

HULLÁMHOSSZMÉRÉS VIDEÓANALÍZISSEL

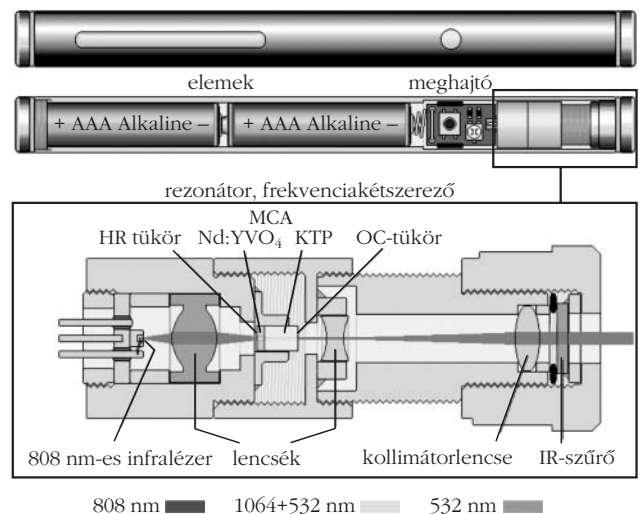
Piláth Károly
ELTE Trefort Ágoston Gyakorlóiskola

A tanárok és a végzős diákok körében is méltán népszerű az az érettségi kísérlet [1], amelyben egy vörös lézermutató hullámhosszát kell meghatározni optikai rács segítségével. Az egyik érettségi vizsgára gyakoroltunk a tanítványaimmal, amikor megkérdezték, hogy miért pont a piros lézermutató hullámhosszát kell meghatározniuk, hiszen annak hullámhosszát már úgymint tudja mindenki. Kipróbálhatjuk zölddel is – válaszoltam – és még nem is sejtettem, hogy milyen új mérési lehetőségeket rejt ez a csere. A lézercsere nem okozott komolyabb anyagi megterhelést, viszont lehetővé tette, hogy kibővítsük a méréshez kapcsolható kérdések sorát. A zöld lézermutató vizsgálata most azért is aktuális lehet, mert Magyarország is csatlakozott az EPS-en keresztül ahhoz az európai kezdeményezéshez, amely 2015-öt a *Fény évének* választotta.

Először nézzük meg közelebbről, hogy mit is fogunk mérni. A legnehezebb kérdést a mérendő eszköz típusának meghatározása jelentette. Nagyon sokféle olcsó eszközt megvizsgáltam, de típusazonosítót egyiken sem sikerült találnom. Így az általunk mért esz-

közről is legfeljebb csak annyit tudok elmondani, hogy az ebay-en vásároltam 990 forintért. Az adattábláján csak annyi szerepelt, hogy a hullámhossza 532 nm és

1. ábra. A zöld lézer működési elve.



a teljesítménye < 5 mW, valamint, hogy a mutató fénynyalábjába tilos közvetlenül belenézni.

A világhálón keresgélve megtudhatjuk, hogy sokáig kellett várnunk olcsó zöld lézermutatóra, amit a fizika-érettségire készülve tanulmányozhatunk. Az első zöld lézermutatók 2006-ban jelentek meg a piacon, miközben mind a vörös, mind a kék színű társaik már sokkal korábban elérhetővé váltak. Ezen zöld lézerek működése sokkal bonyolultabb, mint hagyományos piros társaiké [2]. Működésük az 1. ábra alapján érthető meg.

Elsődleges fényforrásuk egy 808 nm hullámhosszú, közeli infravörös tartományban működő, nagy teljesítményű lézerdíóda. A diódát nagyon leegyszerűsítve egy Nd:YVO₄ (neodímiummal szennyezett itrium-ortovanadát) kristály követi, amely a 808 nm-en elnyelt energiát 1064 nm-es hullámhosszon sugározza ki. A sorban az Nd-t egy harmadik fontos elem, egy KTP (KTiOPO₄, kálium-titanil-foszfát) kristály követi. Ez a nemlineáris kristály képes megduplázni a gerjesztő fény frekvenciáját, így ebből már a látható tartományba eső, 532 nm-es fény lép ki. A sort egy olyan IR-szűrő zárja, amely kiszűri a rendszert pumpáló infravörös lézer fényét, így a lézermutatóból elvileg már csak az 532 nm hullámhosszú zöld fény léphetne ki. E szűrő minősége az olcsóbb lézermutatókban megkérdőjelezhető. A rendszer hatásfokát nagy pontosságú optikai elemek és antireflexiós rétegek javítják.

