

Praktický průvodce

LASEROVOU TECHNOLOGIÍ

Petr Hauschwitz
a kolektiv



PŘÍRUČKA LASERMANA

Praktický průvodce
**LASEROVOU
TECHNOLOGIÍ**

Petr Hauschwitz a kolektiv



**PŘÍRUČKA
LASERMANA**

Grada Publishing

Petr Hauschwitz a kolektiv

Bc. Adam Čala

Ing. Adam Čermák, Ph.D.

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA

Ing. Vojtěch Jelen

Ing. Jan Kaufman, Ph.D.

Ing. Jiří Krutina

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D., IWE

RNDr. Jan Pala, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Pořízka, Ph.D.

Ing. Tomáš Primus, Ph.D.

Jan Řeřucha

Mgr. Helena Vohníková

Praktický průvodce laserovou technologií

Příručka Lasermana

Vydala Grada Publishing, a. s.

U Průhonu 22, Praha 7

obchod@grada.cz, www.grada.cz

tel.: +420 234 264 401

jako svou 9802. publikaci

Odpovědný redaktor Petr Somogyi

Grafická úprava a sazba Jaroslav Kolman

Počet stran 320

První vydání, Praha 2024

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

© Grada Publishing, a. s., 2024

Cover Photo © Depositphotos/cookelma, Pixel_B, jukai5

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele.

Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

Automatizovaná analýza textů nebo dat ve smyslu čl. 4 směrnice 2019/790/EU

a použití této knihy k trénování AI jsou bez souhlasu nositele práv zakázány.

ISBN 978–80–271–7645–8 (ePub)

ISBN 978–80–271–7644–1 (pdf)

ISBN 978–80–271–5410–4 (print)

Obsah

Úvodní slovo	9
Poděkování	10

Část I – Základy laserové technologie 11

1	Co je to laser	13
1.1	Stručná historie laseru v českých zemích	14
2	Jak laser funguje – základní pohled kvantové mechaniky	16
3	Otevřený rezonátor	19
4	Gaussovský svazek	22
5	Režimy generace laseru	26
5.1	Volně běžící režim	26
5.2	Q-spínání	27
5.3	Synchronizace módů (mode-locking)	29
6	Generace ultrakrátkých pulzů	32
7	Generace nových vlnových délek	35
7.1	Generace vyšších harmonických frekvencí	36
7.2	Optická parametrická generace (OPG)	37
8	Druhy laserů	38
8.1	Pevnolátkové lasery	38
8.2	Plynové lasery	43
8.3	Polovodičové lasery	45
9	Základy teorie pro laserové aplikace	48
9.1	Základní principy interakce svazku s materiálem	48
9.2	Absorpce	50
9.3	Délka pulzu a ablace	52
9.4	Opakovací frekvence	55
9.5	Polarizace	56
9.6	Koherence	57
9.7	Výkon	58
10	Procesní parametry	59
10.1	Průměr svazku a hloubka ostrosti	59
10.2	Fluence, intenzita	60
10.3	Rozmítání svazku a synchronizace v laserových aplikacích	61
10.4	Překryv, rychlost pohybu svazku, akumulovaná fluence	63
10.5	Počet přejezdů	64
10.6	Tvar pulzu a rozložení intenzity	64

11	Mikroobrábění	69
11.1	Úvod	69
11.2	Laserový zdroj	69
11.3	Laserový stroj	74
11.4	Možnosti technologie	79
11.5	Příručka mikroobrábění	84
11.6	Využití v průmyslu	89
11.7	Shrnutí pro Lasermana	90
12	Funkcionalizace povrchů	91
12.1	Úvod	91
12.2	Laserový zdroj	92
12.3	Možnosti technologie	93
12.4	Příručka funkcionalizace	95
12.5	Shrnutí pro Lasermana	106
13	Laserové gravírování	107
13.1	Úvod	107
13.2	Obecná charakteristika laserového gravírování	108
13.3	Hloubka ablace	111
13.4	Vliv hloubky ablace na detail gravírovaného tvaru	113
13.5	Optimalizace úběru pro technologii laserového gravírování	114
13.6	Strategie rozmítání	116
13.7	Specifika technologie	117
13.8	Porovnání laserového gravírování s konvenčním třískovým mikroobráběním	119
13.9	Shrnutí pro Lasermana	120
14	Laserové vrtání	122
14.1	Úvod	122
14.2	Mechanismus tvorby otvoru laserovým vrtáním	123
14.3	Základní rozdělení laserového vrtání podle technologického hlediska	124
14.4	Vrtání bez pohybu laserového svazku	125
14.5	Vrtání s pohyblivým laserovým svazkem	126
14.6	Porovnání technologií vrtání z hlediska přesnosti	127
14.7	Technologické aspekty ovlivňující přesnost, velikost a tvar otvorů	128
14.8	Porovnání laserového vrtání s ostatními technologiemi	134
14.9	Shrnutí pro Lasermana	134
15	Laserové řezání	137
15.1	Úvod	137
15.2	Laserový zdroj a procesní optika	138
15.3	Laserové stroje	142
15.4	Proces laserového řezání	144
15.5	Základní pojmy spojené s procesem laserového řezání a jejich ovlivňující faktor	145
15.6	Parametrizace	154

15.7	Výběr častých problémů při laserovém řezání	161
15.8	Využití v průmyslu	163
15.9	Shrnutí pro Lasermana	164
16	Laserové značení	166
16.1	Laserové značení – základní přehled	166
16.2	Parametry laserového značení	167
16.3	Typy laserového značení a jejich vlastnosti	177
16.4	Praktická část: testování aplikace laserového značení	181
16.5	Shrnutí pro Lasermana	189
17	Laserové čištění	191
17.1	Úvod	191
17.2	Laserový zdroj	192
17.3	Laserový stroj	196
17.4	Možnosti technologie	198
17.5	Příručka laserového čištění	199
17.6	Využití v průmyslu	204
17.7	Shrnutí pro Lasermana	204
18	Laserové kalení	206
18.1	Úvod	206
18.2	Laserový zdroj	206
18.3	Laserový stroj	210
18.4	Možnosti technologie	211
18.5	Příručka laserového kalení	214
18.6	Příklady využití v průmyslu	219
18.7	Případové studie	219
18.8	Shrnutí pro Lasermana	221
19	Laserové svařování	223
19.1	Úvod	223
19.2	Laserový zdroj	224
19.3	Laserový stroj	226
19.4	Svařovací hlava	227
19.5	Možnosti technologie	229
19.6	Typy svarů	232
19.7	Základní parametry laserového svařování	233
19.8	Svařitelnost materiálů	234
19.9	Limity a omezení laserového svařování	235
19.10	Svarové vady	235
19.11	Obecný postup laserového svařování	238
19.12	Příklady využití v průmyslu	239
19.13	Shrnutí pro Lasermana	239
20	Laserové navařování a aditivní výroba z kovu	240
20.1	Úvod	240
20.2	Zařízení pro laserové navařování	241
20.3	Princip laserového navařování	242
20.4	Ostatní technologie navařování povrchů	243

20.5	Materiály pro navařování	247
20.6	Příručka laserového navařování	251
20.7	Příklady využití v průmyslu	254
20.8	Shrnutí pro Lasermana	255
21	Laserové vyklepávání (LSP)	258
21.1	Úvod	258
21.2	Mechanismus LSP	258
21.3	Laserový zdroj	260
21.4	Vliv laserových parametrů	261
21.5	Možnosti technologie	265
21.6	Aplikace	268
21.7	Příručka LSP	269
21.8	Využití v průmyslu	271
21.9	Shrnutí pro Lasermana	272
22	Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS)	274
22.1	Úvod	274
22.2	Laserový zdroj	275
22.3	Laserový stroj	279
22.4	Možnosti technologie	281
22.5	Příručka technologie LIBS	283
22.6	Využití v aplikacích	288
22.7	Shrnutí pro Lasermana	289
23	Počítačové simulace a jejich využití	292
23.1	Úvod	292
23.2	Počítačové simulace v laserových aplikacích	293
23.3	Počítačové simulace optických soustav	294
23.4	Využití simulací u laserového svařování	300
23.5	Simulace a laserové technologie	303
23.6	Shrnutí pro Lasermana	304
24	Bezpečnost při práci s lasery	305
24.1	Úvod	305
24.2	Třída laseru	305
24.3	Zabudovaná laserová zařízení	307
24.4	Nebezpečí laserového záření	307
24.5	Bezpečná dávka ozáření (MPE)	308
24.6	Účinky světla na oči a kůži	309
24.7	Ochranná kontrolní opatření	310
24.8	Ochranné brýle	312
24.9	Ochranné bariéry	313
24.10	Související nebezpečí	315
24.11	Shrnutí pro Lasermana	316
	Medailony autorů	317
	Rejstřík	319

Úvodní slovo

Vážení čtenáři,

vítejte u knihy, kterou jsme nazvali *Příručka Lasermana* a která se má stát vaším společníkem na cestě k pochopení světa laserů. Naším záměrem bylo, aby tato kniha sloužila jako praktický průvodce laserovými technologiemi. Je navržena tak, aby byla přístupná začínajícím, inspirativní pro studenty a neocenitelná pro profesionály, kteří chtějí prohloubit své porozumění základním i pokročilým principům laserové technologie.

