

Miroslava Vrbová
Helena Jelínková
Petr Gavrilov

ÚVOD DO LASEROVÉ TECHNIKY

1998
Vydavatelství ČVUT

Obsah

1	Laserová technika	11
2	Světlo jako elektromagnetické záření	15
2.1	Rovinná elektromagnetická vlna	15
2.2	Kulová elektromagnetická vlna	18
2.3	Polarizace elektromagnetické vlny	19
2.4	Objemová hustota energie	20
2.5	Plošná hustota výkonu elektromagnetické vlny	21
2.6	Impuls optického záření	22
2.7	Princip superpozice elektromagnetických vln	23
2.8	Pole dvou elektromagnetických vln	24
2.8.1	Vlny různých frekvencí, stejné polarizace, šířící se ve stejném směru	24
2.8.2	Vlny stejných frekvencí, stejné polarizace, šířící se v různých směrech	25
2.8.3	Superpozice vln před zrcadlem	26
2.9	Fabryův-Perotův rezonátor	28
2.9.1	Superpozice vln ve Fabryově-Perotově rezonátoru	28
2.9.2	Odrazivost a propustnost Fabryova-Perotova rezonátoru	31
2.10	Optický rezonátor	33
2.10.1	Otevřený rezonátor	34
2.10.2	Sférické otevřené rezonátory	35
2.11	Druhy elektromagnetického záření	37

2.11.1	Spektrum elektromagnetického záření	38
2.12	Koherence optického záření	41
2.13	Měřitelné veličiny optických polí	42
2.13.1	Radiometrické veličiny a jednotky	42
2.13.2	Fotometrické veličiny a jednotky	43
3	Látka jako soubor kvantových soustav	47
3.1	Kvantová soustava	47
3.2	Soubor kvantových soustav, populace hladin	48
3.2.1	Populace hladin při termodynamické rovnováze	49
3.2.2	Inverze populace a záporná teplota	52
3.3	Kvantové přechody	53
3.3.1	Pravděpodobnost kvantového přechodu	54
3.3.2	Šířka energetické hladiny	54
3.3.3	Buzení kvantových soustav	55
3.3.4	Relaxace v souboru kvantových soustav	55
4	Interakce optického záření s látkou	59
4.1	Elementární procesy absorpce a emise	59
4.2	Absorpční a emisní spektrum látky	61
4.3	Rovnovážné záření	62
4.3.1	Pravděpodobnostní rozdělení počtu fotonů	62
4.3.2	Střední hodnota energie	63
4.3.3	Spektrální hustota počtu elektromagnetických vln	64
4.3.4	Spektrální hustota energie	64
4.4	Einsteinovy součinitelé (koeficienty)	65
5	Detekce optického záření	69
5.1	Základní parametry optických detektorů	70
5.1.1	Detektivita	70
5.1.2	Konverzní účinnost	70

5.1.3	Časová odezva	71
5.1.4	Spektrální charakteristika	71
5.2	Tepelné detektory	72
5.2.1	Kalorimetr	73
5.2.2	Termočlánek	73
5.2.3	Bolometr	74
5.2.4	Termistor	74
5.2.5	Pyroelektrický detektor	75
5.3	Fotoelektrické detektory	75
5.3.1	Fotovodivostní detektor	76
5.3.2	Fotokatoda	77
5.3.3	Vakuová fotodioda	77
5.3.4	Polovodičová fotodioda	77
5.3.5	Lavinový detektor	78
5.4	Fotočlánky	78
5.5	Fotochemické detektory	79
5.5.1	Fotografická emulze	79
5.6	Lidské oko	79
6	Klasické zdroje optického záření	81
6.1	Záření rovnovážných zdrojů	82
6.1.1	Černé těleso	82
6.1.2	Záření Slunce	82
6.1.3	Žárovka	82
6.2	Záření nerovnovážných zdrojů	83
6.2.1	Luminiscence	83
6.2.2	Výbojka	85
7	Laser	87
7.1	Popis zesilování v aktivním prostředí	88