A fentiek ismeretében érettségi kísérletünket a következő kérdésekkel bővítettük:

Vajon sikerült-e a gyártóknak úgy elnyomni a pumpaként használt 808 nm-es infravörös lézer fényét, hogy az már ne jusson ki a lézermutatóból?

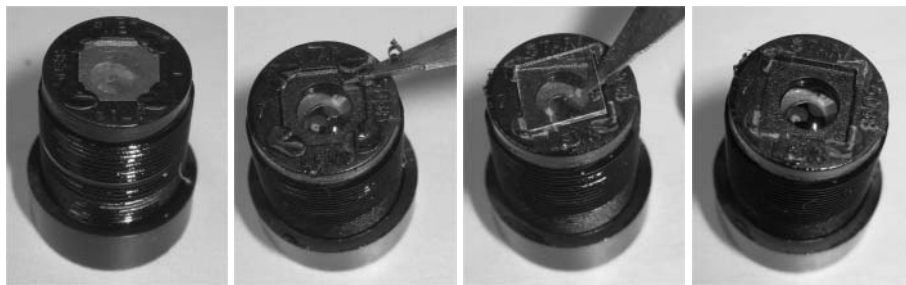
Kimutatható-e a kimenő fénynyalábjában a 1064 nm-es hullámhossz?

Természetesen megtartottuk az eredeti feladatot, vagyis az érettségizőknek meg kellett határozniuk a lézerből kilépő zöld fény hullámhosszát is.

Az első kérdésre egy olyan módosított webkamera segítségével kaphattunk választ, amely már nemcsak a látható tartományban képes képalkotásra, hanem a közeli infravörös tartományban is [3].

A webkamera hullámhossz-tartományának kibővítése

A webkamerákba épített CMOS fényérzékelők [4] nemcsak a látható tartományban érzékenyek, hanem a közeli infravörös (700 nm – 1100 nm) sugárzást is képesek detektálni. E kamerák azt a célt szolgálják, hogy valóságosan adják vissza a szemünkkel látható képet, ezért ezekből az eszközökből ki kell szűrni az egyébként mindenütt jelen lévő – elsősorban a Napból vagy a wolframszálas izzólámpákból származó –



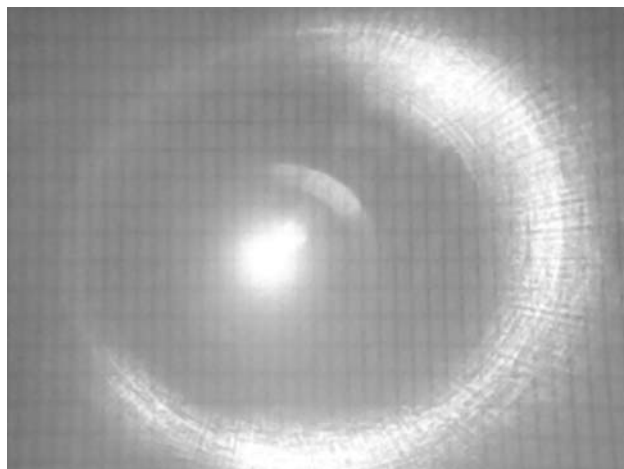
2. ábra. A webkamera felesleges, infravörös szűrője és eltávolítása.

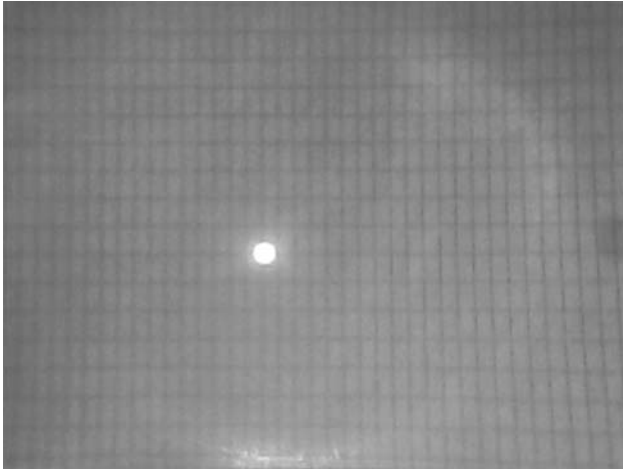
infravörös sugárzást. A webkamerákban ezt úgy oldják meg, hogy az objektívlencse mögé egy, a 700 nm-nél nagyobb hullámhosszú fényt át nem engedő szűrőt építenek be. Mérésünkben a látható és a közeli infravörös tartományban is szeretnénk „látni”, így távolítsuk el ezt a szűrőt! Csavarhúzóval vagy szikével ezt könnyen megtehetjük (2. ábra). Minél olcsóbb egy webkamera, annál könnyebb ez a művelet, hiszen bennük csak egy csepp szilikonragasztó tartja a szivárványszerűen csillogó szűrőt. Egy ilyen „megoperált” kamera a látható fény mellett már a közeli infravörös tartományban is érzékeny.

