

interakce dělíme laserovou spektroskopií na *lineární* a *nelineární*. Metodami nelineární laserové spektroskopie lze např. studovat i kvantové přechody, které nejsou při použití jiných zdrojů (výbojky atd.) detekovatelné. Lze takto stanovit skutečné šířky čar zastíněné dopplerovským rozšířením v důsledku tepelného pohybu částic atd. Používají se zejména přeladitelné barvivové lasery. V infračervené spektroskopii se využívají molekulární plynové lasery, polovodičové lasery a kapalinové lasery. Ve viditelné oblasti se používají zejména barvivové lasery, v ultrafialové oblasti lasery excimerové.

14.8 Laserová separace izotopů

je fotofyzikální metoda rozdělení izotopů, využívající optického posuvu v absorpčním spektru, při níž jsou atomy jednoho z izotopů převedeny monochromatickým laserovým zářením zdroje do vzbuzeného stavu, zatímco atomy ostatních izotopů zůstávají v základním stavu. Vzbuze­né atomy se ionizují např. opticky, elektrickým polem, srážkou s jinou částicí apod. a ionty separují pomocí vnějšího elektrického pole. Vzhledem k úzké spektrální čáře laseru lze excitovat i atomy s malým izotopickým posuvem, které jsou jinými metodami nese­parovatelné. Výhodou laserové separace je skutečnost, že energie vynaložená na separaci jednoho atomu je ve srovnání s jinými metodami poměrně malá, např. na separaci atomu uranu ^{235}U je nutno vynaložit 10^5 eV, zatímco difúzní metodou separace až 10^7 eV. Nevýhodou laserové separace izotopů je nutnost separace v plynné fázi. Praktické využití metod laserové separace izotopů se předpokládají především pro potřeby jaderné energetiky, např. pro separaci izotopů uranu, vodíku a lithia a pro separaci izotopů stopových prvků.

Kapitola 15

Bezpečnost práce s lasery

15.1 Biologické efekty laserového záření

Laserové záření působící na lidskou tkáň způsobuje různý stupeň poškození tkáně. Největší nebezpečí představuje laserové záření pro lidské oko, menší, ale ne zanedbatelnou pro lidskou kůži.

Laserové ozáření tkáně může způsobit její poškození působením mechanismů a) teplotních, b) fotochemických, c) akustických, d) expozicí a e) dalšími ději.

ad a) Poškození tkáně *teplem*, které dodává na tkáň dopadající záření, je principiálně závislé na typu tkáně (jak absorbuje záření dané vlnové délky), na intenzitě dopadajícího laserového svazku, na velikosti ozá­řen­é plochy a době expozice. Vzhledem k velkému rozsahu možných hustot energií a výkonů laserového záření, teplotní efekty způsobené zářením na tkáni mohou být od neznatelných, kdy tkáň zůstane neporušena, přes jednoduché zarudnutí kůže, její spálení, odpaření až po úplné roztržení tkáně.

ad b) Jevy tohoto typu jsou většinou způsobeny zářením v *ultrafialové* oblasti spektra a nejsou ještě dokonale prozkoumány. Nicméně již dříve bylo zjištěno, že odezva tkáně při ozáření slunečním světlem obsahujícím ultrafialové záření je zčervenání kůže a její následné zhnědnutí nebo

zanícení. Důležitou roli zde hraje pigmentace kůže. Působení ultrafialového záření na oční tkáň – rohovkový epitel způsobuje jeho porušení, které je pravděpodobně dáno fotochemickou denaturizací molekul (tj. DNA nebo KNA) nebo proteinů v buňkách tkáně.