Za publikací stojí tým odborníků z akademického světa i ze světa průmyslu, kteří spojili své síly, aby vám přinesli bohatý soubor znalostí, zkušeností a praktických rad. Díky jejich expertize nabízí *Příručka Lasermana* jak pevný teoretický základ, tak praktické návody aplikovatelné přímo ve vašem povolání nebo při studiu.

Vědomě jsme se vyhnuli přílišné teorii a zaměřili se na praktické vysvětlení principů a aplikací laserové technologie. Nenajdete zde tedy složité rovnice ani detailní rozbory z kvantové fyziky. Naším cílem je, abyste po přečtení knihy měli jasnou představu o tom, jak laserové technologie fungují v praxi a jak je můžete efektivně využívat.

Příručka Lasermana vás povede od základů až po konkrétní aplikace přes všechny klíčové aspekty laserové technologie, poskytne vám potřebné znalosti a otevře dveře k dalšímu prohloubení vašich odborných kompetencí.

Pokračujte tedy ve čtení a nechte se vtáhnout do fascinujícího světa laserů. Jsme přesvědčeni, že tato kniha se pro vás stane cenným zdrojem informací a inspirací na cestě za pochopením a aplikací laserové technologie ve vašem profesním životě.

Vítejte v našem světě laserů – světě plném světla a inovací!

Poděkování

Rád bych na tomto místě vyjádřil hlubokou vděčnost všem spoluautorům, kteří k vytvoření této knihy přispěli svými cennými teoretickými poznatky a zejména praktickými zkušenostmi. Vaše odbornost a nasazení umožnily, aby se *Příručka Lasermana* stala komplexním zdrojem informací pro každého, kdo se chce dozvědět o světě laserové technologie něco více.

Speciální poděkování patří prof. Heleně Jelínkové a dr. Janu Šulcovi z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického, kteří si uprostřed svých náročných akademických povinností našli čas na to, abychom společně posunuli kapitulu o základech laserové technologie na ještě vyšší úroveň. Vaše odborné rady a připomínky byly neocenitelné a výrazně přispěly k obohacení obsahu této knihy.

Velký dík patří rovněž Centru HiLASE, jeho vedení a zaměstnancům, kteří mi umožnili se věnovat oblasti laserové technologie a jejích aplikací do průmyslu.

Zvláštní poděkování patří Majce Thunové, která mi pomohla s přípravou knihy k vydání. Její podpora a angažovanost byly pro úspěšné dokončení tohoto projektu klíčové.

Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří se na tvorbě knihy podíleli, ať už přímým příspěvkem, konzultacemi, nebo podporou v průběhu celého procesu. Vaše práce a odhodlání jsou důkazem toho, že spolupráce a sdílení znalostí mohou vést k výjimečným výsledkům.

Příručka Lasermana by bez naší společné práce a vašeho přínosu nikdy nevznikla. Děkuji vám za vaši neúnavnou podporu a za to, že jste se rozhodli být součástí tohoto projektu.

S hlubokým uznáním,

Petr Hauschwitz



Část I

Základy laserové technologie

1

Co je to laser

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

Zkratka LASER znamená *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což lze do češtiny přeložit jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Ale tato definice nám neříká celý příběh. Laser není pouze zesilovač, ale také generátor. Pokud se tedy pokusíme o výstižnější definici, můžeme laser charakterizovat jako **kvantový generátor koherentního záření, který je založený na jevu stimulované emise záření**.

Pokud bychom chtěli být ještě preciznější, můžeme tento koncept rozšířit a říci, že laser je kvantový generátor koherentního záření založený na jevu stimulované emise záření, který se vyznačuje následujícími vlastnostmi:

1. **Vysokou hustotou generovaného výkonu nebo energie.**
2. **Nízkou divergencí svazku: všechny fotony se pohybují stejným směrem.¹**
3. **Kontrolovaným spektrálním rozsahem generovaného záření: fotony jsou generovány v určitém kontrolovaném rozsahu frekvencí.²**
4. **Koherenci: fotony jsou ve fázi jak časově, tak prostorově.³**

Řečeno tedy jinými slovy, laser je **přístroj konstruovaný na principech kvantové mechaniky, který využívá stimulované emise pro generování záření s unikátními vlastnostmi**.

V tomto kontextu se setkáme s řadou klíčových pojmů, jako jsou koherence, stimulovaná emise záření, monochromaticnost, divergence a hustota výkonu. Všechny uvedené pojmy budeme na stránkách této knihy postupně vysvětlovat.

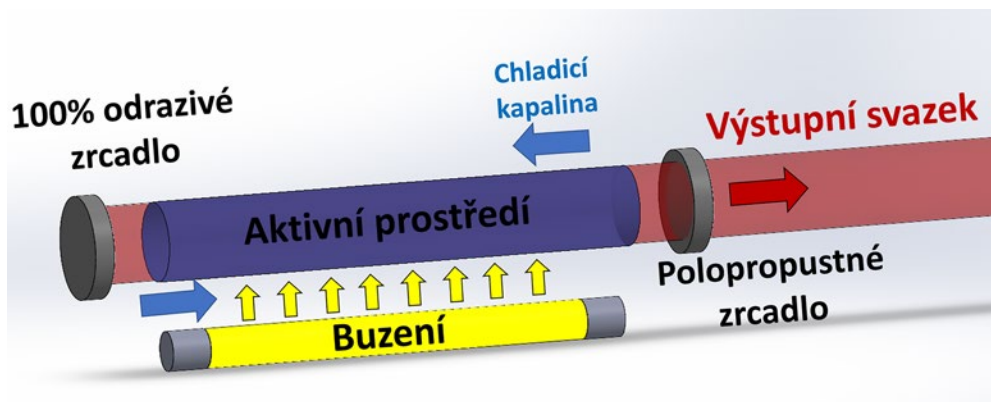
K základním prvkům laseru patří:

1. **Aktivní prostředí:** Systém kvantových soustav schopných pod vlivem budící energie přejít do excitovaného stavu a setrvat v něm dostatečně dlouhou dobu, aby mohlo dojít ke stimulované emisi.
2. **Buzení:** Zajišťuje přísun energie do aktivního prostředí, což vede k vzniku inverze populace hladin v aktivním prostředí. Jinými slovy: buzení zajišťuje, aby pravděpodobnost stimulované emise byla vyšší než absorpce.

¹ Zatímco nízká divergence svazku je charakteristickým rysem mnoha laserů, existují aplikace, kde jsou vyžadovány laserové diody s vyšší divergencí.

² Tradiční definice laseru klade důraz na monochromaticnost, tedy generování záření s jednou specifickou vlnovou délkou. V moderních aplikacích však najdeme lasery s širším spektrálním výstupem. Místo striktní monochromaticnosti je tak vhodnější hovořit o „úzkém spektrálním pásmu“ nebo „kontrolovaném spektrálním rozsahu“. Odráží to schopnost laserů generovat světlo v určitém rozsahu vlnových délek, což je zásadní pro generování ultrakrátkých pulzů nebo pro superkontinuální lasery.

³ S rostoucím spektrálním rozsahem se časová koherence snižuje.



Obr. 1.1: Schematické znázornění základních prvků laseru

3. **Laserový rezonátor:** Zajišťuje kladnou zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím, což vede ke vzniku laserových oscilací. Rezonátor je obvykle tvořen soustavou minimálně dvou zrcadel – jedno z nich je vysoce odrazné a druhé částečně propustné.
4. **Chlazení:** Nezbytná součást pro odvod přebytečného tepla a zajištění stabilních podmínek pro inverzi populace.