7.2	Aktivní prostředí v optickém rezonátoru	90
7.2.1	Práh generace	90
7.2.2	Saturace zesílení	92
7.2.3	Výstupní výkon	94
7.2.4	Výstupní energie	95
7.2.5	Spektrum laserového záření	96
7.3	Kontinuální, impulsní a pulsní režim laseru	99
8	Klasifikace laserů	103
9	Pevnolátkové lasery	107
9.1	Aktivní prostředí pevnolátkových laserů	108
9.1.1	Matrice	108
9.1.2	Aktivátor	110
9.1.3	Výroba aktivních materiálů	113
9.2	Laserový systém	114
9.2.1	Hlavice laseru	114
9.2.2	Zdrojová část laseru	116
9.2.3	Chladicí část laseru	118
9.3	Vybrané pevnolátkové lasery	119
9.3.1	Rubínový laser	119
9.3.2	Neodymový laser	123
9.3.3	<i>Nd</i> :YAG laser	125
9.3.4	<i>Nd</i> :YLF laser	127
9.3.5	Alexandrit	128
9.3.6	<i>Ho</i> /CTH:YAG	131
9.3.7	<i>Er</i> :YAG	134
10	Kapalinové lasery	137
10.1	Aktivní prostředí	137
10.2	Buzení barvivových laserů	139

10.2.1	Koherentní buzení barvivových laserů	139
10.2.2	Nekoherentní buzení barvivových laserů	141
10.3	Využití barvivových laserů	142
11	Plynové lasery	143
11.1	Atomární lasery	145
11.1.1	Helium-neonový laser	145
11.1.2	Měděný laser	147
11.1.3	Jodový laser	149
11.2	Iontové lasery	150
11.2.1	Argonový laser	150
11.2.2	Helium-kadmiový laser	151
11.3	Molekulární lasery	152
11.3.1	Vodíkový laser	153
11.3.2	Dusíkový laser	154
11.3.3	Excimerové lasery	154
11.3.4	<i>CO</i> ₂ laser	157
11.3.5	<i>CO</i> laser	162
11.4	Zvláštní metody buzení plynových laserů	163
11.4.1	Příčně buzené lasery (TE lasery)	163
11.4.2	Fotodisociační lasery	164
11.4.3	Chemické lasery	165
11.4.4	Plynově dynamické lasery	168
11.4.5	Opticky buzené plynové lasery	170
12	Plazmatické lasery	173
13	Polovodičové lasery	175
13.1	Spektrum energií atomů v krystalech	175
13.2	Polovodiče	176
13.2.1	Příměsové polovodiče typu P a N	178

13.3	Laserná činnost	180
13.3.1	Polovodičový laser buzený svazkem elektronů	183
13.3.2	Injekční polovodičové lasery	185
14	Aplikace laserů	187
14.1	Lasery v medicíně	187
14.2	Laserné technologie	189
14.2.1	Laserné svářování	191
14.2.2	Laserné vrtání	191
14.2.3	Laserné řezání	192
14.2.4	Dekorace skla laserem	193
14.2.5	Laserné značkování	193
14.2.6	Laserné kalení	194
14.3	Laser v mikroelektronice	194
14.3.1	Laserné doladování	195
14.3.2	Laserné rýhování	196
14.3.3	Laserné žíhání	196
14.3.4	Laserná litografie	197
14.4	Laser v astronomii, geodézii a geofyzice	197
14.4.1	Laserný radar v ekologii	199
14.5	Laser ve výzkumu termojaderné syntézy	199
14.6	Laser ve výpočetní technice	201
14.7	Laserná spektroskopie	202
14.8	Laserná separace izotopů	204
15	Bezpečnost práce s lasery	205
15.1	Biologické efekty laserného záření	205
15.2	Zajištění bezpečnosti při práci s lasery	209

Předmluva

Laser inter eximia naturae dona numeratim plurimis compositionibus inseritur.
(Laser jeden z nejzácnějších darů přírody mající rozmanité použití.)

