

Praktický průvodce

# LASEROVOU TECHNOLOGIÍ

Petr Hauschwitz  
a kolektiv

A central illustration of a man with glasses and a white lab coat with a red 'L' on the chest, reading a red book. He is standing in a factory environment. To his left, a yellow robotic arm is working on a metal plate. To his right, a laser cutting machine is cutting a metal sheet, creating bright sparks. The background is a vibrant red and orange with glowing particle effects. The overall style is a mix of realistic photography and stylized illustration.

**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, PhD., 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
<b>Část I – Základy laserové technologie .....</b>	<b>11</b>
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

## Část II Laserové technologie v praxi ..... 67

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
<b>16</b>	<b>Laserové značení .....</b>	<b>166</b>
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
<b>17</b>	<b>Laserové čištění .....</b>	<b>191</b>
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
<b>18</b>	<b>Laserové kalení .....</b>	<b>206</b>
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
<b>19</b>	<b>Laserové svařování .....</b>	<b>223</b>
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
<b>20</b>	<b>Laserové navařování a aditivní výroba z kovu .....</b>	<b>240</b>
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
<b>21</b>	<b>Laserové vyklepávání (LSP) .....</b>	<b>258</b>
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
<b>22</b>	<b>Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS) .....</b>	<b>274</b>
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
<b>23</b>	<b>Počítačové simulace a jejich využití .....</b>	<b>292</b>
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
<b>24</b>	<b>Bezpečnost při práci s lasery .....</b>	<b>305</b>
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.<sup>1</sup>**
3. **Kontrolovaným spektrálním rozsahem generovaného záření: fotony jsou generovány v určitém kontrolovaném rozsahu frekvencí.<sup>2</sup>**
4. **Koherenci: fotony jsou ve fázi jak časově, tak prostorově.<sup>3</sup>**

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.

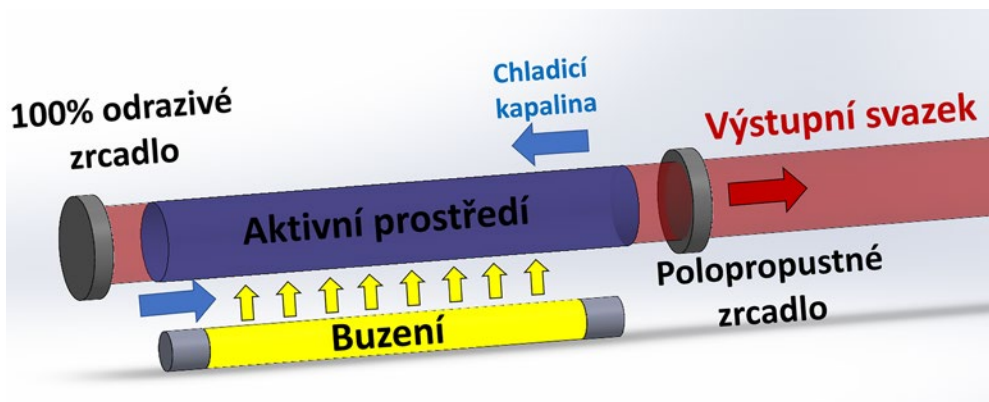
K základním prvkům laseru patří:

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.

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

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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 sestrojít 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 Petřů (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 CO<sub>2</sub> 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

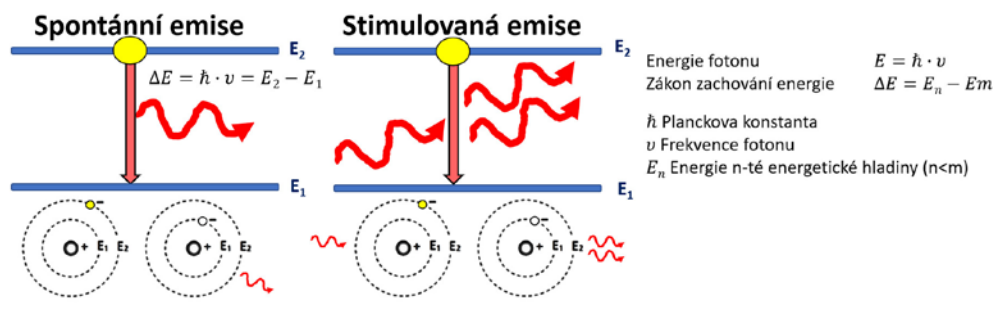
Atomy<sup>4</sup> jsou základní stavební jednotky látkové hmoty. Tvoří kvantové soustavy, které se skládají z vázaných elektronů, protonů a neutronů. Významnou roli zde hraje kvantová teorie, která poskytuje důležité poznatky o izolovaných kvantových soustavách. Z té vyplývá:

- Izolované soustavě, která je ve stacionárním stavu, přísluší přesně definovaná vnitřní energie.
- Tato energie je kvantována – nabývá pouze diskrétních hodnot ( $E_i = 0, 1, 2, \dots$ ).<sup>5</sup>
- 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

<sup>4</sup> Pro zjednodušení zde budeme jako atomy označovat i ionty a molekuly.

