

Příklady ke kapitole 9:

- 9.1 Práh destrukce rubínového krystalu je roven  $20 \text{ Jcm}^{-2}$ . a) Jaká je maximální hustota inverzní populace, kterou lze vytvořit v aktivním prostředí s průměrem  $0,5 \text{ cm}$  a délkou  $7 \text{ cm}$  tak, aby se krystal nezničil? b) Může být tento krystal zničen vlastním zářením, jestliže je koncentrace aktivních částic rovna  $1,6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ? c) Najděte maximální přípustnou délku tohoto krystalu, kdy se ještě nezničí vlastním zářením.
- 9.2 Odhadněte, jaký výkon musí mít výbojka, aby bylo dosaženo prahu generace v kontinuálním režimu u *Nd*:sklo laseru. Doba života horní laserové úrovně je  $0,5 \mu\text{s}$ , prahová inverzní populace je  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , objem krystalu je  $10 \text{ cm}^3$ . Účinnost přeměny elektrické energie lampy v energii pohlcovanou absorpčním spektrem *Nd*<sup>3+</sup> se rovná 4%.
- 9.3 Určete velikost energie nutné k dosažení generace v *Nd*:YAG laseru, který pracuje v impulsním režimu, za předpokladu, že délka rezonátoru se rovná  $20 \text{ cm}$ , ztráty za jeden průchod se rovnají 4%, doba života fotonu v rezonátoru se rovná  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ , index lomu krystalu je  $1,5$ , doba života horní laserové úrovně je  $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  a šířka pásma zesílení je rovna  $6 \text{ cm}^{-1}$ .
- 9.4 Odhadněte výkon výbojky nutný pro provoz *Nd*:YAG laseru s parametry danými v příkladu 9.3 a průměrem krystalu  $0,25 \text{ cm}$  a délkou  $3 \text{ cm}$ .
- 9.5 Odhadněte minimální výkon buzení, při kterém je zajištěna činnost laseru s *Nd*:sklem laseru v kontinuálním režimu s následujícími parametry:  $\Delta\nu = 200 \text{ cm}^{-1}$ , index lomu krystalu  $1,5$ , doba života horní laserové úrovně  $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ , délka rezonátoru  $20 \text{ cm}$ , ztráty za jeden průchod 2%, doba života fotonu v rezonátoru  $3,3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ .

## Kapitola 10

### Kapalinové lasery

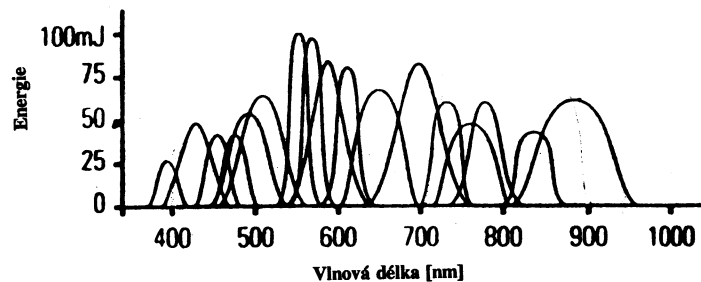
#### 10.1 Aktivní prostředí

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky *organických barviv* nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Speciální kapaliny jsou zpravidla roztoky metalo-organických sloučenin, např. vodní roztoky solí s aktivními ionty *Gd*<sup>3+</sup>, *Eu*<sup>3+</sup>, *Tb*<sup>3+</sup>, *Nd*<sup>3+</sup>, *Er*<sup>3+</sup> nebo *Ho*<sup>3+</sup>. Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy.

Organická barviva tvoří velkou část aktivního prostředí kapalinových laserů. Aktivním prostředím jsou ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jakými jsou např. voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen, benzen, aceton, cyklohexan, glycerin a další.

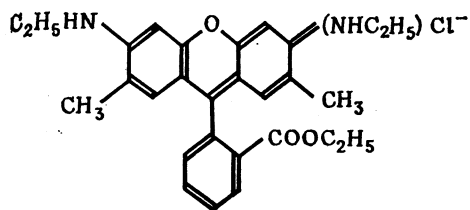
Organická barviva jsou komplexy organických sloučenin majících široká absorpční pásma ve viditelné a blízké ultrafialové oblasti spektra. Chemická struktura organických barviv je charakterizována kombinací několika benzenových, pyridinových, azinových, pyrolových a dalších chemických organických jader. Nejeftivnější luminiscenční barviva jsou rozdělena do osmi kategorií: xanteny, polymetiny, oxaziny, kumariny, antraceny, acridiny, aziny a ftalocyaniny. Do dnešní doby byla generace laserového záření ověřena u více než 200 různých barviv, pásma generovaných vlnových délek pokrývá oblast

od  $0,3 \mu\text{m}$  až po  $1,3 \mu\text{m}$  (obr. 10.1). Výběrem vhodného barviva a zrcadel otevřeného rezonátoru můžeme získat koherentní záření na jakékoliv vlnové délce z této oblasti.