Plinius St.: Naturalis Historia XXII, 49 (1.stol.n.l.)

Ještě na počátku našeho letopočtu rostla na území dnešní Libye velmi vzácná a proslavená rostlina, kterou Římané nazývali laser nebo Laserpitium. Díky jejím zázračným vlastnostem ji považovali za božský dar. Používali ji k léčení řady nemocí, při uštknutí hadem nebo škorpiónem, při zranění otráveným šípem. Používali ji též jako koření v nejlepší kuchyni, neboť měla velmi výraznou chuť. S velkým úspěchem byla vyvážena do Řecka i Říma. Římané se ji pokoušeli pěstovat ve své zemi, ale bez úspěchu. Asi ve druhém století však tato rostlina prý zcela vymizela [1].

Naše doba pak slovo laser odvodila jako zkratku (první písmena anglického názvu) pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla pomocí stimulované emise záření) a používá je k označení novodobého zdroje optického záření založeného na principu stimulované emise. První laser (*rubínový*) byl sestaven Američanem T.H.Maimanem, který jej poprvé uvedl v činnost 15. května 1960. Dodatečně se ukázalo, že optické záření vysílané laserem se výrazně liší od záření vysílaného jinými zdroji (žárovkou, výbojkou, sluncem). Takže i o našem „novodobém“ laseru je možné prohlásit, že má svou zvláštní „výraznou chuť“. Během následujících třiceti let bylo objeveno a odzkoušeno také mnohé „rozmanité použití“.

Tato publikace má sloužit především jako učebnice ke stejnojmennému kurzu pro posluchače prvního ročníku Bakalářského studia v oboru Laserná technika a optoelektronika, tedy v kurzu základním, nepředpokládajícím u čtenáře znalost vyšší matematiky a vysokoškolské fyziky. Výklad je založen na fyzikální představě o optickém záření, jeho interakci s látkou a je zaměřen zejména na fyzikální podstatu činnosti laserů, a na popis některých technických prvků potřebných pro jeho realizaci. Jsou shrnuty základní parametry a konstrukční fakta o různých typech laserů. Závěrem jsou popsány některé

aplikace laserů v různých oborech lidské činnosti. Je uveden výtah z normy o bezpečnosti při práci s lasery. Publikace je vhodná i pro nespecialisty, zejm. pro nové uživatele laserů, kteří se chtějí samostatným studiem s laserovou technikou seznámit.

Autoři skript při přípravě textu těsně spolupracovali, nicméně zodpovědnost si rozdělili takto. M.Vrbová – kap.: 1 až 7 a 11 až 12, H.Jelínková – kap.: 8 až 10, 13 až 15; P.Gavrilov připravil texty příkladů ke všem kapitolám.

V tomto druhém vydání byly opraveny některé tiskové chyby, částečně byla přepracována kapitola 7 a opravena některá zadání příkladů. Několik příkladů bylo vypuštěno (číslování příkladů bylo zachováno).

Kapitola 1

Laserová technika

Laserová technika je vědní obor, který vysvětluje principy činnosti různých typů laserů, zabývá se konstrukčním řešením laserů, měřicími metodami pro diagnostiku laserového svazku a principy i technickými aspekty použití laserů v různých oblastech lidské činnosti [2].

Laserová technika bývá různými autory považována za součást vědních oborů *kvantová elektronika*, *optoelektronika* nebo *fotonika*. Uvádíme proto obecně přijímané definice těchto oborů [3]:

1. *Kvantová elektronika* je vědní obor zabývající se vzájemným působením (interakcí) elektromagnetického záření s vázanými elektrony (tj. elektrony, které jsou součástmi atomů, iontů, molekul apod.) a jeho praktickým využitím např. pro zesilování, generaci a detekci elektromagnetického záření [4]. Vnitřní energie vázaných soustav (atomů, iontů) jsou kvantovány a výměna energie mezi elektromagnetickým zářením a látkou se děje po kvantech, z čehož plyne označení *kvantová elektronika* (jako zvláštní oddíl elektroniky).