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

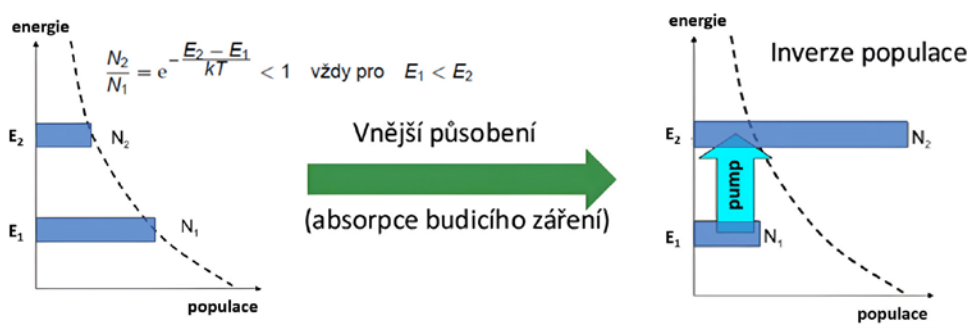




**Obr. 2.1:** Schematické znázornění procesu absorpce a spontánní emise

ve formě fotonů. Podle zákona zachování energie musí frekvence fotonu  $\nu_{mn}$  přesně odpovídat rozdílu energie energetických hladin.<sup>6</sup>

- 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.

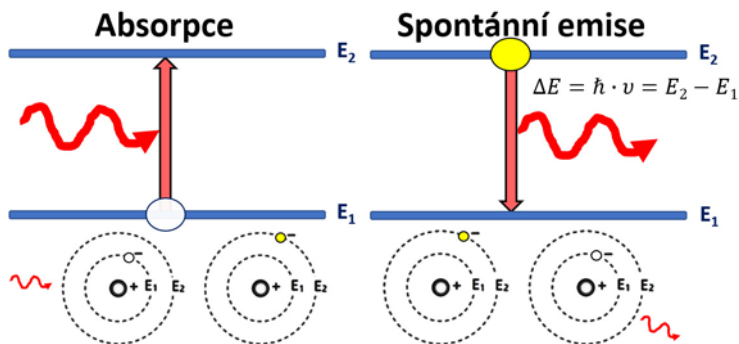


**Obr. 2.2:** Znázornění energetických hladin v základním a vybuzeném stavu

Podmínky pro stimulovanou emisi:

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

<sup>6</sup> 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.

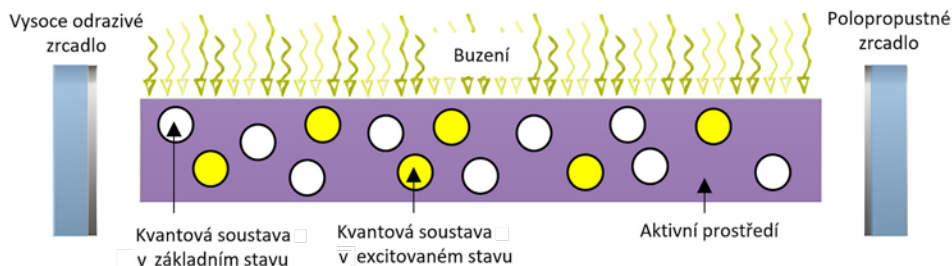
Dlouhodobé udržení inverze populace (termodynamicky nerovnovážný stav) zajišťuje **buzení a chlazení**. Kladnou zpětnou vazbu a vznik laserových oscilací pak zajišťuje **laserový rezonátor**.