Obr. 10.1: Pásmo vlnových délek záření generovaného barvivovými lasery

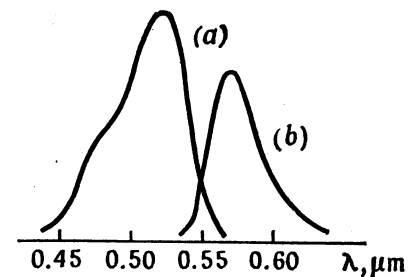
Nejnámějším a prakticky nejdůležitějším aktivním prostředím barvivových laserů je Rhodamin 6G. Patří ke skupině *xanthenových barviv*. Strukturální vzorec je založen na systému benzenových jader (obr. 10.2).



Obr. 10.2: Strukturální vzorec Rhodaminu 6G

Xanthenová barviva absorbují a emitují záření ve viditelné oblasti spektra tzn. absorpční a emisní spektrum Rhodaminu 6G leží také ve viditelné oblasti (obr. 10.3).

Významnou charakteristikou barvivových laserů je šířka čáry generované vzhledem k šířce čáry luminiscenční. Tak jako u pevnolátkových laserů i barvivové lasery mají šířku absorpční a luminiscenční čáry v okolí  $0,1 \mu\text{m}$ . Šířka



Obr. 10.3: Absorpční a emisní spektrum Rhodaminu 6G

generované laserové čáry ovšem může být až řádu  $10^{-4} \mu\text{m}$  nebo menší. Generovaná vlnová délka může být tedy měněna spojitě uvnitř hranic daných šířkou luminiscenční čáry. Lasery, u kterých generovaná vlnová délka může být plynule měněna, nazýváme *lasery přeladitelnými*.

Problémem aktivního prostředí barvivových laserů je chemická a fotochemická stabilita roztoků barviv. Benzenová jádra se rozkládají účinkem světla, tepla i pouhým plynutím času. Pro žádanou generovanou vlnovou délku se proto vybírají nejen vhodná barviva, ale i vhodná nejvíce stabilní rozpouštědla. I u relativně nejstabilnějších roztoků barviv dochází po určité době k jejich rozpadu. Proto je aktivní prostředí barvivových laserů postupně měněno — barvivový roztok protéká trubicí tvořící hranice aktivního media.

## 10.2 Buzení barvivových laserů

Pro buzení barvivových laserů se užívá optického záření. Optické buzení těchto laserů je nekoherentní nebo koherentní, pulsní nebo kontinuální a příčné nebo podélné.

### 10.2.1 Koherentní buzení barvivových laserů

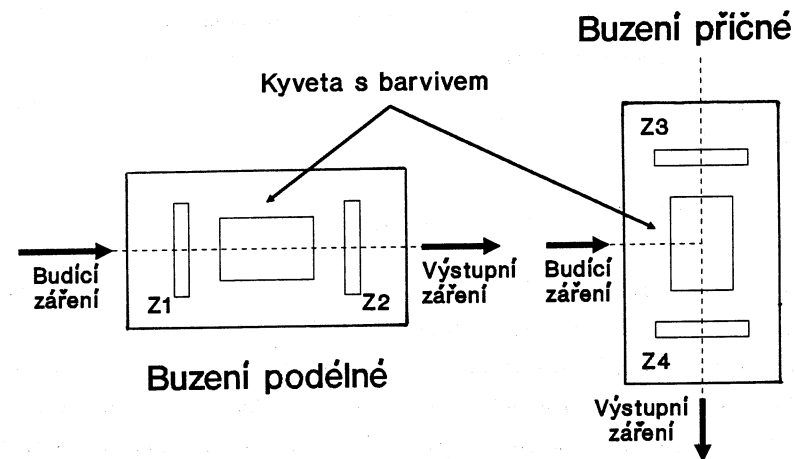
Při koherentním buzení je barvivové aktivní prostředí ozařováno zářením pomocného laseru na kmitočtu odpovídajícím absorpčnímu pásmu daného

barviva. Obvykle se k buzení používá základní nebo druhá harmonická záření pomocného laseru. (Při generaci druhé harmonické záření je pomocí nelineárního prostředí generováno záření s poloviční vlnovou délkou, v případě laseru  $Nd:YAG$  má první harmonická vlnovou délku  $1,06 \mu m$  a druhá harmonická má vlnovou délku  $0,53 \mu m$ ). Nejčastějším zdrojem pro pulsní buzení je  $Nd:sklo$  laser nebo  $Nd:YAG$  laser s vlnovou délkou  $\lambda = 0,53 \mu m$ . Pro kontinuální buzení se nejčastěji užívá laseru argonového s vlnovou délkou  $\lambda = 0,337 \mu m$ . Z důvodu zvýšení hustoty čerpací energie je záření fokusováno na plochu o průměru  $\approx 10 \mu m$ . Tato koncentrace ovšem způsobuje termooptickou distorzi molekul aktivního media. Pro odstranění tohoto jevu barvivový roztok generační zónou pouze protéká. (Roztok barviva je vstříkovan do aktivní zóny tryskou.) Takovéto uspořádání je zvoleno nejen pro chlazení aktivního prostředí, ale také proto, že tímto způsobem jsou z generační zóny odstraněny světlem rozložené molekuly barviva.