1.1 Stručná historie laseru v českých zemích

Laserová technologie má své kořeny v teoretických pracích Alberta Einsteina, který v roce 1917 představil koncept stimulované emise záření. Až o několik desetiletí později, v roce 1960, sestrojil Theodor Maiman úspěšně první rubínový laser, který představoval průlom v oblasti laserových technologií. O tři roky později, v roce 1963, se Česká republika – tehdy Československo – stala třetí zemí na světě (po USA a SSSR), které se podařilo sestrojit vlastní laserový systém. V průběhu roku 1963 bylo v Československu zprovozněno několik různých laserových systémů:

- Karel Pátek (únor 1963): laser s neodymovým sklem (Nd:Sklo).
- Jan Blabla a Alena Jelínková (únor 1963): první československý rubínový laser.
- J. Pachman (březen 1963): rubínový laser.
- Tomislav Šimeček (říjen 1963): první československý polovodičový laser.
- František Petrů (1963): první československý plynový laser (He-Ne).

Díky těmto počátečním úspěchům se tehdejší Československo stalo důležitým hráčem v oblasti laserových technologií.

Jakmile byly položeny základy laserové technologie, začaly československé výzkumné týmy a lékaři zkoumat možnosti jejího využití v medicíně:

- Oftalmologie (1963): Dr. Otakar Procházka z Fakultní nemocnice Motol v Praze poprvé použil rubínový laser na sítnici oka. Cílem bylo léčit retinální defekty, jako je například diabetická retinopatie. Tato technika se stala základem moderní laserové terapie sítnice.

- Dermatologie (1964): Dr. Karel Pátek z Fyzikálního ústavu Československé akademie věd experimentoval s použitím Nd:sklo laseru pro léčbu kůže, například pro odstranění bradavic a jiných kožních lézí.
- Chirurgie (1965): Dr. Jan Blabla z Ústavu přístrojové techniky Československé akademie věd provedl první laserovou operaci – resekci nádoru v plicích pacienta. Použil CO₂ laser, který se později stal jedním z nejrozšířenějších laserů používaných v chirurgii.
- Onkologie (1968): Dr. Alena Jelínková z Fakultní nemocnice Motol zahájila první klinické zkoušky fotodynamické terapie (PDT) s použitím laserů. Tato metoda kombinuje laserové záření a fotosenzitivní látky k léčbě nádorů.

Tyto průkopnické aplikace položily základ pro současnou širokou škálu laserových léčebných metod v medicíně v České republice, které zahrnují chirurgii, dermatologii, oftalmologii, urologii, neurochirurgii, onkologii, estetickou medicínu, neurochirurgii a mnoho dalších oborů.

2

Jak laser funguje – základní pohled kvantové mechaniky

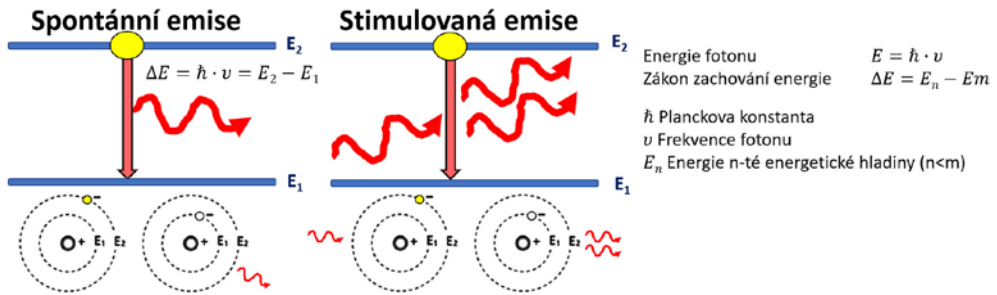
Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

Atomy⁴ jsou základní stavební jednotky látkové hmoty. Tvoří kvantové soustavy, které se skládají z vázaných elektronů, protonů a neutronů. Významnou roli zde hraje kvantová teorie, která poskytuje důležité poznatky o izolovaných kvantových soustavách. Z té vyplývá:

- Izolované soustavě, která je ve stacionárním stavu, přísluší přesně definovaná vnitřní energie.
- Tato energie je kvantována – nabývá pouze diskrétních hodnot ($E_i = 0, 1, 2, \dots$).⁵
- Energetické hladině s nejnižší energií E_0 říkáme **klidová**, ostatním **excitované**. Energie, při které dojde k rozpadu soustavy, se nazývá **disociační**.
- Pokud si kvantová soustava vyměňuje energii s okolím, musí se tato přijatá nebo odevzdaná energie rovnat rozdílu mezi energetickými hladinami počátečního a koncového stacionárního stavu kvantové soustavy. Toto je v souladu se zákonem zachování energie. Změna jednoho stacionárního stavu kvantové soustavy na jiný se označuje jako **kvantový přechod**. Pokud soustava energii vydává, jedná se o **emisi**, pokud naopak energii přijímá, hovoříme o **absorpci**.
- Přechody mezi energetickými hladinami mohou být nezářivé, kdy dochází k výměně kinetické energie například při srážce, nebo zářivé. Při zářivých přechodech kvantová soustava vyměňuje energii s okolím prostřednictvím elektromagnetického pole, tedy

⁴ Pro zjednodušení zde budeme jako atomy označovat i ionty a molekuly.

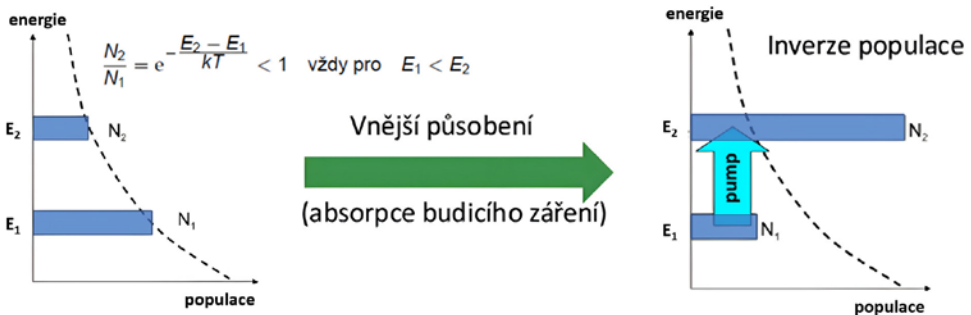
⁵ Pokud je soustava ve stavu s energií E_i , říkáme pro zjednodušení, že se nachází na i -té **energetické hladině**.



Obr. 2.1: Schematické znázornění procesu absorpce a spontánní emise

ve formě fotonů. Podle zákona zachování energie musí frekvence fotonu ν_{mn} přesně odpovídat rozdílu energie energetických hladin.⁶

- V látce složené z mnoha kvantových soustav se stejné kvantové soustavy mohou nacházet v různých stavech – na různých energetických hladinách. Počet kvantových soustav na i -té hladině se nazývá **populace i -té hladiny**.
- Pro látku (prostředí, hmotu) v termodynamické rovnováze platí, že rozdělení počtu soustav mezi jednotlivé energetické hladiny se řídí Boltzmanovým rozdělením, což znamená, že v termodynamické rovnováze je na vyšších energetických hladinách méně soustav než na těch nižších (viz obrázek 2.2).
- Pokud látce dodáme energii vnějším působením, například buzením (absorpce fotonu), může dojít k **inverzi populace**. Je to nerovnovážný stav, kdy je populace některé vyšší hladiny větší než populace hladiny s nižší energií.
- **Stimulovaná emise** záření je proces, při kterém **excitovaná** kvantová soustava vyzáří foton po interakci s vnějším **stimulujícím fotonem**. **Foton vzniklý stimulovanou emisí má stejné parametry jako budící foton** (směr šíření, fáze, frekvence, polarizace). Pro efektivní laserovou operaci je obvykle vyžadována **inverze populace**, která zajišťuje převahu stimulované emise nad absorpcí pro daný energetický přechod.

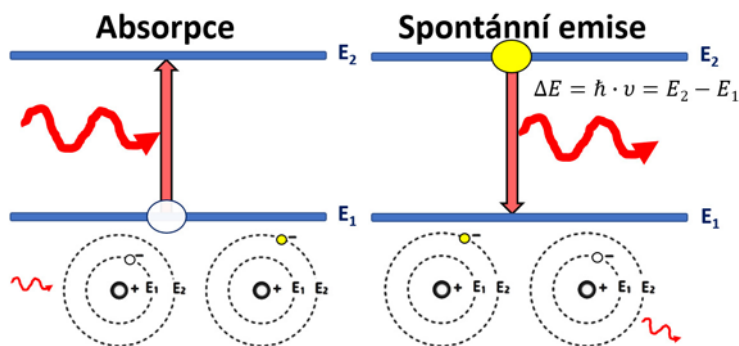


Obr. 2.2: Znázornění energetických hladin v základním a vybuzeném stavu

Podmínky pro stimulovanou emisi:

1. Inverze populace.
2. Horní metastabilní hladina.
3. Foton stimulujícího záření.

⁶ Energie fotonu se rovná jeho frekvenci v vynásobené Planckovou konstantou h .