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

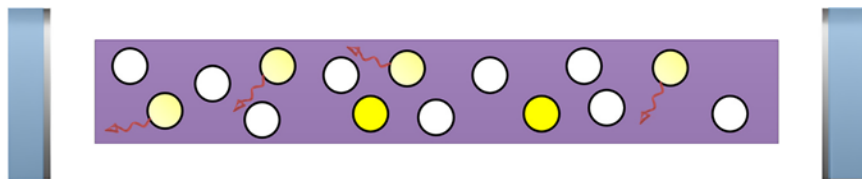
Otevřený rezonátor hraje v generování laserového záření klíčovou roli tím, že zajišťuje kladnou zpětnou vazbu a umožňuje vznik laserových oscilací. V nejjednodušší formě se jedná o soustavu dvou zrcadel – jedno je 100% odrazné, zatímco druhé je částečně propustné, což umožňuje vyvážení energie z rezonátoru.

Generaci laserového záření můžeme popsat následovně:

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

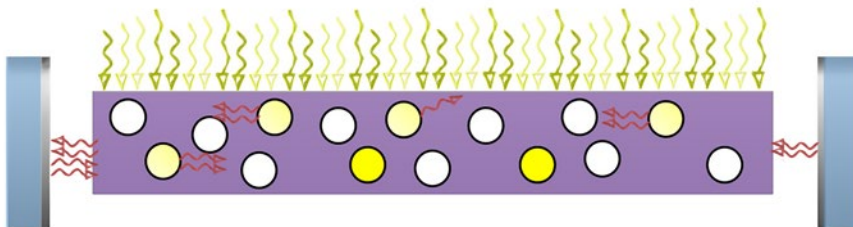


2. Kvantové soustavy na vyšších hladinách přecházejí zpět na základní hladinu s pomocí spontánní emise.

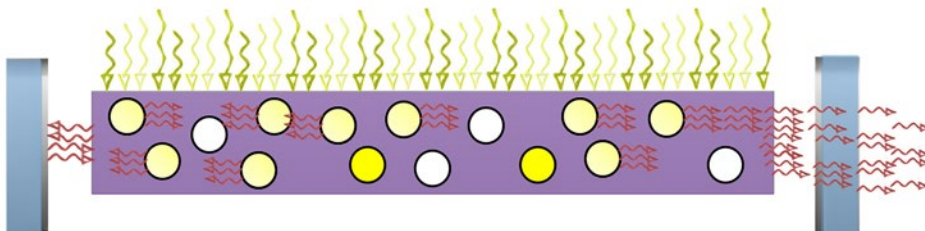


**Obr. 3.1:** Princip generace laserového záření (pokračování na další straně)

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 záření<sup>7</sup>

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  $2\pi$ :

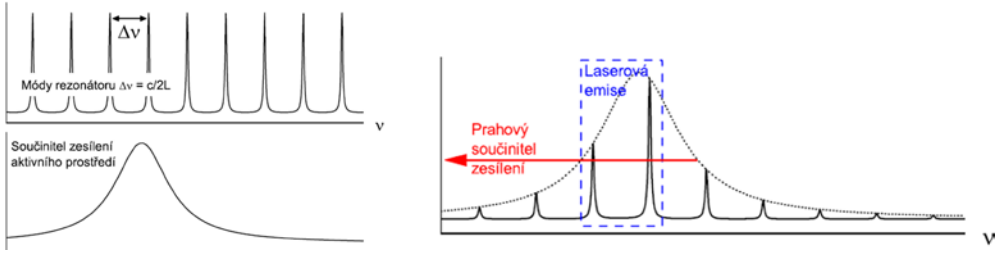
$$\omega = \omega_q = q \cdot 2\pi \cdot \frac{c}{2L}$$

kde:

- $\omega$  – frekvence EM vlnění,
- $q$  – celé číslo,
- $c$  – rychlost světla,
- $L$  – délka rezonátoru.

