

Gymnázium, Brno, Vídeňská 47
Cvičení z fyziky 2013 - 2014
1. seminární práce

Lasery

Jan Horáček (jan.horacek@seznam.cz)

19. ledna 2014

Obsah

1	Úvod	3
2	Cíle laseru	3
3	Kvantové jevy v laseru	3
3.1	Model atomu	3
3.2	Excitace	4
3.3	Emise	4
4	Základní součásti laseru	5
4.1	Zdroj energie	5
4.2	Aktivní prostředí	5
4.3	Rezonátor	5
5	Princip laseru	6
5.1	Zdroj energie	6
5.2	Aktivní prostředí	7
5.3	Rezonátor	8
6	Využití laserů	8
7	Závěr	9

Abstrakt

[1] Když Albert Einstein formuloval v roce 1917 článek [3] "Zur Quantentheorie der Strahlung", položil tím teoretické základy principu zařízení, kterému dnes říkáme laser. Když pak v roce 1928 Rudolf W. Ladenburg potvrdil existenci stimulované emise, dále v roce 1939 Valentin A. Fabrikant předpověděl využití stimulované emise právě pro lasery, v roce 1947 předvedli Willis E. Lamb a R. C. Retherford první stimulovanou emisi a konečně v roce 1950 Alfred Kastler navrhl metodu pumpování, kterou byla následně o 2 roky později experimentálně potvrzena, konstrukci laseru už nic nebránilo.

1 Úvod

Cílem této práce je především na středoškolské úrovni (matematiky) objasnit základní principy funkce laseru a dále popsat některá využití laseru s odůvodněním vhodnosti a nutnosti jejich aplikace právě v těchto oborech.

Nejprve popíši, co je to vůbec laser, jeho základní vlastnosti a cíle, dále popíši základní kvantové jevy, které je nutné znát pro objasnění jeho principu a zákony, které pro tyto kvantové jevy platí. Pak obecně popíši konstrukci laseru, dále se budu detailně věnovat jednotlivým principům v laseru od vstupního elektrického proudu až po výstupní záření. Na závěr pak uvedu příklady využití laserového paprsku.

2 Cíle laseru

Cílem laseru (Light Amplification by Stimulated Emission) je vytvořit souvislé, úzké, monochromatické a koherentní světlo. Česky řečeno: světlo jedné vlnové délky (barvy), které se šíří v úzkém svazku a je možno ho emitovat dlouhodobě.

Konstrukce takového zařízení nebyla známa před polovinou 20. století. Tehdy byl problém vytvořit velké kvantum světla koncentrované do úzkého svazku. Existovaly sice zdroje, jako např. výbojky, které sice poměrně dobře splňovaly podmínku monochromatickosti, ale z tohoto zdroje bohužel nebylo možné emitovat koncentrované světlo v rozumném množství.

3 Kvantové jevy v laseru

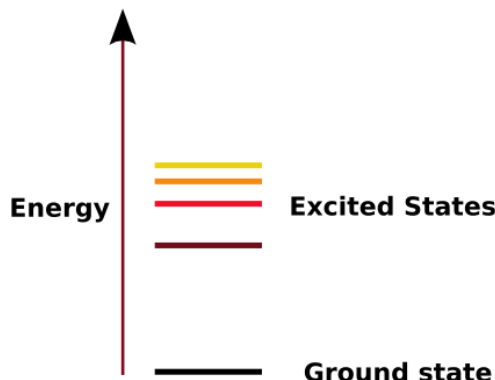
Jelikož je laser zařízení využívající jevů na atomární a subatomární úrovni, musíme pro vysvětlení principu laseru chápat některé základní kvantové jevy, které se níže pokusím popsat.

3.1 Model atomu

Tato kapitola nepopisuje kvantový jev, ale klade si za cíl popsat model atomu tak, jak ho vnímá kvantová mechanika a v takovém rozsahu, jaký je pro pochopení principu laseru nezbytně nutný.

Atom se skládá z jádra, ve kterém se nachází nukleony a z obalu, ve kterém se nachází elektrony. Je důležité si uvědomit, že elektrony se pohybují v tzv. elektronových orbitalech, které si můžeme představit jako předurčené dráhy, ve kterých se elektrony s určitou

pravděpodobností nacházejí. Každý atom má více orbitalů v určitých vzdálenostech od jádra a platí, že elektrony ve větší vzdálenosti od jádra mají větší energii.



