron Beam egy 100 kW-os osztályú High Energy Laser Weapon System (HELWS), amely osztályában az első ilyen hatékony fegyver, és nyálábja 10 km-es távolságig egy érme

méretére fókuszálható [16], ezért alkalmazható nagy energiával és nagy energiasűrűséggel.

A megmunkálás egy másik, nyilvánvalóan alapvető paramétere az energiasűrűség: nem mindegy, hogy a lézerfényt, amelynek impulzusonkénti energiája adott és egyszerűen megmérhető, mekkora területre fókuszáljuk. Ha a fókuszált energia, azaz az energiasűrűség elég nagy, akkor a felületet nagyon felmelegítheti, ezáltal meg is olvaszthatja, sőt akár el is párologtathatja. Másrészt ionizálhatja is, több ezer fokos plazma keletkezhet, így aztán nemcsak megváltoztathatjuk a felületet, például olvasztással, hanem anyagot is eltávolíthatunk, azaz ablálhatunk. Számunkra ez utóbbi nem cél, csakis átalakítani akarjuk a minta felületét.

További kérdés például, hogy a nyáláb keresztmetszetében milyen az energiasűrűség: állandó vagy a nyálábnak van valamilyen nemtriviális alakja, profilja? Amennyiben egyetlen impulzust bocsájtunk a minta felületére, és ez a minta felületén változást hoz létre, azaz foltot hagy, a folt szélén vagy közepén vajon mekkora energiasűrűség érte a mintát? Ha ez erősen változó, akkor az egy-egy impulzus általi felületmegmunkálás is a hely függvényében változó: a folt szélén, ahol kevesebb az energiasűrűség, egészen eltérő a hatás, mint a folt közepén, ahol nagyobb az energiasűrűség. A rendelkezésünkre álló KrF és hibrid festék-KrF berendezés energiaeloszlása térben egyenletes, azaz homogén, eltérően az elterjedt lézerek többségétől, amelyek Gauss-profilúak. Az 1. táblázat az alkalmazott berendezések néhány jellemzőjét mutatja.

Szintén fontos paraméter a beütésszám, azaz, hogy egy adott helyre hány lézerimpulzust bocsájtunk. Az egymás után következő impulzusok folyton tovább módosíthatják a felületet [17], míg végül akár teljesen más felületi struktúrát hozhatnak létre, mint egyetlen impulzus.

A VISSZAVERÉSI ÉRTÉKEK VÁLTOZÁSA

Hogy a megmunkálás hatását egyszerűsíteni tudjuk, referenciaképpen megmértük, hogy a megmunkálatlan

szilíciumminta a rá eső, adott hullámhosszúságú fény hány százalékát veri vissza. Ezt követően négy különböző lézerberendezést alkalmazva megmunkáltuk a minta felületét, és a megmunkálás utáni és előtti fényvisszaverési értéket viszonyítottuk egymáshoz.

A 3. ábra azt mutatja, hogy mely berendezésnél, mely beütésszámnál az eredeti érték hány százalékára csökkent a visszaverődés, 656 nm-es hullámhosszúságú fényt alkalmazva.

A legalacsonyabb visszaverődést az ultrarövid impulzushosszú hibrid festék-KrF lézerrel végzett megmunkálások esetén mértük, amelyre vonatkozóan már 10 beütésszám mellett is az eredeti érték 10%-a alá csökkent a visszaverődés mértéke. Mind a négy vizsgált hullámhossz esetén is ugyanezt tapasztaltuk. A beütésszámot növelve a visszaverődés tovább csökkent, több mint 100 beütés után az eredeti érték 2%-a alá.

A két nanoszekundumos berendezés (KrF ns és Nd:YAG) alkalmazása esetén is jelentősen csökkent a visszaverődés, de kevésbé, mint azt a szubpikuszekundumos berendezéseknél tapasztaltuk. A ns-os berendezéseknél a beütésszámot emelve a visszaverődés további jelentős csökkenését mutattuk ki, a ns-os KrF lézer esetén például 1000 beütés után már az eredeti érték 10%-át sem érte el.

Megállapítottuk, hogy a visszaverődés értéke mind a négy berendezés esetén jelentősen csökkent; jobban csökkent az ultrarövid impulzusú lézerekénél, mint a ns-osoknál, és legjobban csökkent az ultrarövid impulzushosszú KrF lézer esetén.