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

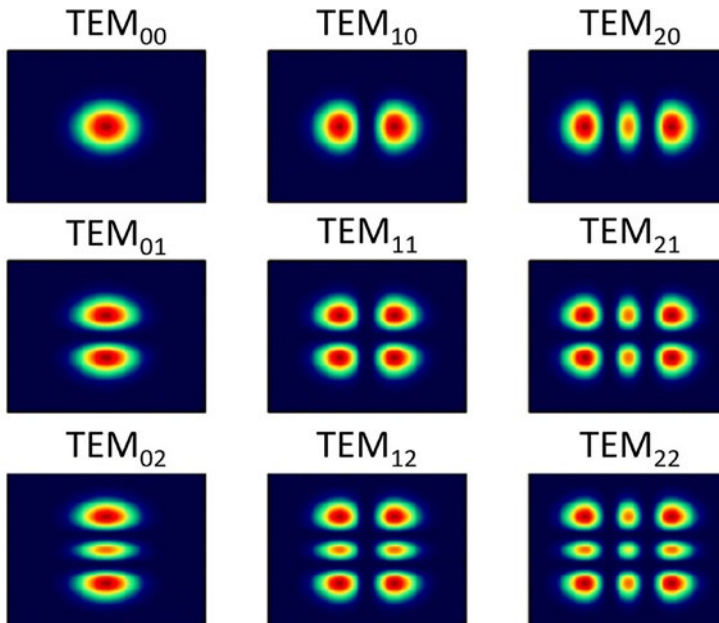
V praxi to znamená, že v rezonátoru oscilují pouze vlny o určitých frekvencích, které nazýváme **podélné módy otevřeného rezonátoru**. Frekvence sousedních podélných módů jsou od sebe odděleny konstantním frekvenčním intervalem, který závisí na délce rezonátoru.



**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 rezonátoru<sup>8</sup> 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 (**TEM<sub>00</sub>**), který má symetrické rozložení energie kolem osy – gaussovský průběh v prostorové rovině.



**Obr. 3.3:** Příklad příčných módů rezonátoru

<sup>8</sup>  $\Delta\omega = c/2L$ , 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

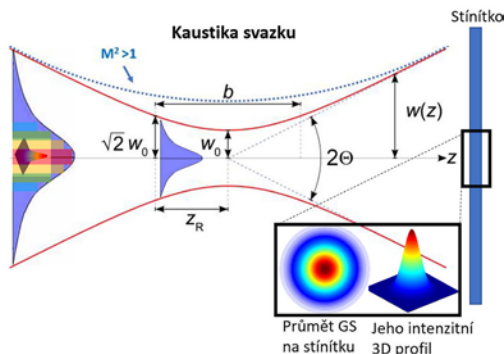
# Gaussovský svazek

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. Gaussovské 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  $I(r, z) = I_0 e^{-2\frac{r^2}{w(z)^2}}$
2. Divergence svazku  $\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \left( \frac{w(z)}{z} \right) \cong \frac{\lambda}{\pi w_0}$
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:

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

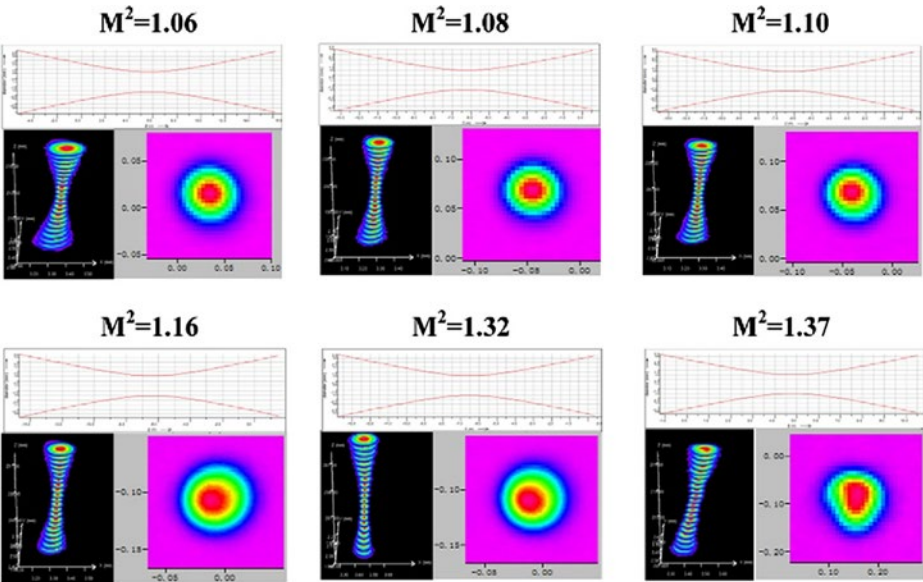
V praxi je ale potřeba tuto vzdálenost určit experimentálně podle konkrétní aplikace. Je třeba zmínit, že skutečný svazek se ideálnímu gaussovskému může pouze přibližovat. Kvalitu gaussovského svazku – to, jak blízko je skutečný svazek k ideálnímu gaussovskému svazku – měříme pomocí parametru Beam Parameter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