Obrázek 1: Energetické hladiny atomu [5]

3.2 Excitace

[5] Excitace, neboli vybuzení, je fyzikální proces, při kterém dochází k přechodu energetického stavu atomu na vyšší energetickou hladinu.

Jedná se tedy o proces přechodu elektronu z nižší energetické hladiny do hladiny vyšší. Lze ho nastartovat například tak, že na obal atomu dopadne foton, jehož vlnová délka (energie) je rovna rozdílu energií jednotlivých hladin.

Atom v excitovaném stavu je do určité míry nestabilní - snaží se zpět dostat do základního stavu. Proto se uvádí tzv. střední délka života elektronu na hladině. Tato veličina vyjadřuje, jak dlouho je schopen excitovaný elektron vydržet na konkrétní energetické hladině.

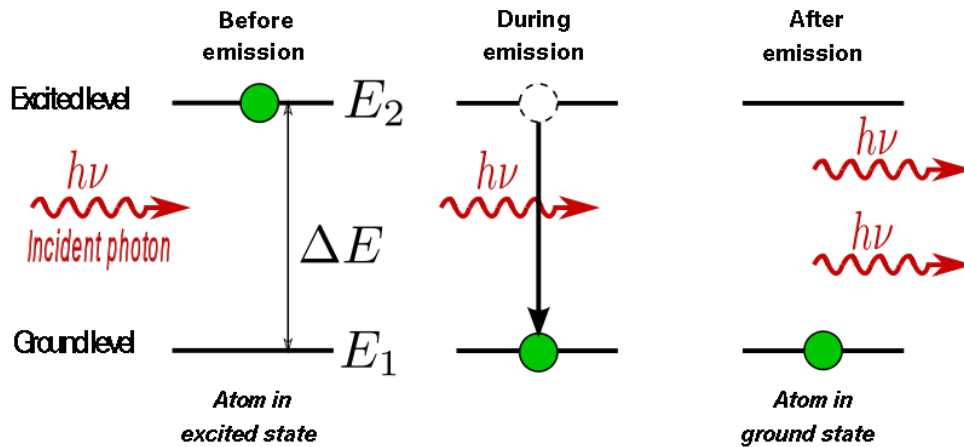
3.3 Emise

Emise je proces vyzáření záření (fotonu). V našem případě je spojen s přechodem elektronu z vyšší energetické hladiny do hladiny nižší.

Platí tedy, že jakmile elektron přechází z vyšší energetické hladiny na nižší hladinu, dojde k vyzáření fotonu o energii (vlnové délce) odpovídající rozdílu hladin.

Emise může být zapříčiněna jednoduše tím, že elektron na vyšší energetické hladině nevydrží - pak mluvíme o tzv. spontánní emisi, nebo tím, že na obal atomu dopadne foton. Foton tak "strhne" elektron na nižší energetickou hladinu, tím dojde k vyzáření fotonu. Původní foton ale není absorbován a tak pokračuje dál. Ze soustavy, do které vstoupil jeden foton, pak vystupují 2 fotony. Došlo tedy ke zdvojnásobení jejich počtu.

Je velmi důležité poznamenat, že emise fotonu zapříčiněná přítomností dalšího fotonu má určité charakteristické vlastnosti. Emitovaný foton má například stejnou vlnovou délku, fázi a rovinu polarizace, jako foton, který emisi zapříčinil. To jsou velmi důležité vlastnosti, které jsou v laseru využívány.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Obrázek 2: Stimulovaná emise

[6]

4 Základní součásti laseru

Nyní stručně popíši základní součásti laseru. Jejich funkci pak podrobně popíši v následující kapitole.

4.1 Zdroj energie

Jedná se o součást laseru, která zajišťuje změnu elektrické energie v podobě elektrického proudu na energii elektromagnetickou - elektromagnetické záření (fotony).

Takovým zdroje energie může být například He-Ne výbojka, nebo LED dioda.

4.2 Aktivní prostředí

Cílem aktivního prostředí je emitovat monochromatické světlo o jedné fázi. Toto světlo je pak světlem, které vychází z laseru.