- ad c) Část energie laserových impulsů dopadajících na tkáň se může přeměnit po dopadu na energii mechanickou. Vzniká tzv. *rázová* akustická vlna, která je schopna, pokud je dostatečně intenzivní, roztrhnout tkáň.
- ad d) Dlouhodobá expozice ultrafialovým zářením urychluje stárnutí kůže a je schopna vyvolat určitý druh rakoviny. Dlouhodobé ozáření oční rohovky světlem z blízké infračervené oblasti spektra s plošnou hustotou 0,08 až $0,4 \text{ Wcm}^{-2}$ způsobuje vznik katarakty (zákalu) oka. Chronické ozáření infračerveným zářením z oblasti 3 až $1000 \mu\text{m}$ je zatím předmětem zkoumání.
- ad e) Dalšími možnými mechanismy spojenými s krátkými impulsními expozicemi (Q-spínané nanosekundové nebo pikosekundové impulsy) zahrnují jevy: přímé efekty spojené s působením elektrického pole, Ramanův a Brillouinův rozptyl, multifotonovou absorpcí.

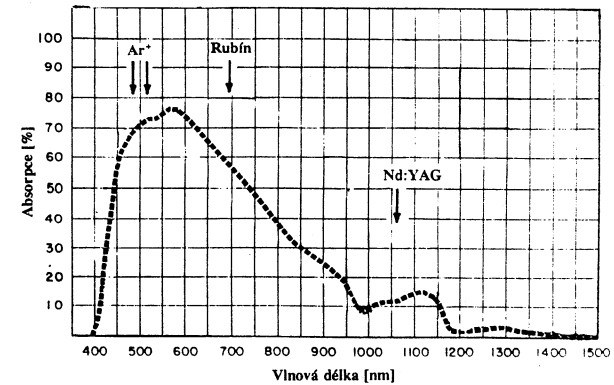
Faktory hrající roli při poškození tkáně jsou:

- vlnová délka laserového záření
- spektrální absorpce, reflexe a transmise tkáně
- intenzita ozáření dopadajícího laserového svazku
- velikost ozářené tkáně
- doba ozáření
- velikost pupily
- umístění poškozené sítnice.

Vlnová délka laserového záření: Rozlišujeme tři základní pásma spojená s biologickými efekty způsobenými dopadem záření na tkáň. Ultrafialové, viditelné a infračervené záření. Pro přesnější určení účinků jsou vlnové délky dále děleny na: blízkou ultrafialovou oblast UV-A (315 až 400 nm), UV-B (280 až 315 nm), UV-C (100 až 280 nm), viditelnou oblast (400

až 700 nm), blízkou infračervenou oblast IR-A (700 až 1400 nm), střední infračervenou oblast IR-B (1,4 až $3 \mu\text{m}$) a dalekou infračervenou oblast IR-C (3 až $1000 \mu\text{m}$).

Spektrální absorpce, reflexe a transmise záření: Absorbance, reflektivita a transivita tkáně závisejí jednak na druhu tkáně a dále na vlnové délce dopadajícího záření. Viditelné a blízké infračervené záření prochází rohovkou, čočkou a sklivcem oka a významná část je absorbována sítnicí a cévnatkou. Obr. 15.1 ukazuje výsledky měření absorpce sítnice a cévnatky na vlnové délce.

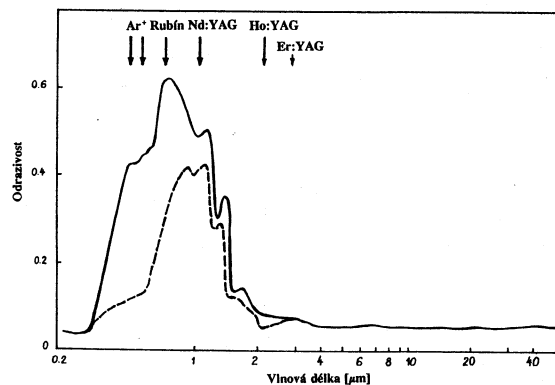


Obr. 15.1: Závislost absorpce sítnice a cévnatky na vlnové délce dopadajícího záření

Pro vlnové délky 1,4 až $1,9 \mu\text{m}$ je rohovka a předně komorový mok totálním absorbérem energie. Vlnová délka nad $1,9 \mu\text{m}$ je absorbována rohovkou. Blízké ultrafialové záření (315 až 400 nm) je absorbováno oční čočkou.