Obr. 2.3: Schematické znázornění spontánní a stimulované emise

Z toho vyplývá, že pro generování laserového záření je potřeba vhodné prostředí, v němž budou excitované soustavy schopné setrvat na vyšších energetických hladinách dostatečně dlouhou dobu, aby je bylo možné „sklidit“ formou stimulované emise záření. Takovým hladinám se říká **metastabilní** nebo **horní laserové hladiny** a takové prostředí se označuje jako „aktivní“. Je jedním ze základních prvků laseru. Definovat jej můžeme následovně:

Aktivní prostředí je systém kvantových soustav schopných pod vlivem buzení přejít do excitovaného stavu a setrvat v něm dostatečně dlouhou dobu, aby bylo možné tuto energii uvolnit prostřednictvím stimulované emise záření.

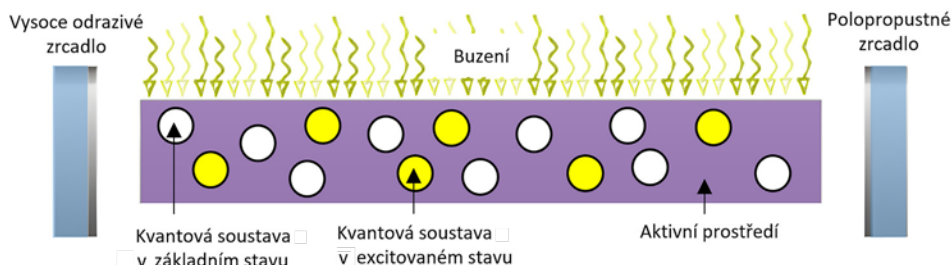
Dlouhodobé udržení inverze populace (termodynamicky nerovnovážný stav) zajišťuje **buzení a chlazení**. Kladnou zpětnou vazbu a vznik laserových oscilací pak zajišťuje **laserový rezonátor**.

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

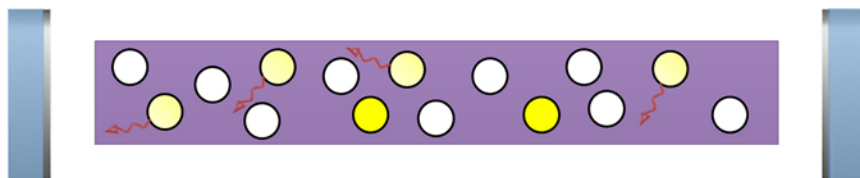
Otevřený rezonátor hraje v generování laserového záření klíčovou roli tím, že zajišťuje kladnou zpětnou vazbu a umožňuje vznik laserových oscilací. V nejjednodušší formě se jedná o soustavu dvou zrcadel – jedno je 100% odrazné, zatímco druhé je částečně propustné, což umožňuje vyvážení energie z rezonátoru.

Generaci laserového záření můžeme popsat následovně:

1. Budící záření excituje kvantové soustavy, ty přecházejí na vyšší energetickou hladinu.

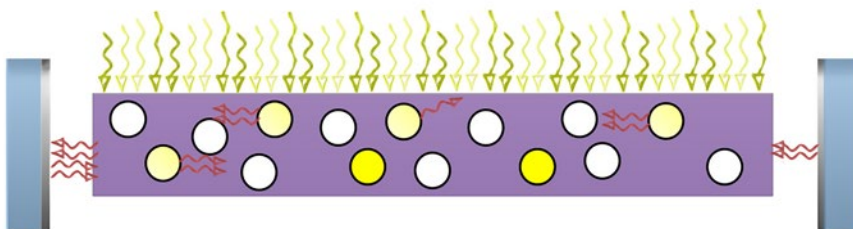


2. Kvantové soustavy na vyšších hladinách přecházejí zpět na základní hladinu s pomocí spontánní emise.

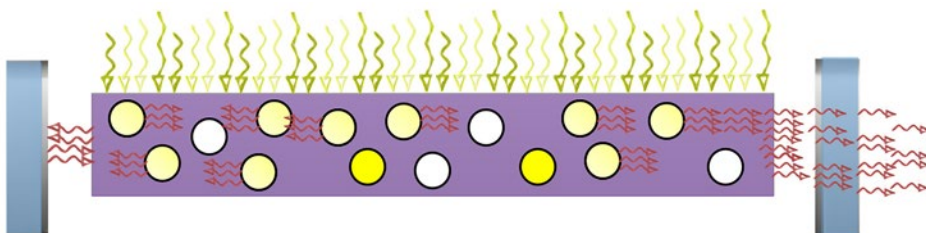


Obr. 3.1: Princip generace laserového záření (pokračování na další straně)

3. Fotony spontánní emise vybudí stimulovanou emisi a unikají z rezonátoru. Pouze záření, které je rovnoběžné s osou rezonátoru, může být zesilováno díky několikanásobným odrazům od zrcadel rezonátoru.



4. Dochází k lavinovitému nárůstu intenzity záření ve směru osy rezonátoru, část záření uniká z rezonátoru, část záření uniká z rezonátoru ven přes polopropustné zrcadlo – laser generuje záření.



Obr. 3.1: Princip generace laserového záření⁷

Pro generaci laserového záření je potřeba překonat tzv. **prahovou podmínku**: inverze populace musí být dostatečně vysoká na to, aby překonala všechny ztráty v rezonátoru (spontánní emise, difrakční a rozptylové ztráty rezonátoru, ztráty dané polopropustným zrcadlem). Nemůžeme tak například odvádět příliš mnoho energie polopropustným zrcadlem.

Laserový rezonátor může ovlivnit vlastnosti laserového záření, jako je:

- A. Divergence (rozbíhavost) svazku.
- B. Spektrální vlastnosti záření (módová struktura).
- C. Délka (dobu) pulzu.
- D. Polarizace.
- E. Míra koherence.

V rezonátoru může oscilovat pouze elektromagnetické vlnění, které splňuje určité podmínky pro fázi a frekvenci. Jednou z nich je, že fázový posuv, který elektromagnetická vlna získá za dvojnásobný průchod rezonátorem, musí být násobkem 2π :

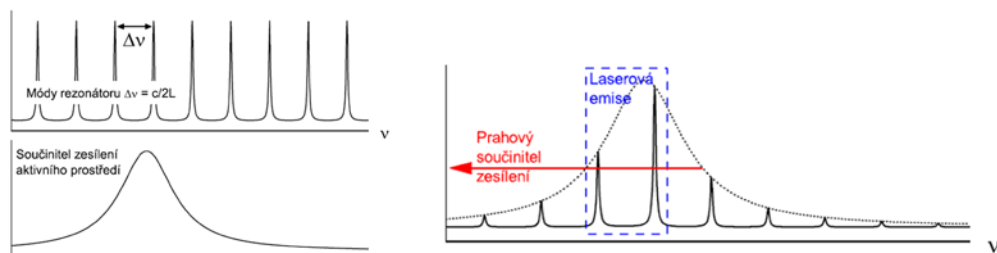
$$\omega = \omega_q = q \cdot 2\pi \cdot \frac{c}{2L}$$

kde:

ω – frekvence EM vlnění,
 q – celé číslo,
 c – rychlost světla,
 L – délka rezonátoru.

⁷ Jak se dozvíme dále v knize, buzení se nemusí vždy realizovat pouze pomocí záření.

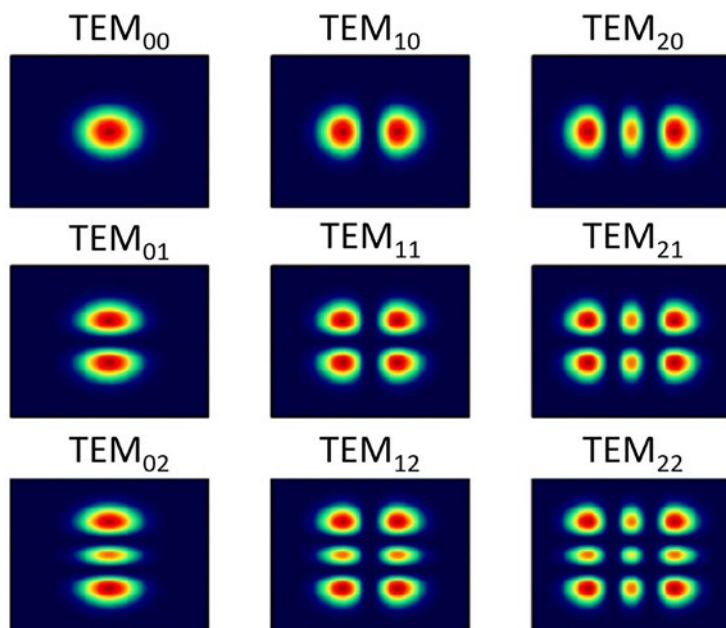
V praxi to znamená, že v rezonátoru oscilují pouze vlny o určitých frekvencích, které nazýváme **podélné módy otevřeného rezonátoru**. Frekvence sousedních podélných módů jsou od sebe odděleny konstantním frekvenčním intervalem, který závisí na délce rezonátoru.