Pro srovnání uvedme, že klasická *elektronika* se zabývá interakcí elektromagnetického záření s elektrony (zprav. volnými nebo vodivostními), jímž odpovídá spojité spektrum energií a kvantové efekty se při výměně energie neprojeví.

Předmětem zájmu kvantové elektroniky je jednak pochopení principů

působení elektromagnetického pole na kvantové soustavy, jednak praktické využití této interakce v různých metodických postupech a při konstrukci zařízení. Prvním přístrojem, založeným na principech kvantové elektroniky, byl molekulární (čpavkový) generátor (kvantový generátor) mikrovlnného záření (maser — zkratka pro Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) realizovaný v r.1955. Laser byl až dalším v řadě kvantových generátorů. Princip jeho činnosti je stejný jako u maseru. Vnitřní energie molekul se v kvantovém generátoru přeměňuje na energii elektromagnetického záření. Laser se od maseru liší frekvencí vysílaného záření, která spadá do oblasti optického pásma. Laser byl proto v době svého objevení nazýván optickým maserem nebo *optickým kvantovým generátorem*.

2. *Optoelektronika* je obor zabývající se generováním, přenosem a detekcí optického záření a jeho využitím, zejm. pro přenos a zpracování signálů. Do optoelektroniky se zahrnuje zpravidla teoretický popis i konstrukční řešení a technologie výroby luminiscenčních diod, polovodičových laserů, optických detektorů a optických vláken a to včetně elektronických obvodů pro jejich napájení, ovládání a zpracování signálů. Za součást optoelektroniky bývá dále považována planární vlnovodná optika a integrovaná optika. K hlavním oblastem využití optoelektroniky patří, kromě sdělování a optického zpracování signálů, také oblast optických senzorů.
3. *Fotonika* je vědní obor, zabývající se vlastnostmi a metodami využití optického záření, zejm. metodami generace, detekce, a také přeměnami optického záření na jiné formy energie. Kvantový charakter interakce optického záření s látkou vede k představě, že svazek optického záření je vlastně tokem fotonů. Slovo fotonika bylo přijato jako paralela k označení oboru elektronika (definovaného jako obor zabývající se metodami řízení toku elektronů v různých prostředích a strukturách), neboť fotony v optických zařízeních přebírají úlohu elektronů v elektronických zařízeních.

Teoretickým základem laserové techniky je popis elektromagnetického záření (*teorie elektromagnetického pole*) [5][6], kvantový popis látky složené z mnoha atomů, iontů, molekul apod. (tj. *kvantová mechanika, kvantová statistika*) a popis vzájemného působení (interakce) elektromagnetického záření a látky (kvantová elektrodynamika) [7]. Všechny zmíněné disciplíny jsou teoreticky poměrně náročné. V následujících třech kapitolách těchto skript shrnujeme jisté minimální množství poznatků z daných oborů, potřebných pro vysvětlení principů činnosti laserů a principů aplikací laserů v takovém pojetí, aby byly srozumitelné čtenáři se středoškolským vzděláním.

Historický přehled vývoje laseru

Historie laseru začíná v roce 1917, kdy Albert Einstein ukázal, že kromě jevů jako jsou spontánní emise a absorpce, musí existovat ještě další jev a to stimulovaná emise. Ruský fyzik V.A.Fabrikant pak v roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Přišel na podmínku vytvoření inverze populace energetických hladin mikrosystémů. Později (v r.1951), spolu s M.M.Vudynským a F.A.Butajevovou přihlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření (ultrafialového, viditelného, infračerveného a pásma radiových vln) tím způsobem, že záření prochází prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážený stav. Stav takového charakteru, že je preferováno obsazení horních energetických stavů atomů, popř. jiných kvantových soustav. Stimulovaná emise byla poprvé využita pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 moskevští fyzikové N.G.Basov a A.M.Prochorov na konferenci o Radiospektroskopii referovali o molekulárním svazkovém generátoru – MASERu pracujícím se svazkem molekulárního čpavku.