Spektrální reflektance lidské kůže je uvedena na obr. 15.2. Je zřejmé, že v oblasti UV-A, viditelném a v IČ-A pásmu je reflektance značně závislá na vlnové délce a na pigmentaci kůže. Jedinci se světlou barvou pleti odrážejí více energie záření a tudíž absorbují méně energie. Na druhé straně jedinci s tmavou pletí, mající hodně pigmentovanou kůži

(obsahující více melaninu), absorbují více zářivé energie a jsou zářením více ohroženi. Např. reflektance záření o vlnové délce $0,6 \mu\text{m}$ kůže málo pigmentovanou je $0,45$, zatímco u velké pigmentace kůže je pouze $0,1$. Tzn., že ozáření pro málo pigmentovanou kůži by muselo být zvětšeno, aby vyvolalo stejné poškození kůže.



Obr. 15.2: Závislost odrazivosti (reflektance) lidské kůže na vlnové délce dopadajícího záření

Intenzita ozáření: Je jasné, že čím větší je hustota výkonu dopadajícího záření, tím větší může být poškození tkáně. Při kontinuálním provozu laseru je nutné i lasery s výkonem $0,5 \text{ W}$ klasifikovat jako vysokovýkonové, protože mohou způsobit zapálení materiálu, na který záření dopadá, tzn. popálení kůže.

Velikost ozářené plochy: Tkáň obklopující ozářené místo je schopna odvádět absorbované teplo z místa ozáření, pokud je tato oblast dostatečně malá. Velká závislost stupně poškození tkáně na velikosti plochy ozáření je vidět z následujících příkladů:

1. Práh poškození sítnice:
 - 1 až 10 W.cm^{-2} pro $1000 \mu\text{m}$ oblast
 - nad 1 kW.cm^{-2} pro $20 \mu\text{m}$ oblast.

2. Pocit tepla zaregistrovaný člověkem ozářeným světlem o vlnové délce $10,6 \mu\text{m}$:
 - $0,1 \text{ W.cm}^{-2}$ pro stopu o průměru 1 cm
 - $0,01 \text{ W.cm}^{-2}$ pro celkové ozáření těla.

Doba ozáření: Expozice (množství předané energie na jednotku plochy) je součinem ozáření (dopadající hustoty výkonu ve W.cm^{-2}) a doby působení. Tudiž je zřejmé, že doba ozáření je základním parametrem. Určuje to, zda účinky záření budou primárně teplotní (dlouhá doba expozice), nebo akustické a další (způsobené velmi krátkými impulsy).

Velikost pupily: Tento parametr hraje významnou roli při poškození sítnice dopadajícím zářením, protože energie procházející až na sítnici je úměrná velikosti pupily. Pupilou o průměru 8 mm projde 16-krát větší energie záření než 2 mm pupilou. Velikost pupily pro různé světelné podmínky je následující:

- 7 až 8 mm pro oko adaptované na tmu
- 2 až 3 mm pro denní světlo
- $1,6 \text{ mm}$ pro okamžitý pohled do slunce.

Umístění poškození sítnice: Protože různé oblasti sítnice mají odlišnou funkci v procesu vidění, tak také stupeň závažnosti porušení sítnice se liší podle místa jejího poškození. Nejzávažnější je poškození centrální krajiny sítnice – místa ostrého vidění. Naopak porucha okrajových částí sítnice nezpůsobuje tak velké změny vidění.

Poškození oka: Oslepnutí jako následek přímého pozorování slunce je známo již ze středověku. Taktéž jiné druhy světelných zdrojů, jako např. obloukové lampy a výbojky jsou potenciálními zdroji způsobujícími poruchy zraku.