A zöld lézermutató fényének vizsgálata

Az ily módon átalakított kamera segítségével belenézve a lézermutatónkba kilépő fénybe, nem sok mindent láttunk, hiszen a nagy fényerő miatt az érzékelő túlvezérelté vált, így gyakorlatilag nem juthattunk hasznos információhoz. Ezért a lézermutatónkkal egy füzetlapot világítottunk meg (diffúz felületet) és a füzetlapon keletkező fényfoltot vizsgáltuk. A fényfolt kibővített spektrumú fényképe meglepő változást eredményezett (3. ábra). A kamerához mellékelte szoftver is nyilván torzított valamit a „látványon”, de azért elég meggyőzően látszik, hogy a zöld fényfoltok képest csak úgy dől az infravörös fény a lézerből. Az intenzitásarányok ebből a felvételtől csak becsülhetők, hiszen az egzakt értékeléshez figyelembe kellene venni az érzékelő spektrális érzékenységét is. A fénykép

3. ábra. A fényfolt képe a módosított kamerával.



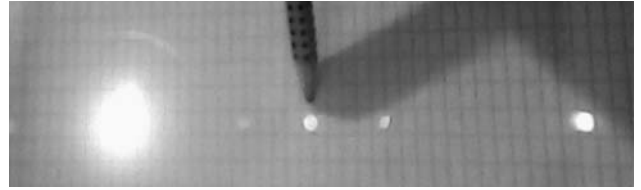
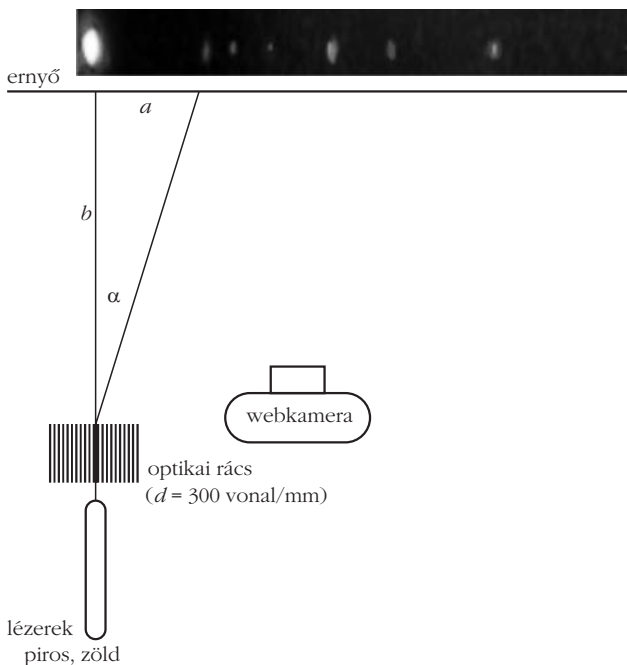


4. ábra. A fényfolt képe, kiszűrve az infravörös fényt.

fehér színe arra utal, hogy a kamerába épített érzékelő telítésben van mind a három (RGB) csatornán. A felvételen azért nem látszik zöldnek a lézer zöld fényfoltja, mert az érzékelőt mindhárom színcsatornán túlvezérlí a kép közepén a lézertől kilépő infravörös + zöld – szemmel egyébként szép zöld színűnek látzó – sugárnyaláb. A zöld pont körül kialakult korona szabad szemmel nem látható. Itt jegyezném meg, hogy ehhez a felvételhez a lézermutató elején található, fémből készült kollimátort eltávolítottam. Mivel ebben nincs semmilyen szűrő, így ez a kilépő fény spektrumát nem befolyásolta.