A MEGMUNKÁLT FELÜLET KÉPE: FÉNYCSAPDA

Ha a megmunkálás során a felület kevésbé visszaverővé vált, akkor az nyilván vagy jobban elnyeli, vagy pedig az eredetihez képest nagyobb szögben jobban szórja a fényt. Az erősebb elnyelés egyszerű oka, hogy a felületen különböző struktúrák jelentek meg, amelyek fénycsapdaként viselkednek.

Egy fénycsapdát könnyen elképzelhetünk (4. ábra), ha arra gondolunk, hogy a minta felületén oszlopok helyezkednek el, amelyeket a

felület megmunkálásával hoztunk létre. A mintára eső fény (az ábrán piros színnel jelölve), ha két oszlop közé esik, akkor azok között többször is visszaverődik, oda-vissza pattog. A fénysugár az oszlopok közötti rész alján is visszaverődik, majd a felülettől távolodásba kezd (az ábrán kék színnel jelölve). Ezen távolodás alatt is számos alkalommal visszaverődik, oda-vissza pattog. Tegyük fel, hogy a minta anyaga nem teljesen (nem 100%-ban) visszaverő, hanem minden egyes visszaverődés során a ráeső fényből valamennyit el is nyel. Ekkor a fény minden egyes visszaverődés során valamekkora részben elnyelődik, veszít az intenzitásából. A többszörös visszaverődések-elnyelődések után távozó fény intenzitása jelentősen kisebb lehet, mint a beeső fényé volt.

A megmunkált minták felületéről pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk, amelyek nagy előnye, hogy a fénymikroszkópos képekhez képest sokkal nagyobb nagyítás és mélységélesség érhető el alkalmazásukkal, így a felületi struktúrák jobban láthatóak. (5. ábra) Megjegyezzük, hogy a képeken az egyes részek fényessége nem a szokásos, a szem vagy a radar által érzékelt fényességnek felel meg, ugyanis a képeket nem fény, hanem egy elektromos töltéssel rendelkező elektronnyaláb leképezésével hoztuk létre. Emiatt az elektronmikroszkópos felvételeken fényesnek látszódnak például az élek is. Szintén fényesnek látszik az oxidált szilícium nanorészecské, amelyek a beütésszámot növelve egyre inkább megjelennek a felületen. Ezek, ha nem elektronnyalábbal vizsgáljuk a felszínt, nem szükségszerűen fényesek.

Látható, hogy mindegyik esetben kialakultak mikrométerű felületi struktúrák, például oszlopok vagy megszilárduló olvadékcseppek. Ismert, hogy különböző energiasűrűségnél, más-más lövésszámnál más-más struktúrák jelennek meg, amelyek mérete a lézer hullámhosszától a több mikrométerig terjedhet, és akár egymáson is megjelenhetnek. [15]

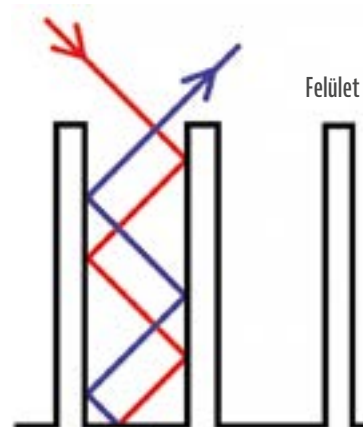
A ns-os impulzushosszúságú Nd:YAG lézer esetén nem tapasztaltunk jelen-

tős felszínváltozást 200 beütésszám alatt. Ezután egy fodrozódó struktúra jelent meg, és ez a beütésszám növelésével egyre jelentősebb lett. A szintén ns-os impulzushosszúságú KrF lézer esetén körülbelül 200-as beütésszámnál sekély árkok jelentek meg, melyek körül a lézer által megolvasztott, fröcsögő cseppekből újból megszilárdult anyag található. A beütésszám növelésével keskeny, oszlop-szerű részekből álló struktúra jelent meg. Az oszlopok között a felület hullámossá vált.

Az ultrarövid impulzushosszú titán-zafír lézer esetén gömbszerű objektumok képződtek a felszínen. A beütésszámot növelve a gömbök átmérője 5–10 mikrométeresre növekedett, és mialatt a gömbök közötti árkok mélyültek, ezek körülbelül 10 mikrométer magas oszlopokká alakultak.