Obr. 3.2: Frekvenční rozložení módů rezonátoru a součinitele zesílení aktivního prostředí [11]

Aktivní prostředí umožňuje zesilovat pouze určité spektrum frekvencí, což znamená, že zesíleny mohou být jen některé módy. Vhodnou konstrukcí rezonátoru⁸ je pak možné generovat jen jeden (žádoucí) mód – nejčastěji **gaussovský svazek**.

Kromě podélných módů existují také **příčné módy**. Ty představují ustálené konfigurace elektromagnetického pole v rezonátoru, které se po průchodu rezonátorem nemění. Znamená to, že rozložení intenzity v příčném směru se nemění. Základním módem rezonátoru je gaussovský svazek (**TEM₀₀**), který má symetrické rozložení energie kolem osy – gaussovský průběh v prostorové rovině.



Obr. 3.3: Příklad příčných módů rezonátoru

⁸ $\Delta\omega = c/2L$, tedy změnou délky rezonátoru lze od sebe frekvenčně vzdálit módy, které mohou obíhat rezonátorem a docílit tak toho, že nad prahovým součinitelem zesílení bude jediný mód.

4

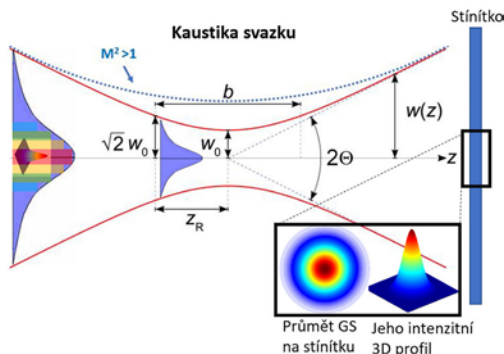
Gaussovský svazek

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

Gaussovský svazek, který představuje základní mód rezonátoru, je charakterizován svým specifickým příčným rozložením pole, jež má tvar Gaussovy křivky (zvonovitý tvar). Tato charakteristika umožňuje efektivní manipulaci se svazkem v aplikacích, jako je jeho zobrazování, kde se mění jeho průměr pomocí teleskopů, nebo při fokusaci. Gaussovske svazky se také často využívají v simulacích interakcí laserového svazku s materiálem a při navrhování optických prvků a soustav, díky jejich předvídatelnému a dobře definovanému rozložení energie.

Mezi základní parametry gaussovského svazku patří:

1. Rozložení intenzity $I(r, z) = I_0 e^{\left(-2 \frac{r^2}{w(z)^2}\right)}$
2. Divergence svazku $\theta = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{w(z)}{z} \right) \cong \frac{\lambda}{\pi w_0}$
3. Poloměr svazku $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2}$



Obr. 4.1: Základní parametry gaussovského svazku

Intenzitní profil svazku má gaussovský průběh, jak je vidět na obrázku 4.1. Divergence svazku neboli rozbíhavost je definována jeho poloměrem. Svazek s menším poloměrem se více rozbíhá, zatímco pro dobře kolimovaný svazek je potřeba velký poloměr.

Rayleighova vzdálenost či **hloubka ostrosti** představují teoretickou vzdálenost, na které je svazek stále „ostrý“ – dobře fokusovaný.

Rayleighova vzdálenost:

$$z_r = \pi \omega_0^2 / \lambda$$

z_r – Vzdálenost od středu svazku, na níž se plocha svazku zdvojnásobí.

Hloubka ostrosti:

$$b = 2z_r = 2\pi \omega_0^2 / \lambda$$

V praxi je ale potřeba tuto vzdálenost určit experimentálně podle konkrétní aplikace. Je třeba zmínit, že skutečný svazek se ideálnímu gaussovskému může pouze přibližovat. Kvalitu gaussovského svazku – to, jak blízko je skutečný svazek k ideálnímu gaussovskému svazku – měříme pomocí parametru Beam Parameter Product (BPP).

$$BPP = M^2 \frac{\lambda}{\pi} = \omega_0 \theta$$

BPP je dán **parametrem M^2** . Tento parametr udává, jak kvalitní svazek laserový systém generuje. Ideální gaussovský svazek má $M^2 = 1$, skutečné systémy se mu pouze přibližují ($M^2 > 1$). Parametr M^2 také ovlivňuje, na jak malý bod jsme schopni svazek zaostřit.

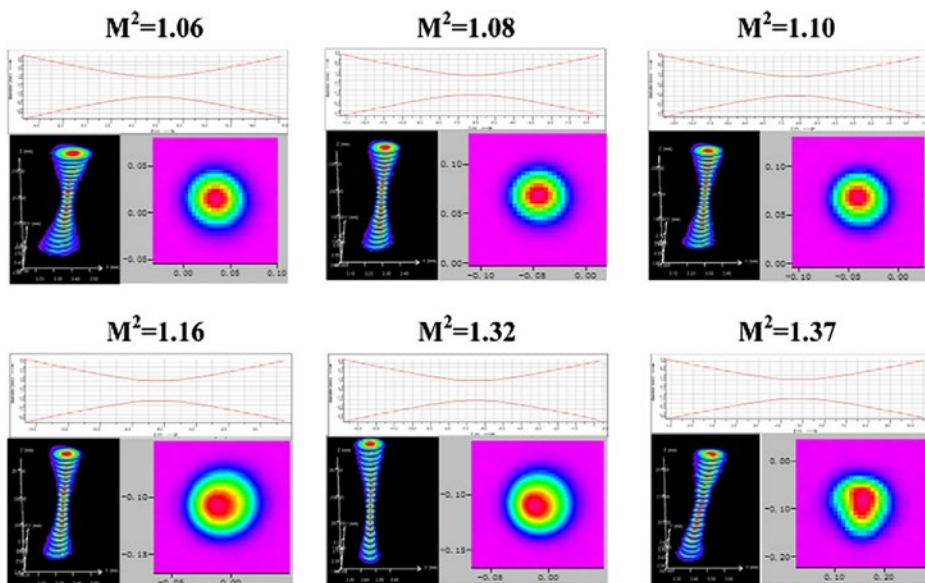
$$D = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi D_0}$$

kde:

f – ohnisková vzdálenost čočky,

D_0 – průměr vstupního svazku,

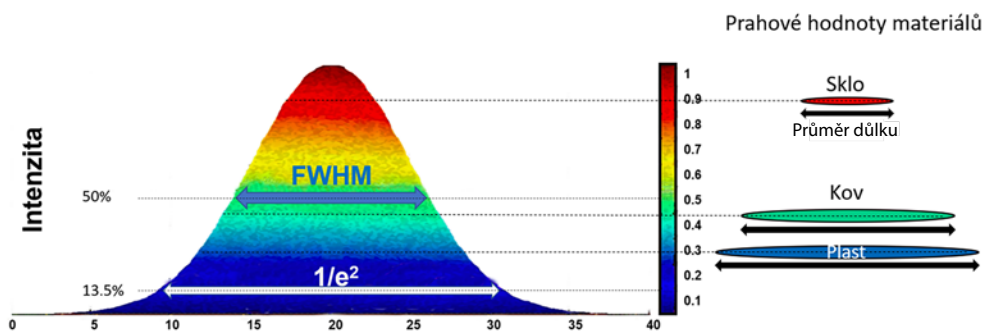
D – průměr svazku ve fokusu.



Obr. 4.2: Příklady svazků s různým M^2 (převzato z [1])

V praxi se hodnota průměru svazku udává dvěma způsoby: jako FWHM, nebo jako $1/e^2$. Obě hodnoty jsou odvozeny z intenzitního profilu svazku, jak je patrné z obrázku 4.3. Hodnota $1/e^2$ označuje průměr svazku v místě, kde je intenzita rovna hodnotě $1/e^2$ maxima, což je přibližně 13,5 % maximální intenzity. FWHM (Full Width Half Maximum) pak představuje hodnotu průměru v místě s poloviční intenzitou. Je důležité si uvědomit, že v praxi často dochází k zaměňování těchto hodnot, neboť často není jasně uvedeno, jakým způsobem byl průměr svazku měřen.