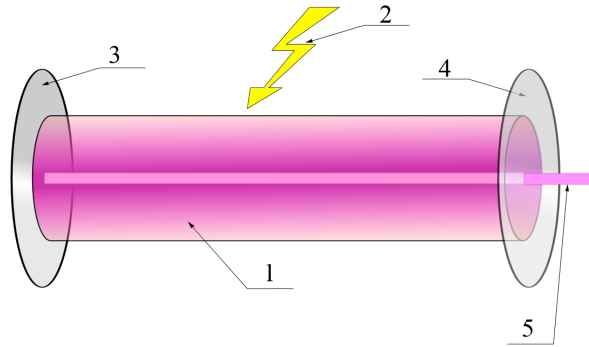
Aktivní prostředí funguje jako zesilovač - využívá principu stimulované emise.

Typickým aktivním prostředím jsou atomy určité látky - např. plynu, nebo se může jednat o krystal.

4.3 Rezonátor

Cílem rezonátoru je ponechávat paprsek světla v aktivním prostředí po delší dobu a tím poskytnout aktivnímu prostředí čas na znásobení množství záření. To vede k možnosti emise většího množství světla.

Typickým rezonátorem jsou zrcadla, která odrážejí světelný paprsek zpět do aktivního prostředí. Jedno ze zrcadel typicky bývá polopropustné a jedno zcela odrazné. Světlo, které unikne polopropustným zrcadlem z aktivního prostředí, je světlem, které produkuje laser a které například běžně vidíme.



Obrázek 3: Schéma laseru
[4]

1. Aktivní prostředí
2. Zdroj energie
3. Zrcadlo
4. Polopropustné zrcadlo
5. Výstupní svazek

5 Princip laseru

V této kapitole vysvětlím princip fungování všech základních částí laseru.

5.1 Zdroj energie

Cílem zdroje energie je dodat do aktivního prostředí monochromatické světlo, které ale nemusí mít stejnou fázi.

Ideálními kandidáty na takové zdroje jsou tedy například LED diody založené na polovodičovém principu, nebo výbojky založené na principu výboje v plynech. V obou případech se jedná o monochromatické světlo, jehož vlnová délka je v prvním případě dána konstrukcí LED diody a v druhém případě plynem mezi elektrodami.

Například v případě helium-neonového laseru dojde vlivem elektrického proudu k excitaci elektronů hélia, které pak září na určité vlnové délce. Helium je zvoleno právě proto, že má k dispozici jen s orbitaly a tudíž omezený počet přechodů mezi elektronovými vrstvami. Z toho plyne, že bude zářit na velmi málo vlnových délkách, konkrétně majoritně pouze na jedné.

Cílem zdroje energie je vyzářit fotony o takové vlnové délce, která odpovídá požadovaným přechodům v aktivním prostředí.

Zdroj energie je většinou neustále zapnutý a říkáme, že tzv. čerpá atomy aktivního prostředí - snaží se je neustále udržovat v excitovaném stavu (snaží se udržovat tzv. inverzi populace).

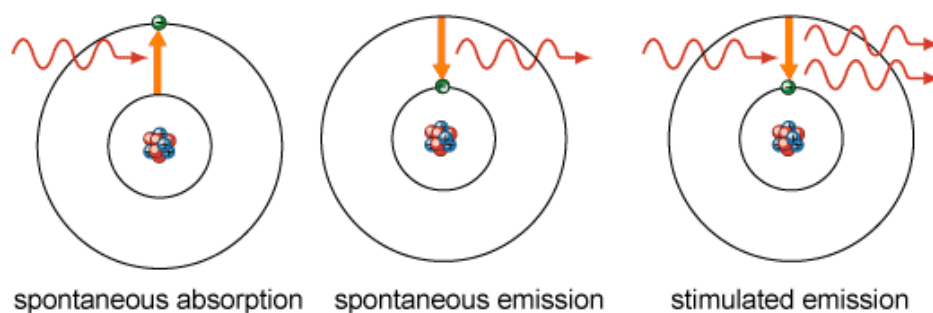
Zdroj energie může být od aktivního prostředí fyzicky oddělen, tudíž fotony ze zdroje

září směrem ke zdroji, nebo se může jednat o jednu látku - například v případě He-Ne laseru, kde jsou oba plyny v jedné trubici.

5.2 Aktivní prostředí

Aktivní prostředí se skládá z atomů, nebo sloučenin určité látky. Může se jednat jak o plyny, tak například o krystaly.