Ezt követően, újabb felvétel készítése előtt a lézertől kilépő fény útjába az épületek ablakaira ragasztható hőszűrő – azaz az infravörös sugárzást elnyelő – fóliát helyeztünk. A fóliát két rétegben alkalmazva a zöld nyaláb intenzitása alig változott, ugyanakkor a lézertől kilépő infravörös sugarakat jó hatásfokkal szűrte. A szűrő hatása a 4. ábrán látható.

6. ábra. A mérés elrendezése.

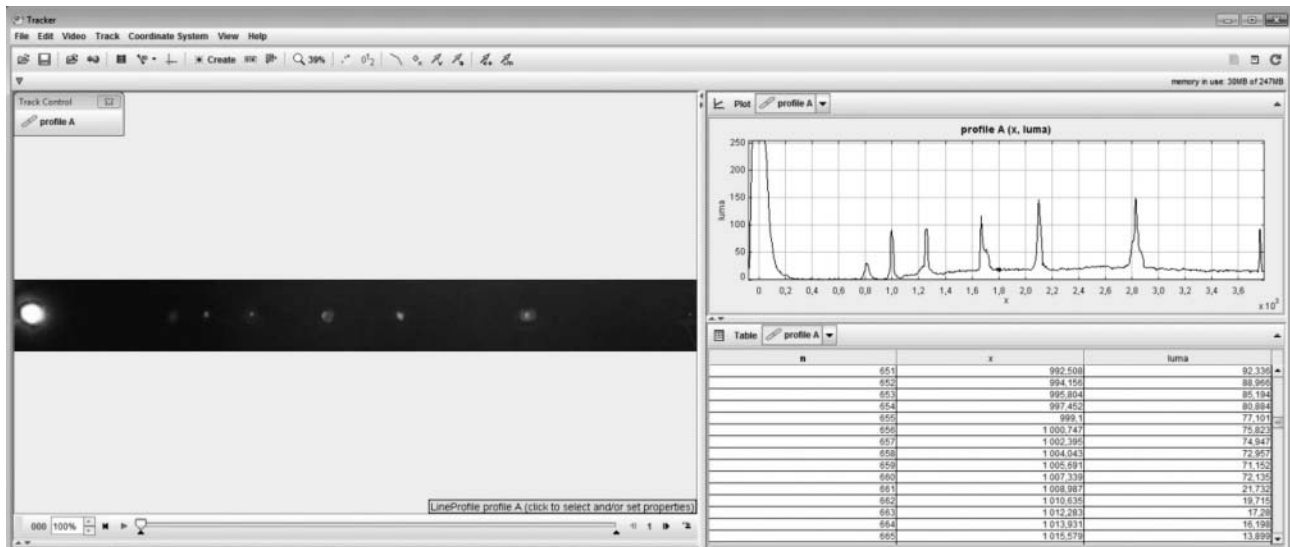


5. ábra. Az infravörös fényfolt helyzetének meghatározása ceruzával.