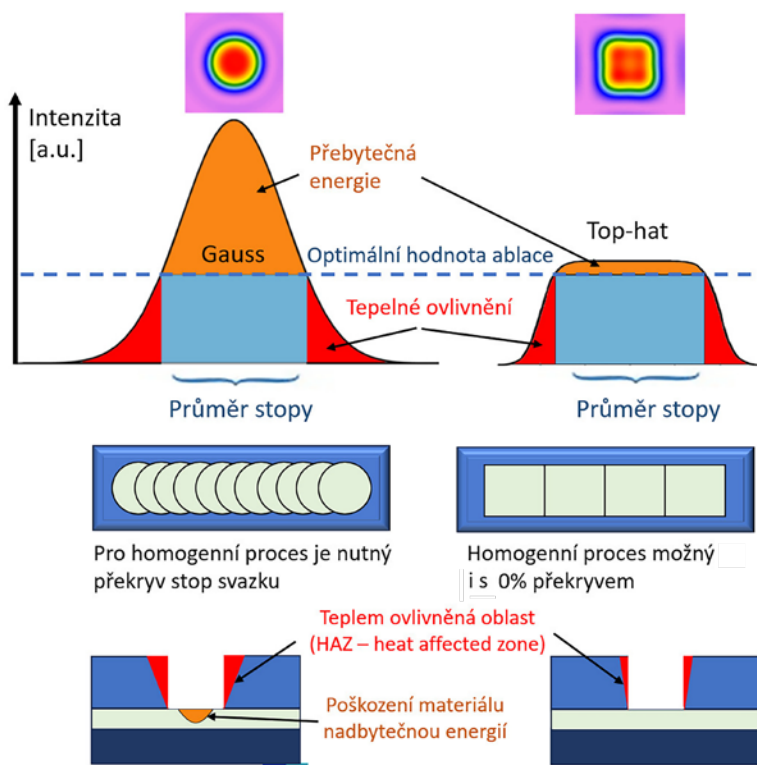
Otisk laserové stopy na konkrétním materiálu je však v praxi od těchto naměřených hodnot průměrů svazku odlišný. Skutečnou velikost otisku v konkrétním materiálu (na-



Obr. 4.3: Příklad gaussovského svazku s vyznačeným FWHM a průměrem v $1/e^2$ a příkladem změny průměru stopy svazku na povrchu různých materiálů

příklad formou kráteru) ovlivňuje mnoho faktorů, jako je hustota energie dopadajícího záření, doba expozice, vlastnosti materiálu a další podmínky laserového zpracování. Toto pochopení je zásadní pro přesnou aplikaci laseru v průmyslových procesech, jako je řezání, vrtání, nebo povrchová úprava.

Například se stejnými laserovými i procesními parametry bude kráter v kovu odlišný od kráteru v plastu nebo skle. Důvodem jsou odlišné prahové hodnoty plošné hustoty energie (fluence) pro jednotlivé materiály (viz obrázek 4.3).

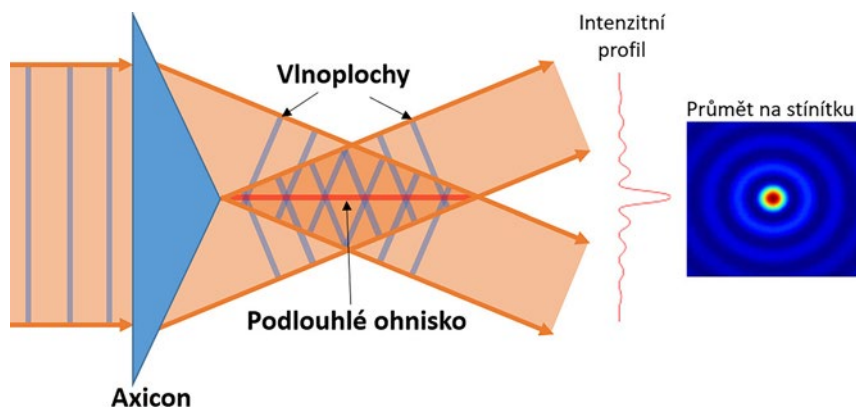


Obr. 4.4: Porovnání gaussovského svazku a čtvercového top-hat svazku

V řadě aplikací však nemusí být kulatý gaussovský svazek tím nejlepším řešením. V případě gravírování a strukturování může být výhodnější tzv. **top-hat svazek** (viz obrázek 4.4). Ten se vyznačuje pravoúhlým profilem intenzity, což minimalizuje okrajové části svazku, které jsou pod prahovou hodnotou pro odpaření (ablaci) materiálu – minimalizujeme tím nežádoucí tepelné jevy. Pokud takový svazek navíc vytváříme do čtverce, výrazně si tím usnadníme navazování svazku pro homogenní ozáření větší plochy a můžeme minimalizovat nutné překryvy svazku (viz obrázek 4.4).

Na druhou stranu má top-hat svazek nevýhodu ve špatné manipulaci se svazkem, jako je zobrazování, změna poloměru, fokusace a vedení. Zároveň je většina optických prvků navržena pro práci s gaussovskými svazky.

Za zmínku stojí také **besselovský svazek**, který nachází uplatnění v případě obrábění transparentních materiálů jako sklo, plasty nebo keramika. Besselovský svazek představuje unikátní formu laserového svazku, který je charakterizován specifickým rozložením energie. Besselovský svazek je tvořen středovým svazkem obklopeným koncentrickými prstenci. Tento svazek je pojmenován podle Besselových funkcí, jež popisují jeho tvar a intenzitní profil. Besselovské svazky jsou zvláště užitečné pro aplikace vyžadující precizní interakci se světlem, jako je mikroskopie nebo obrábění transparentních materiálů, kde se využívá dlouhá hloubka ostrosti a malé průměry středového svazku.



Obr. 4.5: Příklad Besselova svazku za axikonem

5

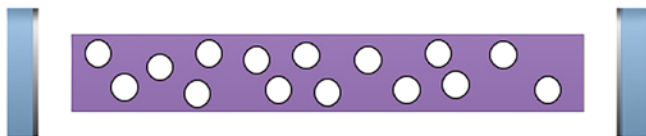
Režimy generace laseru

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

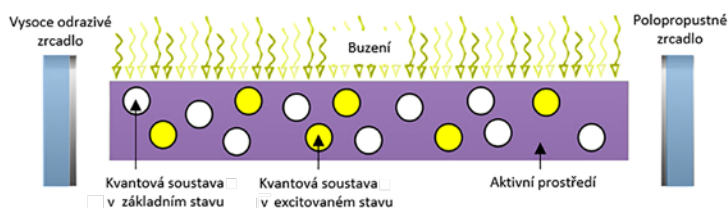
5.1 Volně běžící režim

Volně běžící režim je jednou z nejčastěji používaných metod pro generaci laserových svazků, především díky své relativní cenové dostupnosti. Režim generace laseru ve volně běžícím režimu lze popsat následovně:

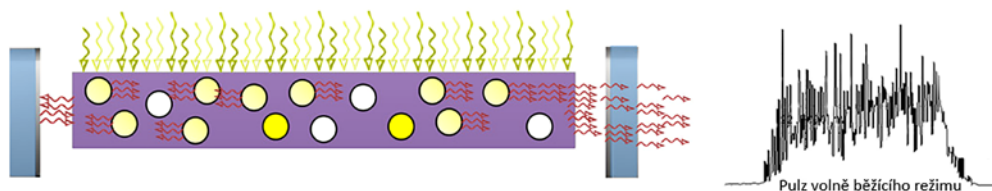
1. Aktivní prostředí se nachází v rovnovážném stavu – většina atomů je na základní energetické hladině.



2. Buzení excituje atomy na vyšší energetickou hladinu, dochází k inverzi populace.

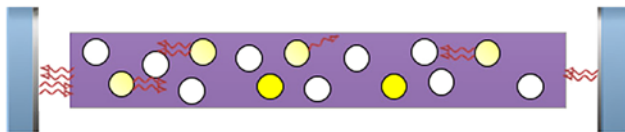


3. Díky kladné zpětné vazbě rezonátoru dochází k lavinovitému nárůstu stimulované emise ve směru osy rezonátoru. Část záření je pak vyvedena ven z rezonátoru skrze polopropustné zrcadlo, což umožňuje generaci laserového pulzu.