15.2 Zajištění bezpečnosti při práci s lasery

Požadavky k zajištění bezpečnosti při práci s laserem stanoví vyhláška Českého úřadu bezpečnosti práce ze dne 17.2.1982, Sb.zákonů č.124 a 125/1982,

Tabulka 15.1: Nejvyšší přípustné hodnoty pro lasery I.třídy

Vlnový rozsah λ [nm]	Doba trvání emise záření t [s]	P_{\max} [W]/ Q_{\max} [J]	Průměr limitního otvoru [mm]
$200 < \lambda \leq 400$	$t \leq 3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-5} k_1$ [J]	1
	$t > 3 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-10} k_1$ [W]	
$400 < \lambda \leq 1400$	$10^{-9} < t \leq 1,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7} k_1$ [J]	7
	$1,8 \cdot 10^{-5} < t \leq 10$	$7 \cdot 10^{-4} k_1 t^{3/4}$ [J]	
	$10 < t \leq 10^4$	$3,9 \cdot 10^{-3} k_1 k_2$ [J]	
	$10^4 < t$	$3,9 \cdot 10^{-7} k_1 k_2$ [W]	
$1400 < \lambda \leq 13\ 000$	$10^{-9} < t \leq 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-5} k_1$ [J]	1
	$10^{-7} < t \leq 10$	$4,4 \cdot 10^{-3} t^{1/4}$ [J]	
	$10 < t$	$7,9 \cdot 10^{-4}$ [W]	

Hodnoty pro k_1 a k_2 jsou uvedeny v tabulce 4

Tabulka 15.2: Limitní hodnoty pro lasery II.třídy

Vlnový rozsah λ [nm]	Doba trvání emise záření t [s]	P [W]	Průměr limitního otvoru [mm]
$400 < \lambda \leq 700$	$t > 2,5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	7

Tabulka 15.3: Limitní hodnoty pro lasery III. b) třídy

Vlnový rozsah λ [nm]	Doba trvání emise záření t [s]	P [W]/Q [J]	Průměr limitního otvoru [mm]
$200 < \lambda \leq 400$	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-4} k_1$ [J]	1
	$t > 2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-3} k_1$ [W]	
$400 < \lambda \leq 1400$	$10^{-9} < t \leq 2,5 \cdot 10^{-1}$	$12 k_1 t^{1/3}$ [J] max. však \neq J	7
	$t > 2,5 \cdot 10^{-1}$	0,5 [W]	
$1400 < \lambda \leq 13\ 000$	$10^{-9} < t \leq 2,5 \cdot 10^{-1}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$ [J]	1
	$t > 2,5 \cdot 10^{-1}$	0,5 [W]	

Hodnoty pro k_1 jsou uvedeny v tabulce 15.4

Poznámka k tabulkám 15.1 až 15.3:

1. Je-li průměr vyzařovaného svazku větší než průměr limitního otvoru, vychází se při zařazování laseru z energie (výkonu), které projdou limitním otvorem. Je-li průměr vyzařovaného svazku menší nebo roven velikosti průměru limitního otvoru, uvažuje se pro zařazení laseru veškerá jeho energie (výkon). Pro spektrální oblast 400–700 nm má k němu příslušející průměr hodnotu 7 mm, pro ultrafialovou a infračervenou spektrální oblast 1 mm. Na tyto velikosti limitního otvoru jsou vztaženy nejvyšší přípustné hodnoty energií, popřípadě výkonu záření laseru a limitní hodnoty energií, popřípadě výkonu záření laseru, uvedené v tabulkách 1–3.

2. Přípustné hodnoty pro dobu trvání emise záření v rozmezí $0,25 < t < 10^4$ s lze použít pro klasifikaci jen tehdy, když provedení laseru zaručuje, že expozice osob nepřekročí během osmihodinové pracovní doby dobu, ze které se při zařazení vycházelo. Jinak musí být klasifikace provedena podle přípustné hodnoty příslušející času $t > 10^4$ s.