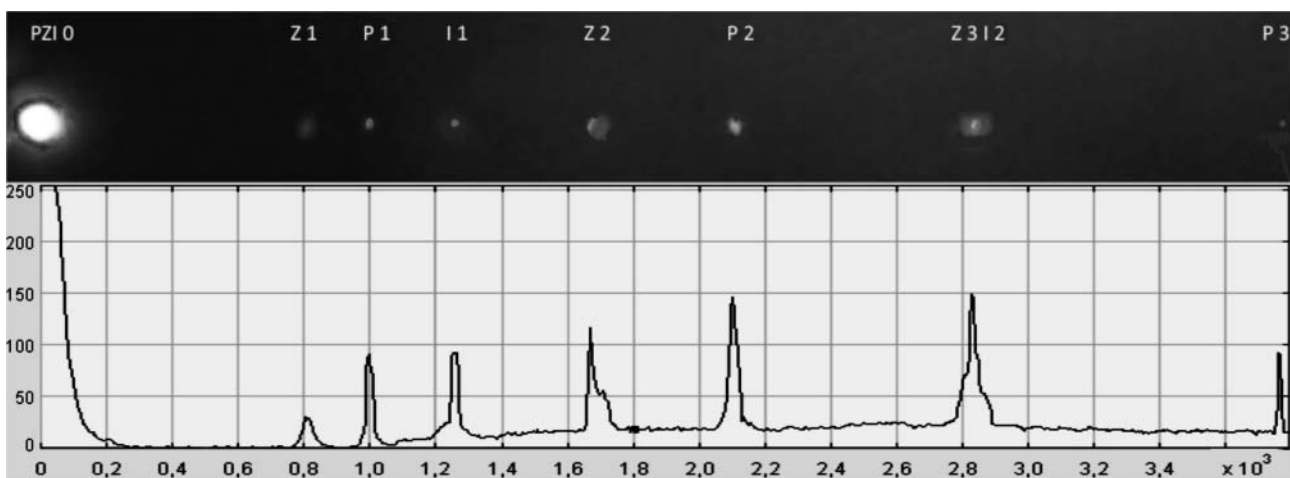
Miután webkameránkkal meggyőződünk arról, hogy a zöld mellett a közeli infravörös sugárzás is kilép lézermutatónkból, megmértük a hullámhosszakat. A látható hullámhossz meghatározása nem okozott nehézséget, hiszen ugyanazt a módszert követtük, mint ami az érettségi mérésben le van írva. A lézer fényt át bocsátottuk egy ismert rácsállandójú optikai rácson, majd az elhajlás szögéből és a rácsállandóból meghatározhattuk a hullámhosszat. A szemünk számára láthatatlan infravörös sugarak hullámhosszának meghatározásakor a szög méréséhez látnunk kell valahogy az elhajlott fénysugarak irányát. Szemünk helyett ez esetben is a módosított kameránkat használtuk, így egymás mellett láthatóvá tettük az elhajlított sugarakat mind a látható, mind az infravörös tartományban. Az eltérés mértékét bejelölhettük volna egy ceruzával is (5. ábra), a kameránkkal figyelve a ceruza és a láthatatlan sugár helyzetét, de ha már kamerát használtunk, akkor sokkal praktikusabb volt a kamera képét videóanalizáló program segítségével kiértékelni. Az értékeléshez a maga műfajában legjobbnak számító, szabadon felhasználható Tracker nevű programot alkalmaztuk, amely letölthető a <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker> oldalról. Kitűnően telepíthető a Linuxoktól a Windows 8-ig tetszőleges operációs rendszerre. A program spektroszkópiai alkalmazásáról az interneten találhatunk bőséges információt [5], így használatát nem részletezem. A program a méréshez használt Line Profile üzemmódban képes egy kamerával készített fénykép fényességinformációit (luma¹) kiolvasni egy általunk megadható vonal mentén. Az analízis végére rendelkezésünkre áll egy hely-fényesség adathalmaz, amellyel már könnyedén számolhatunk. Mérésünkben a mérés geometriája megegyezett az érettségi mérés elrendezésével, oly módon kiegészítve, hogy a webkameránkkal egy sötét ernyő² létrehozott elhajlási képet fényképeztünk le (6. ábra). Ezt a képet töltöttük be a Tracker programba. A hagyományos érettségi mérésben a 6. ábrán látható a és b távolságokat megmérve megha-

¹ Luma (fényesség): Az YUV színtérben értelmezhető mennyiség. Az YUV színteret a fekete-fehér televíziózást a színes műsorsugárzással való kompatibilitás megőrzése érdekében fejlesztették ki. Az Y a fényesség, az U és V pedig a színekkel kapcsolatos információkat tartalmaz. A luma egy képpont világosságára jellemző mennyiség. Ez a megoldás lehetővé tette, hogy egy színesben közvetített filmet fekete-fehér TV készüléken is élvezhetően lehessen nézni. A három alapszínből képzett érték: $Y = 0,2126 \cdot R + 0,7152 \cdot G + 0,0722 \cdot B$. Az $Y = 0$ esetén fekete, míg az $Y = 255$ esetén fehér. A Tracker programban a képpont fényességére jellemző érték, függetlenül az adott pont színétől. http://en.wikipedia.org/wiki/Luma_%28videó%29

² A sötét ernyő javítja a kép kontrasztosságát.



7. ábra. Az elhajlási kép a Tracker programban.