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

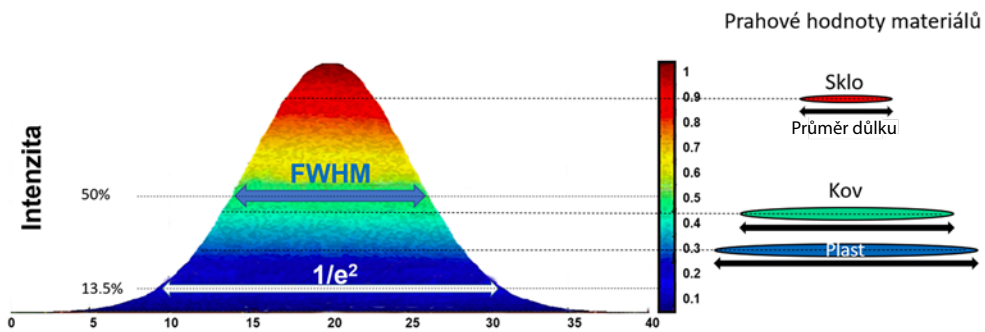
kde:  
*f* – ohnisková vzdálenost čočky,  
*D<sub>0</sub>* – průměr vstupního svazku,  
*D* – průměr svazku ve fokusu.



**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.

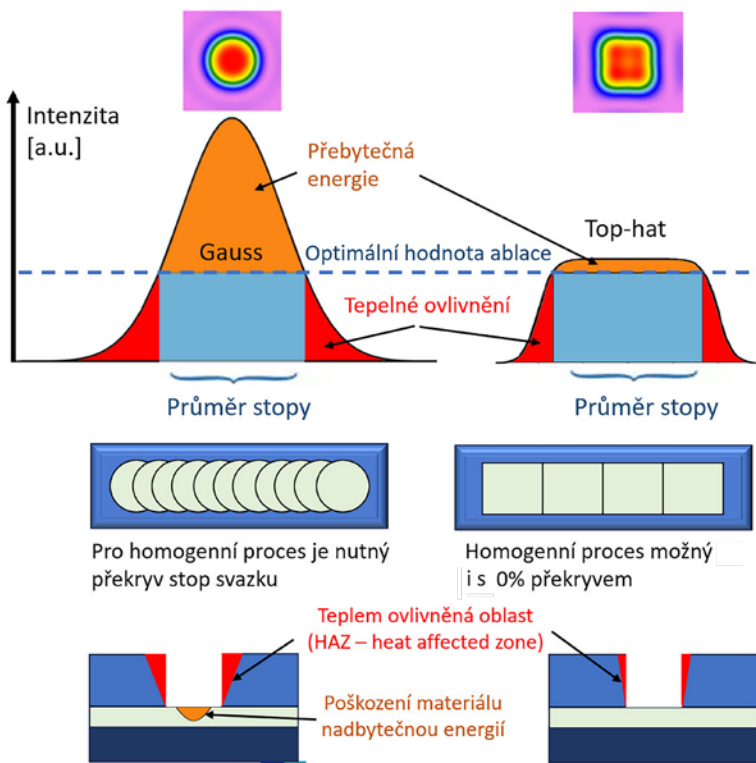
Otisk laserové stopy na konkrétním materiálu je však v praxi od těchto naměřených hodnot průměrů svazku odlišný. Skutečnou velikost otisku v konkrétním materiálu (na-



**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).



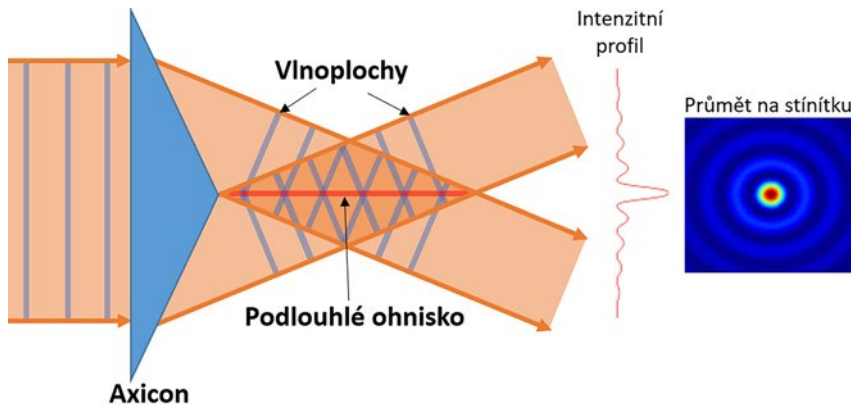
**Obr. 4.4:** Porovnání gaussovského svazku a čtvercového top-hat svazku



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