Tabulka 15.4: Hodnoty korekčních faktorů k_1 a k_2

Vlnová délka [nm]	k_1	k_2			
		$t = 100 \text{ s}$	$t = 300 \text{ s}$	$t = 1000 \text{ s}$	$t = 3000 \text{ s}$
200	1				
300	1				
302	1				
303	1,32				
304	2,09				
305	3,31				
306	5,25				
307	8,32				
308	13,2				
309	20,9				
310	33,1				
311	52,5			1	
312	83,2				
313	132				
314	209				
315	330				
400	330				
401	1				
500	1				
600	1				
700	1				
710	1,05	1	1,1	3,3	11
720	1,09		2,1	6,3	21
730	1,14		3,1	9,3	31
740	1,2	1,2	4,1	12	41
750	1,25	1,5	5	15	50
760	1,31	1,8	6	18	60
770	1,37	2,1	7	21	70
780	1,43	2,4	8	24	80
790	1,5	2,7	9	27	90
800	1,56	1			
850	1,95				
900	2,44				
950	3,05				
1000	3,82	3	10	30	100
1050	4,78				
1060	5				
1100	5				
1400	5				
1500	1				
1540	100*		1		
1600—13 000	1				

* Korekční činitel $k_1 = 100$, když $t \leq 10^{-7} \text{ s}$; $k_1 = 1$, když $t > 10^{-7} \text{ s}$

část.25, str.497 a Směrnice o hygienických zásadách pro práce s lasery Ministerstva zdravotnictví ČSR, sv.53/1982. Vyhláška a směrnice se vztahují na lasery, jejichž vlnová délka leží v intervalu 200 až 13000 nm. Vyhláškou jsou upraveny povinnosti konstruktérů laserů, výrobců a provozovatelů.

Lasery jsou rozděleny podle nebezpečnosti účinků jejich záření do čtyř tříd:

I.třída: lasery, u kterých nejvyšší výkon záření nepřekračuje nejvyšší přípustné hodnoty (viz tab. 15.1) a dále všechny plně zakrytované lasery, jejichž kryt je upraven tak, aby jej nebylo možno otevřít bez použití nástrojů a aby při jeho otevření došlo k přerušení chodu laseru.

II.třída: lasery emitující záření ve spojitém režimu ve viditelné části spektra (400 až 700 nm), u nichž výkon vystupujícího záření nepřekračuje 1 mW, avšak překračuje nejvýše přípustné hodnoty pro I.třidu (srovnej tab. 15.1 a tab. 15.2).

III.třída: je rozdělena na dvě části:

III.a: Lasery emitující záření ve spojitém režimu ve viditelné části spektra, jejichž výkon nepřekračuje $5 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkonová hustota záření nepřekračuje hodnotu $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wcm}^{-2}$.

III.b: Lasery, u kterých nejvyšší výkon nepřekračuje limitní hodnoty a nespádají do tříd I. a II. a které nemohou bez fokuzování svazku překročit nepovolené hodnoty (viz tab. 15.3).

IV.třída: Lasery, jejichž výkon nebo vyzařovaná energie přesahuje limitní hodnoty stanovené pro třídu III.b a lasery, které mohou způsobit nebezpečný difuzní odraz.

Lasery, které mohou vyzařovat na více vlnových délkách se zařazují do tříd odpovídajících použití, při němž je nejvyšší riziko poškození zdraví.

Nejvyšší přípustné hodnoty energií a výkonů pro lasery jednotlivých tříd jsou uvedeny v tab.: 15.1 až tab.: 15.4. Příklady nejvyšších přípustných hodnot energií a výkonů pro některé typy laserů jsou uvedeny v tab.: 15.5

Tabulka 15.5: Příkladů nejvyšších přípustných hodnot záření

Třída	Vlnová délka [nm]	Trvání [s]	Výkon/energie
I.	630 (<i>He-Ne</i>)	$10 < \tau < 10^4$	$P = 3 \cdot 10^{-7} \text{ W}$ $E = 3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
II.	514,5 (<i>argon</i>) 630 (<i>He-Ne</i>)	$t > 2,5 \cdot 10^{-1}$ kontinuál.	$P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ $P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
III.a	630 (<i>He-Ne</i>)	kontinuál.	$1 \cdot 10^{-3} < P < 5 \cdot 10^{-3}$
III.b	530 (<i>Nd:YAG, 2harm.</i>)	$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 0,6 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$
	694 (<i>rubín</i>)	$1 \cdot 10^{-3}$	$E = 1,2 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$
1060 (<i>Nd:YAG</i>)	$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 2 \text{ J}$	
	$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 1 \cdot 10^{-1} \text{ J}$	
IV.	vše nad výše uvedené hodnoty pro III.b třídy		