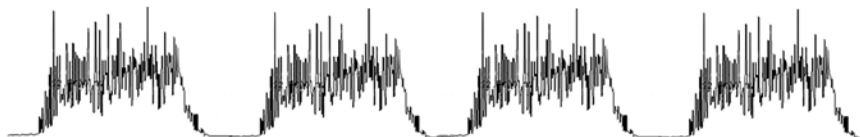


Obr. 5.1: Volně běžící režim laseru (pokračování na další straně)

4. Generováním záření dochází k vyčerpání inverze populace a úbytku stimulujících fotonů pod prahovou hodnotu pro generaci laserového záření.

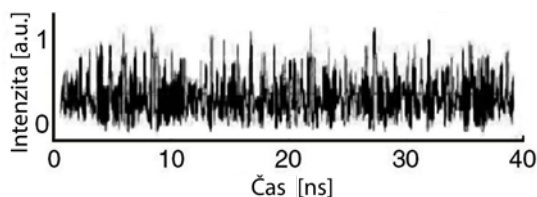


5. Buzení excituje atomy na vyšší energetické hladiny a celý proces se opakuje.



Obr. 5.1: Volně běžící režim laseru

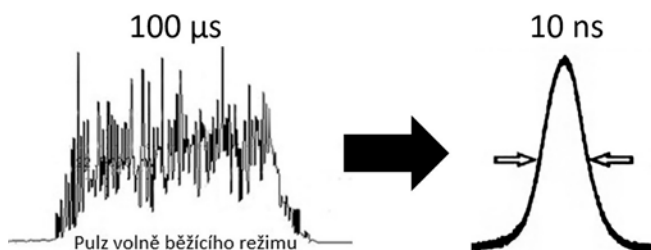
Pro volně běžící režim jsou typické pulzy o délce mikrosekund až milisekund. Každý pulz se skládá z neuspořádaných peaků, tzv. relaxačních oscilací, které vznikají v důsledku vyčerpávání inverze populace během generace záření. Pokud parametry buzení odpovídají prahu generace, dochází ke kontinuálnímu režimu generace.



Obr. 5.2: Oscilace generované intenzity výstupního záření v případě kontinuálně běžícího laseru

5.2 Q-spínání

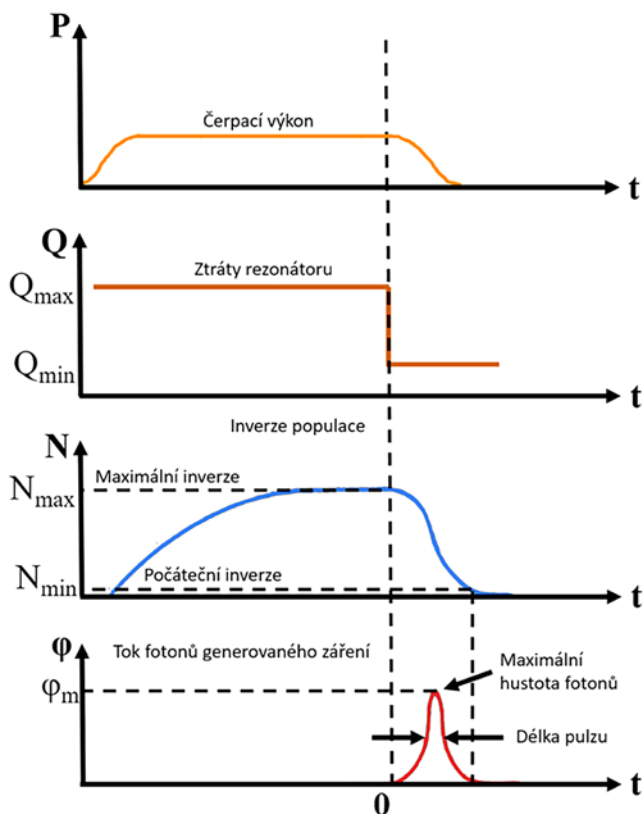
Q-spínání je režim generace laseru, díky kterému můžeme generovat intenzivní nano-sekundové pulzy s vysokým špičkovým výkonem (typicky 1–100 ns, 1 MW – 1 GW). Oproti volně běžícímu režimu jsou generovány o několik řádů kratší délky pulzů, které jsou výhodnější pro aplikace, kde je potřeba minimalizovat tepelné působení záření (například gravírování, mikroobrábění, vrtání).



Obr. 5.3: Porovnání pulzu volně běžícího laseru a Q-spínaného pulzu

Q-spínání můžeme definovat jako metodu, při níž se ovlivňuje kvalita rezonátoru (ztráty) za účelem dosažení maximální inverze populace. Princip můžeme vysvětlit následovně:

1. Skokově zvýším ztráty rezonátoru (nedochází ke generaci laserového záření, a tím ke snižování inverze populace).
2. Intenzivně čerpám AP – díky bodu 1 jsem schopný dosáhnout vyšší inverze populace.
3. Skokově snížím ztráty rezonátoru (v bodě maximální inverze populace).
4. Nahromaděná inverze populace je rychle vyčerpána v podobě intenzivního pulzu s délkou $\sim ns$.



Obr. 5.4: Q-spínaný režim generace laseru

Ztráty v rezonátoru mohou být řízeny následujícími způsoby:

- Elektro-optické spínače (Pockelsovy cely): odklon záření mimo rezonátor.
- Akusto-optické spínače (například fotoelastický jev): rozptyl záření v rezonátoru.
- Pasivní spínání: satureovatelný absorbér, průhledný pouze od určité intenzity dopadajícího záření.
- Dříve se využívala například i rotující zrcadla (či hranoly) rezonátoru – rozladění rezonátoru.

Při generaci Q-spínaných pulzů je důležité si uvědomit, že výstupní energie těchto pulzů je inherentně menší než u laserů pracujících ve volně běžícím režimu. Tato základní charakteristika Q-spínání omezuje maximální dostupnou energii pulzu, což může být limitujícím

faktorem pro některé aplikace, jež vyžadují vyšší energii nebo jiné specifické vlastnosti pulzu. V praxi se proto při využití krátkých impulsů často setkáváme nejen s Q-spínáním, ale také s technologií MOPA (Master Oscillator Power Amplifier), která přináší další flexibilitu a možnosti řízení vlastností laserových pulzů.

MOPA: V praxi se při generaci nanosekundových pulzů setkáváme vedle Q-spínání také s technologií MOPA (Master Oscillator Power Amplifier). Systém MOPA se skládá ze dvou částí: oscilátoru (MO) a zesilovače (PA). Oscilátor je často konfigurován s Q-spínáním nebo jinými modulačními technikami, jako je amplitudová nebo frekvenční modulace, aby generoval pulzy s velmi specifickými charakteristikami. Zesilovač pak zachovává původní charakteristiky pulzu.

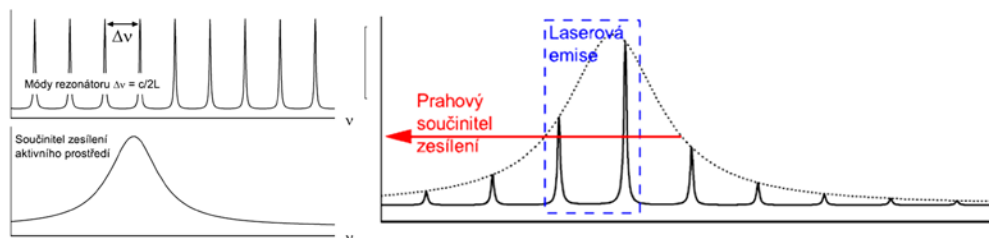
S architekturou MOPA se můžeme běžně setkávat v případě značících vláknových laserů. Zde MOPA architektura nabízí oproti klasickému Q-spínání obvykle širší možnosti ladění laserových parametrů, jako je délka pulzu nebo opakovací frekvence generovaného záření, a možnost přizpůsobit je tak dané aplikaci. Rozsahy se mohou pohybovat například od 2 ns do 500 ns pro délku pulzu a 10 kHz do 4 MHz pro opakovací frekvenci. Na rozdíl od klasického Q-spínání, kdy máme délku pulzu obvykle fixní a opakovací frekvenci obvykle do 500 KHz, nabízí MOPA při výběru laserových parametrů větší svobodu. V případě vláknových laserů MOPA systémy také často dosahují větších průměrných výkonů.

5.3 Synchronizace módů (mode-locking)

Mode-locking je svázání (synchronizace) mnoha podélných módů uvnitř laserového rezonátoru.

Synchronizace módů neboli mode-locking je pokročilý režim generace záření, který umožňuje získávat ultrakrátké laserové pulzy (UKP) v řádu pico- až femtosekund. Takové pulzy se vyznačují velmi vysokou intenzitou (což je výhodné například pro nelineární jevy⁹) a minimální tepelnou zátěží materiálu (viz kapitola 10, *Ablace*). Uplatnění nachází například při opracování skla a dalších transparentních materiálů nebo při velmi detailním mikro- a nanoobrábění.