8. ábra. Az analízis nagyított képe.

tárazzuk az α értékét, majd d a rácsállandó ismeretében a k -ik elhajlásra érvényes

$$\Delta s = 2k \frac{\lambda}{2} = d \sin \alpha$$

képlet segítségével kiszámíthatjuk a hullámhosszat. A videóanalízis eredményét a Tracker program ablakában a 7. ábrán láthatjuk. Az analízis részleteit a jobb láthatóság kedvéért a 8. ábrán felnagyítva is bemutatjuk. A mérésben a kalibrációhoz egy 650 nm hullámhosszúságú piros lézermutatató első elhajlási rendjének képét használtuk. A program által szolgáltatott adatokból a program első oszlopában látható n értékek az analizált pontok sorszámát jelölik. A második oszlopból leolvashatók az egyes csúcsokhoz tartozó x koordináták értékei. Ezek ismeretében, felhasználva a piros lézer már ismert hullámhosszát, a képen látható fényfoltok hullámhosszai meghatározhatók. A nagyított képen az x értékek a fénykép egy adott képpontjának vízszintes irányú relatív koordinátáit jelölik. A kép bal szélénél $x = 0$, míg a 650 nm-nek megfelelő első piros folt x koordinátája 1000. Kis elhajlási szögek esetén használhatunk lineáris közelítést is. Ez

esetben a 8. ábra alapján az első zöld fényfolt hullámhosszára $(825/1000) \cdot 650 = 536$ nm értéket kapnánk, mert az első zöld folt relatív x koordinátája 825. Az első infravörös fényfolt x koordinátája 1250, így lineáris becslést alkalmazva az e foltnak megfelelő hullámhossz $(1250/1000) \cdot 650 = 813$ nm. Nagyobb szögek esetén ez az egyszerű módszer már nem ad kellően pontos eredményt. Például a piros lézer második elhajlási rendjére az ily módon számított hullámhossz 650 nm helyett 692 nm hullámhosszat adna, holott éppen erre a hullámhosszra kalibráltuk mérésünket. A pontosabb mérésekhez kihasználhatjuk, hogy a kalibráció és a mérés során a rács és az ernyő b távolsága állandó. Figyelembe véve az elhajlásra vonatkozó képletet már egészen pontos értékeket mérhetünk. A mérési eredményekből látszik, hogy a mérések ± 10 nm pontossággal visszaadták az irodalomból ismert értékeket. A mérésből az is kiderült, hogy a lézerből kilépő fényben a módosított webkamerával csak a 808 nm-es hullámhosszúságú fény detektálható. Ennek több oka is lehet. Az egyik lehetőség, hogy 1064 nm-en a kamera érzékenysége már kicsi, így az esetleg ezen a hullámhosszon is kilépő

A videóanalízissel nyert mérési eredmények összefoglaló táblázata

	kalibráció: piros	méréndő színek						
		piros			zöld			infravörös
elhajlási rend	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.
x (tetsz. egys.)	1000	2130	3640	825	1700	2800	1250	2800
b (tetsz. egys.)	5030	5030	5030	5030	5030	5030	5030	5030
α (°)	11,2	23,0	35,9	9,3	18,7	29,1	14,0	29,1
mért λ (nm)	650	650	651	540	534	540	804	811
irodalmi érték (nm)	650	650	650	543	543	543	808	808
hiba (nm)	–	0	1	–3	–9	–3	–4	3

A 808 nm-en kilépő fény intenzitása nem tűnik elhanyagolhatónak, így az olcsó zöld lézermutatók használata különös óvatosságot igényel, hisz a kilépő sugarak egy részét szemünkkel nem tudjuk érzékelni.

Irodalom

1. Fizika_emelt_szobeli_meresek_2013maj www.oh.gov.hu
2. Laser pointer http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_pointer
3. <http://main.flosscience.com/Home/cleverhacks/irwebcam>
4. <http://oktel.hu/szolgalatas/kamerarendszer/kamerak/ccd-es-cmos-erzekelok>
5. https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/AAPT_spectroscopy_poster.pdf
6. J. Galang, A. Restelli, E. W. Hagley, Ch. W. Clark: *A Green Laser Pointer Hazard*. <http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/astrolab/AGreenLaserPointerHazard.pdf>

fény már nem mérhető. Egy másik ok lehet az, hogy az 1064 nm-es hullámhosszon kilépő fény intenzitását elnyomja az 532 nm-es zöld fény másodrendű elhajlásból származó fényfolt intenzitása [6].