Prakticky současně byla vyjádřena myšlenka použití stimulované emise k zesílení a generaci milimetrových vln americkým fyzikem C.H.Townesem. V roce 1954 byl sestaven první takový molekulární generátor. Realizace maseru (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) dala vznik novému vědnímu oboru – kvantové elektronice. Basov, Prochorov a Townes dostali společně za vynález maseru Nobelovu cenu v r. 1964.

Mezi realizací prvního maseru a prvního laseru uplynulo šest let. V uvedeném období se intenzivně hledaly:

1. rezonátor pro vlnové délky z optické oblasti spektra, (neboť dutinový rezonátor pro cm a mm vlnové délky měl cm a mm rozměry a pro vlnové délky v okolí μm by měl mít rezonátor mikronové rozměry, což je ztěžující skutečností)

2. metody realizující inverzní populaci hladin na kvantových přechodech v optické optické oblasti.

V roce 1955 N.G.Basov a A.M.Prochorov navrhli optické buzení a prostředek pro dosažení inverze populace. V roce 1957 pak N.G.Basov uvažoval o využití polovodičových materiálů pro kvantové oscilátory a realizoval optický rezonátor leštěnými planparalelními stěnami na polovodičovém čipu. V témže roce Fabrikant a Butajeva pozorovali zesílení optického záření v experimentu s elektrickým výbojem procházejícím směsí par rtuti, vodíku a helia. V roce 1958 A.M.Prochorov, A.Schawlow a C.Townes vyslovili nezávisle na sobě ideu, že jev stimulované emise, užitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra. R.H.Dicke (Princeton University) navrhl použití otevřeného rezonátoru pro realizaci kladné zpětné vazby v optické oblasti.

V roce 1960 Theodore Maiman publikoval článek o generaci záření ve viditelné oblasti spektra v rubínové tyči. Byl vynalezen rubínový laser. V témže roce (1960) A.Javan, W.R.Bennett a D.R. Herriott demonstrovali laserovou akci ve směsi plynů helia a neonu buzených elektrickým výbojem. Od roku 1961 začal bouřlivý vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologií. První polovodičový laser byl sestaven v r.1962. Dnes jsou známy tisíce laserových aktivních prostředí.

Kapitola 2

Světlo jako elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je jednou z forem přenosu energie prostorem. Energie od Slunce, energie v pečící mikrovlnné troubě, rentgenové záření při lékařském vyšetření nebo vyzařované teplo krbu, to všechno jsou příklady přenosu energie *elektromagnetickým zářením*. I když se tyto formy zářivé energie zdají být rozdílné, vykazují všechny stejnou vlnovou podstatu a přenos energie ve vakuu se děje stejnou rychlostí – rychlostí světla.

Elektromagnetické záření je možné si představit jako jisté zvláštní prostorčasové rozložení elektrického a magnetického pole. Ve volném prostoru (obecněji v každém lineárním prostředí) může být elektromagn. záření považováno za *superpozici* (složení) mnoha elektromagnetických vln. Nejjednodušším příkladem elektromagnetické vlny je tzv. rovinná vlna.

2.1 Rovinná elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna představuje navzájem svázané periodické kmity elektrického a magnetického pole [8][5]. Šíření energie prostorem probíhá jako postupné přelévání energie od magnetického k elektrickému poli a naopak. Ve volném prostoru se šíří tzv. rychlostí světla $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$, která je jednou z univerzálních fyzikálních konstant.

Ze všech elektromagnetických vln je pak nejjednodušším modelem li-