Při mode-lockingu dochází k synchronizaci (či svázání) mnoha podélných módů uvnitř laserového rezonátoru, přičemž z příčných módů je generován pouze základní mód (ostatní módy jsou eliminovány obvykle umístěním clony do rezonátoru). Jak jsme si řekli v kapitole 3, věnované otevřenému rezonátoru, v rezonátoru mohou oscilovat pouze vlny

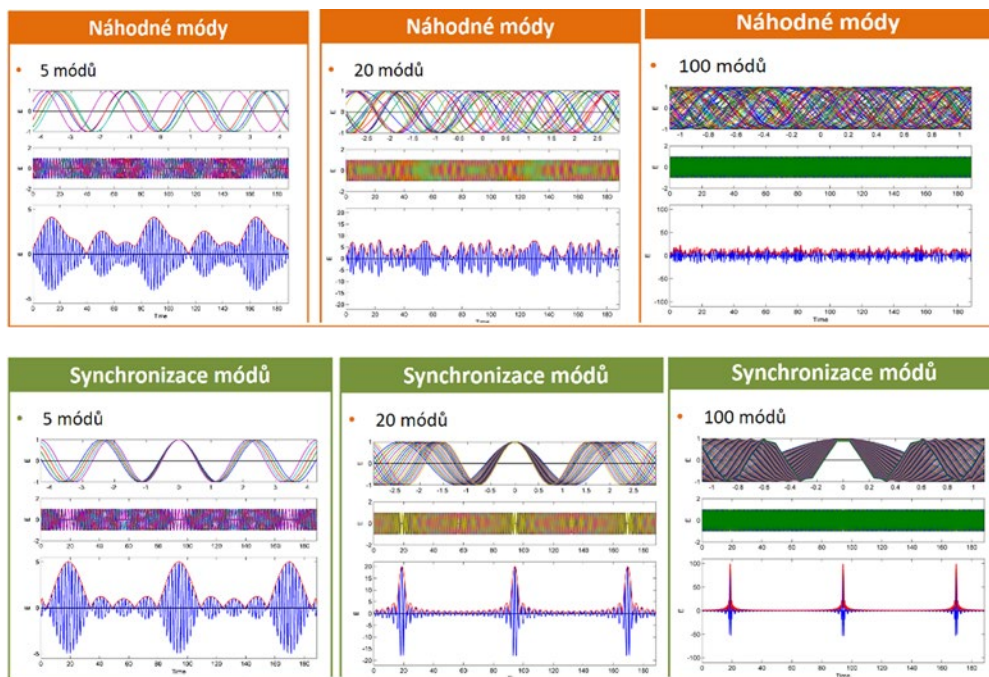


Obr. 5.5 Opakování – podélné módy nad prahem generace

⁹ Multi-fotonová absorpce pro ablaci transparentních materiálů, generace vyšších harmonických frekvencí apod.

o daných frekvencích (= podélné módy). Pokud máme rezonátor a vhodné aktivní prostředí, může být zesilováno mnoho podélných módů.

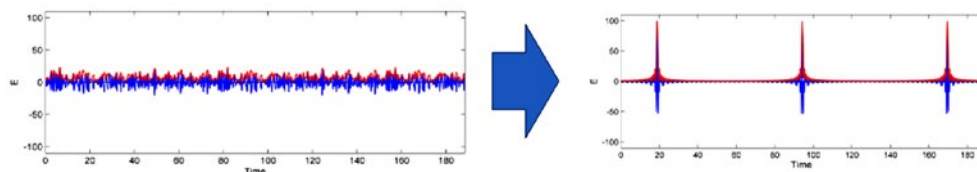
Fáze a intenzity takových módů jsou za normálních podmínek náhodné, s pomocí mode-lockingu tyto módy vzájemně synchronizujeme.



Obr. 5.6: Rozdíl mezi náhodnými a synchronizovanými módy

Synchronizace může probíhat podle následujících kroků:

1. Zavedeme definované ztráty do laserového rezonátoru (akusto-optický spínač / saturovatelný absorbér).
2. Ztráty budou řízeny tak, aby se v rezonátoru zesiloval pouze jeden laserový pulz, který je výsledkem interference (sfázování/synchronizace) módů.¹⁰



Obr. 5.7: Přechod od náhodných módů k synchronizovaným

¹⁰ Podélné módy v mode-locked laseru mají různé frekvence, ale jsou sfázované (koherentní), což umožňuje jejich interferenci. Tato koherentní interference módů vede k vzniku zázneje v podobě ultra-krátkého pulzu. Tento jev je základem pro generování velmi krátkých pulzů typických pro mode-locked lasery.

3. Tento pulz se bude postupně po několika průchodech na úkor ostatních zesilovat.
4. Na závěr v rezonátoru obíhá pouze jeden pulz, fáze všech módů jsou synchronizovány. Na výstupu z laseru jsou jednotlivé pulzy vzdáleny o dobu dvojnásobného oběhu pulzu v rezonátoru.

Pro generované záření platí následující:

- Délka pulzu je primárně ovlivněna spektrální šířkou pokrytou synchronizovanými módy, nikoliv pouze počtem módů. Čím širší je spektrum, tím kratšího pulzu lze dosáhnout.
- Platí, že čím je kratší pulz, tím širší má spektrum.
- Jak jsme si ukázali v kapitole 3, aktivní prostředí dokáže zesilovat jen určitý rozsah vlnových délek, tedy pouze omezenou šířku spektra.

Pro dosažení kratších pulzů je důležitá šířka spektra, které módy pokrývají, a ne pouze jejich počet. Širší spektrum umožňuje vytvořit kratší pulzy. Nicméně existuje limit, jak široké může spektrum být, protože aktivní prostředí laseru nemusí být schopné zesílit všechny módy, pokud je spektrum příliš široké. Minimální možná délka pulzu tedy závisí na tom, jak široké spektrum módů může aktivní prostředí zesílit.

S využitím mode-lockingu je možné generovat velmi krátké femtosekundové pulzy, typická délka pulzu se pohybuje v rozmezí 30 fs až 30 ps.

Pulzy, které budou v délce nanosekund až desítek pikosekund, budeme označovat jako **krátké**. Pulzy kratší než 10 ps budeme označovat jako **ultrakrátké**.

6

Generace ultrakrátkých pulzů

Ing. Petr Hauschwitz, Ph.D., MBA
Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AVČR

Generování a zesilování ultrakrátkých pulzů (UKP) představuje technologickou výzvu, která vyžaduje využití řady sofistikovaných technik a postupů. Kromě již zmíněné synchronizace pulzů je důležité zajistit také efektivní kompenzaci disperze a čerpané zesilování pulzů (uváděno také jako zesilování rozmítnutých pulzů).

Nejdříve malé opakování:

- Volně běžící režim – dlouhé pulzy (často ms až μ s).
- Q-spínání – krátké pulzy ($\sim$ ns).
- Mode-locking – ultrakrátké pulzy ($\sim$ ps, fs).

Jak víme, UKP mají široké spektrum v důsledku mnoha synchronizovaných módů s různou frekvencí. Každá část spektra se však v prostředí šíří jinou rychlostí – index lomu prostředí (míra rychlosti šíření světla v daném médiu) je závislá na vlnové délce (říká se tomu disperze), viz obrázek 6.1.

Prakticky se to projevuje tak, jak je zobrazeno na obrázku 6.1. Pokud do média s pozitivní disperzí ($D > 0$) vstoupí tři různé vlnové délky (RGB), projdou médiem nejrychleji ty s nejdelší vlnovou délkou (R) a krátké vlnové délky se budou opožďovat. U média s negativní disperzí ($D < 0$) je situace přesně opačná.

Pokud budeme nyní uvažovat UKP se širokým spektrem, po průchodu médiem se pulz v čase rozšíří (čerpaný pulz, někdy také označován jako rozmítnutý). K dosažení úspěšné generace UKP je nezbytné mít v laserovém systému prvky, které dokážou tuto disperzi kompenzovat. I vzduch má disperzi, která je obvykle pozitivní, a tu lze kompenzovat prvky s negativní disperzí, jako jsou čerpaná zrcadla, soustavy hranolů nebo difrakční mřížky (viz obrázek 6.2).

Zesilování ultrakrátkých pulzů představuje další výzvu, protože jejich vysoká intenzita může poškodit optické komponenty. Tento problém limitoval výkon UKP laserových systémů až do vynálezu technologie zesilování čerpaných (rozmítnutých) pulzů, známé