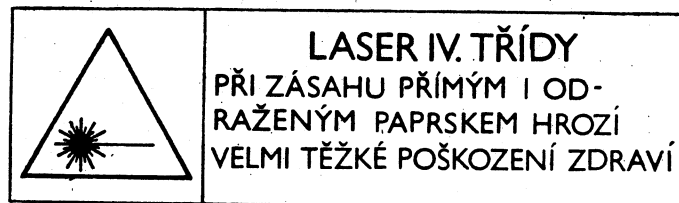
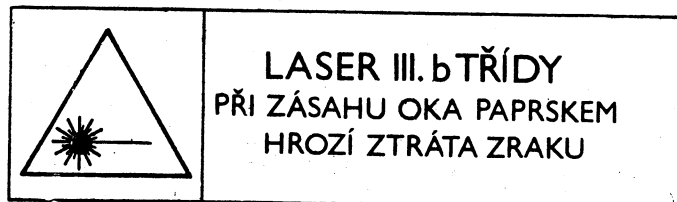
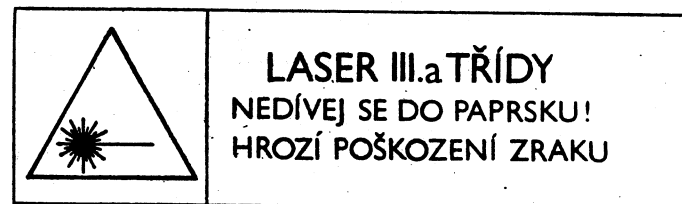
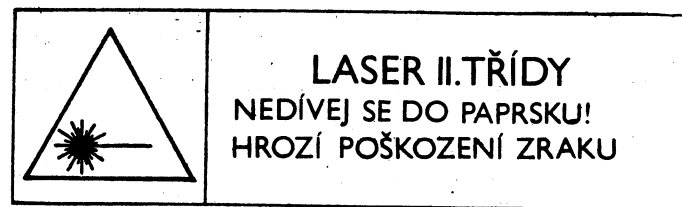
Výstražné tabulky pro označení prostorů, ve kterých se používají lasery II. až IV. třídy, jsou uvedeny na obr. 15.4. Příkladů štítků pro lasery II. až IV. třídy jsou uvedeny na obr. 15.5.



Obr. 15.3: Výstražná tabulka pro označení prostorů, ve kterých se používají lasery II. a III.a třídy



Obr. 15.4: Výstražná tabulka pro označení prostorů, ve kterých se používají lasery III.b a IV. třídy



Obr. 15.5: Příklad štítků pro lasery II. až IV. třídy

Literatura

- [1] O. Svelto: *Principles of lasers*. Plenum Press, New York, 1982.
- [2] *Spravočník po lazeram v dvuch tomach*. Sovjetskoje radio, Moskva, 1978.
- [3] *Fizičeskij enciklopedičeskij slovar*. Sovetskaja enciklopedija, Moskva, 1983.
- [4] J. Blabla, V. Trkal, T. Šimeček: *Kvantové generátory*. SNTL, Praha, 1968.
- [5] M. Born, E. Wolf: *Osnovy optiky*. Nauka, Moskva, 1973.
- [6] J. Kvasnica: *Teorie elektromagnetického pole*. Academia, Praha, 1985.
- [7] B. Kvasil: *Teoretické základy kvantové elektroniky*. Academia, Praha, 1983.
- [8] F.H. Read: *Electromagnetic Radiation*. John Wiley and Sons, Chichester, 1980.
- [9] B. Havelka: *Geometrická optika I, II*. SAV, Praha, 1955, 1956.
- [10] B. Kvasil: *Teorie otevřených rezonátorů*. Academia, Praha, 1971.
- [11] J. Peřina: *Teorie koherence*. SNTL, Praha, 1975.
- [12] J. Skála M. Chvojka: *Malý slovník jednotek měření*. Mladá fronta, Praha, 1982.