Koherentní buzení může být v principu příčné nebo podélné. Při příčném buzení se budící záření šíří kolmo ke směru podélné osy otevřeného rezonátoru barvivového laseru, zatímco při podélném buzení jsou směry záření budícího a generovaného totožné (obr. 10.4).

Otevřený rezonátor barvivových laserů je tvořen zrcadly obvykle s dielektrickým pokrytím zajišťujícím žádanou reflexi v širokém pásmu vlnových délek. V případě koherentního podélného buzení jsou zrcadla otevřeného rezonátoru dichroická. Obvykle zrcadlo s totální reflexí pro generované záření má minimální reflexi pro záření budící. Naopak výstupní zrcadlo má malou reflexi pro záření generované a velkou pro záření budící.

Účinnost barvivových laserů buzených koherentně zářením pomocného laseru dosahuje řádu desítek %. Tyto lasery hrají v podstatě úlohu širokopásmových zesilovačů v optické oblasti spektra. Dají se také použít k relativně jednoduché a účinné konverzi optických frekvencí.



Obr. 10.4: Podélné a příčné koherentní buzení barvivového laseru

### 10.2.2 Nekoherentní buzení barvivových laserů

Při nekoherentním čerpání se pro buzení barvivových laserů užívá podobného uspořádání jako u pevnolátkových laserů. Kveta (skleněná trubka obvykle s konci seříznutými pod Brewsterovým úhlem) s roztokem barviva je umístěna v budící dutině spolu s jednou nebo několika výbojkami. Otevřený rezonátor je stejně jako v případě koherentního buzení tvořen dielektrickými širokopásmovými zrcadly. Pro buzení se užívá většinou xenonových výbojek. Nevýhodou ovšem je, že doba života metastabilní hladiny barvivových laserů (ve srovnání s většinou pevnolátkových laserů) je velmi krátká, a proto je nutno užít speciálních typů xenonových výbojek generujících velmi krátký impuls s délkou v okolí několika mikrosekund. Výroba těchto výbojek je velmi obtížná a doba jejich života je omezena.

Systém nekoherentně buzeného barvivového laseru se tedy skládá z hlavice (obsahující otevřený rezonátor a budící dutinu s aktivním prostředím

a výbojkami) a budícího zdroje. Chladicí jednotka provádí obvykle chlazení pouze výbojek a chlazení aktivního prostředí je provedeno tak, že je chlazen barvivový rezervoár a barvivo neustále cirkuluje mezi kyvetou a tímto rezervoárem. Účinnost nekoherentně čerpaných barvivových laserů dosahuje maximálně 10%.

### 10.3 Využití barvivových laserů

Použití barvivových laserů je především ve spektroskopii, kde možnost nastavení přesné vlnové délky je rozhodujícím požadavkem. Novou aplikací je využití této vlastnosti v medicíně — ve fotodynamické terapii, kdy se působením záření přesné vlnové délky ničí rakovinový nádor předem „napuštěný“ speciálním organickým barvivem. (Barvivo se působením záření rozpadá a volný generovaný kyslík ničí rakovinové buňky).

## Kapitola 11

### Plynové lasery

Plynové lasery jsou lasery s aktivním prostředím v plynné fázi. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu, tj. atomů (*atomární lasery*), iontů (*iontové lasery*), molekul (*molekulární lasery*). Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale byly vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracující v impulsním provozu.

Ze specifických vlastností plynného prostředí vyplývá i řada vlastností společná všem plynovým laserům. Při průchodu aktivním prostředím bývá optický svazek méně deformován než u laserů s kondenzovaným prostředím, neboť plyny jsou obecně homogennější. Rozbíhavost výstupního svazku je pak malá a blíží se tzv. difrakční mezi. Šířky spektrálních čar jsou zprav. mnohem menší, a proto jen u plynových laserů je možné dosáhnout vysokou stabilitu frekvence vystupujícího záření. Nevýhodou plynových laserů je poměrně malá objemová hustota počtu částic, která se odráží v malých objemových výstupních výkonech. Výkonové plynové lasery musí být velmi rozměrné [18].

Plynové lasery je možné budit mnoha různými metodami: *elektrickým výbojem*, *chemickou reakcí*, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky viz tab. 11.1. Optické nekoherentní buzení (běžně užívané u pevnolátkových laserů) je v důsledku malých spektrálních šířek absorpčních čar plynů jen velmi málo účinné. S výhodou se ale