Bár a megmunkálás során nem a felületen lévő anyag eltávolítása volt a cél, hanem a felület megváltoztatása, a megmunkálás során anyagot is eltávolítottunk. Ennek egy része az előbbi oszlopokra nanopor formájában visszarakódott. A festék-KrF lézer esetén 1 impulzus után apró, buborékszerű részek jelentek meg, melyek 5 lézerimpulzus után már az egész felületet beborították. A beütésszámot tovább növelve egy szemcsés struktúra alakult ki, amely szemcséinek mérete a beütésszám emelésével nőtt.

A 6. ábra nagyobb nagyítás mellett mutatja, hogy a felület milyen habos-sá alakítható. A felületen apró, megszilárdult, mikrométer alatti cseppecskék jelenhetnek meg, amelyek a forróra melegített, fröcsögő anyagból szilárdultak meg.



4. ÁBRA. A fénycsapda sematikus ábrája, ahol a piros szín jelzi a ráeső, a kék az eltávozó fényt. Az ilyen alakú felülettel rendelkező anyagok kevésbé verik vissza a fényt a többi anyaghoz képest (A szerzők szerkesztése)

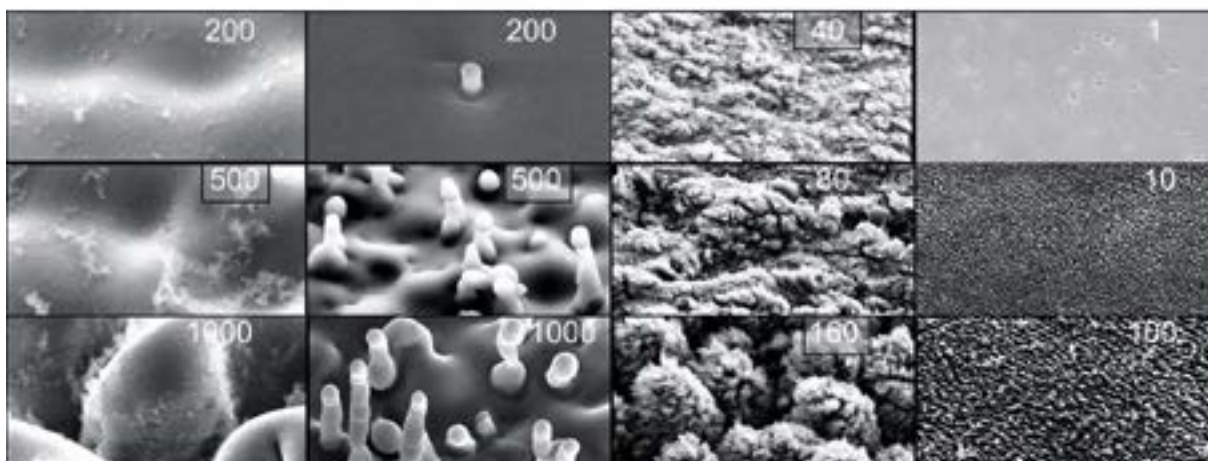
5. ÁBRA. Az egyes megmunkált felületekről adott lövésszám után készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételek. A fehér számérték a beütésszámot jelzi (A szerzők szerkesztése saját felvételeik alapján)

Nd:YAG 10 ns

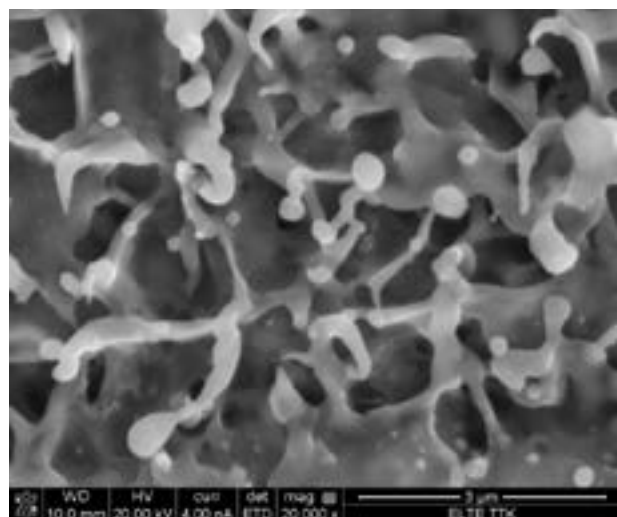
KrF 30 ns

Titán-zafir 0,1 ps

festék-KrF 0,5 ps



20 µm



6. ÁBRA. Pásztázó elektronmikroszkópos, húszezerszeres nagyítású felvétel egy rézminta felületéről, amit a szerzők a hibrid festék-KrF berendezéssel munkáltak meg (A szerzők saját felvétele)

ÖSSZEGZÉS

A Szegedi Tudományegyetem Fizika Intézetének Nagyintenzitású Lézer Laboratóriumában végzett kísérlet-sorozatunk során megvizsgáltuk, hogy lézeres felületmegmunkálás hatására hogyan változik egy szilíciummintha fényvisszaverő képessége. Megállapítottuk, hogy a megmunkáláshoz használt négy különböző lézerberendezés esetén különböző struktúrák jelentek meg az anyag felületén, melyek a beütésszámot növelve át is alakulhattak. A megmunkálás hatására a mintáról visszavert fény intenzitása jelentősen csökkent, a lézer tulajdon-

ságaitól függően más-más visszaverési értékeket adva, akár az eredeti érték 2%-ára is lecsökkenve.

Annak megállapítása viszont, hogy mely anyagon, mely lézer és megmunkálási paraméterek esetén milyen felület képződik, és az mennyire homogén, továbbá mely hullámhosszon mennyire ver vissza, számos további mérést igényel. Ezt és ennek fizikai leírását több kutatócsoport is vizsgálja. Feltételezhető, hogy a módszer általános-ságban képes arra, hogy csökkentsük vele a visszaverődő fény vagy jel intenzitását, amely katonai szempontból kiemelkedő fontosságú tényező. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Brunner, R. et al: Lessons from nature: biomimetic subwavelength structures for high-performance optics, *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 641–659. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100011>
- [2] Ashraf, R. et al: Performance Analysis of Radar Cross Section for F-117 Nighthawk Stealth Aircraft over Frequency and Aspect Angle. *International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2)*. IEEE, 2018, 1–4 <https://doi.org/10.1109/IC4ME2.2018.8465587>
- [3] Kennedy, K. J.: *Stealth: A Revolutionary Change in Air Warfare*. Naval War College Review, 1993/2, 118–136. <https://doi.org/10.21236/ada249880>
- [4] Iyengar, V. V. et al: Properties of ultrafast laser textured silicon for photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011/10, 2745–2751. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.011>
- [5] Yin, K. et al: Underwater superoleophobicity, anti-oil and ultra-broadband enhanced absorption of metallic surfaces produced by a femtosecond laser inspired by fish and chameleons. *Scientific Reports*, 36557, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep36557>
- [6] SZTE Nagyintenzitású Lézer Laboratórium. <http://exp.physx.u-szeged.hu/hill/> (Letöltve: 2024.07.02.)
- [7] Lie, X. et al: Microstructuring and doping of silicon with nanosecond laser pulses. *Applied Surface Science*, 2012/20, pp. 8002–8007, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.155>
- [8] Yaddadene, C. et al: Optical properties of silicon microcolumn grown by nanosecond pulsed laser irradiation. *Optics Communications*, 2011, 3308–3310. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.03.004>
- [9] Zuev, D. A. et al: Fabrication of black multicrystalline silicon surface by nanosecond laser ablation. In: *Applied Physics B*, 1. kötet 2011, 545–550. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4625-x>
- [10] Torres, R. et al: Femtosecond laser texturization for improvement of photovoltaic cells. *Black Silicon, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 1. kötet 2010, 621–625.
- [11] Szabó P. I. et al: Micromachining using the high energy flat-top beam of a femtosecond pulse UV laser system: micropillar prefabrication. *Applied Physics A*, 2023, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06679-x>
- [12] Almási Gábor et al: *Lézerfizika*, tankönyv. PTE TTK és SZTE TTK, 2013. <https://eta.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/1317>
- [13] Basting, D. et al: *Excimer Laser Technology*. Springer, 2005. <https://doi.org/10.1007/b137894>
- [14] Szatmári Sándor et al: Hybrid dye-excimer laser system for the generation of 80 fs, 900 GW pulses at 248 nm. *Optics communications*, 1987/5, 305–309. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(87\)90181-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(87)90181-7)
- [15] Pudo, D. et al: High energy laser weapon systems: evolution, analysis and perspectives. *National Defence*, 2017.
- [16] Easley, M. *Israeli-Made High-Energy Laser Makes Debut*. *National Defense*, 2023.
- [17] Ahmed, K. M. T. et al: Fabrication of micro/nano structures on metals by femtosecond laser micromachining. *Micromachines*, 2014, 1219–1253. <https://doi.org/10.3390/mi5041219>