Atomy aktivního prostředí jsou neustále bombardovány fotony ze zdroje energie, které zajišťují, že v atomech aktivního prostředí dochází k excitacím. Zdroj energie se tedy neustále snaží udržovat co nejvíc atomů, potažmo elektronů, excitovaných. Pokud je velké množství elektronů excitovaných, mluvíme o tom, že v látce nastává tzv. inverze populace.



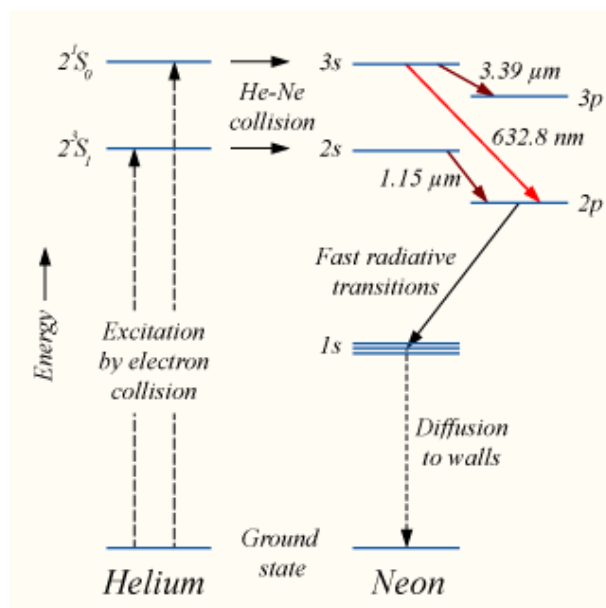
Obrázek 4: Kvantové jevy využívané v laseru

Uvažujme aktivní prostředí jako zesilovač: řekněme, že odněkud přiletí 1 foton s vlnovou délkou, kterou požadujeme na výstupu. Tento foton dopadne na libovolný atom, kde způsobí stimulovanou emisi, protože elektrony aktivního prostředí jsou neustále udržovány v excitovaném stavu. Z tohoto atomu pak vychází 2 fotony o stejné vlnové délce a fázi. Tyto 2 fotony interagují s dalšími dvěma atomy a jejich počet se opět zdvojnásobí. Takto se neustále násobí počet fotonů až nakonec vznikne monochromatické koherentní záření. Viz obrázek 4.

Otázkou už jen zbývá, kde vzít první foton. První foton se získává ze spontánní emise. Je nutné vybrat takovou látku aktivního prostředí, jejíž atomy mají vysokou pravděpodobnost spontánní emise na námi požadované vlnové délce.

Mějme tedy například atom neonu, u kterého momentálně nastala spontánní emise. Jak popisuje obrázek 5, po vyzáření fotonu na vlnové délce 632.8 nm je nutné, aby elektron spadl zpět do základní vrstvy, ze které ho načerpáme do vrstvy 3S (na obrázku vpravo). Říkáme, že elektron tzv. relaxuje v excitovaném stavu. Je tedy nutné, aby měl materiál aktivního prostředí dlouhou dobu životnosti na hladině, kde foton relaxuje - tedy na hladině, ze které září námi požadované fotony, a naopak krátkou dobu životnosti na ostatních hladinách (např. 2P v neonu u he-ne laseru), aby elektron rychle padal do základní hladiny a abychom ho mohli opět načerpat. Je tedy nutné vybrat atomy, popř. sloučeniny s vhodnými vlastnostmi, což je nelehká úloha pro kvantové a experimentální fyziky. Neon takovéto vlastnosti vykazuje a právě proto je využíván.

Když elektron padá z mezistavu zpět do základního stavu, opět samozřejmě emituje foton. Tento foton má ale náhodný směr a fázi, takže většinou unikne ven z aktivního prostředí a po cestě ještě interferuje s jiným fotonem.



Obrázek 5: Elektronové hladiny v helium-neonovém laseru [8]

Je samozřejmě jasné, že aktivní prostředí může být složeno z nejrůznějších komplikovaných sloučenin, u kterých je velmi obtížné stanovit jejich vlastnosti - např. střední dobu délky života na hladině, nebo pravděpodobnosti přechodů mezi jednotlivými hladinami. Proto se jednoduché atomy a jednoduché sloučeniny ukázaly jako vysoce účinné.

5.3 Rezonátor

Úkolem rezonátoru je vracet fotony vycházející z aktivního prostředí zpět do něj, aby byl paprsek co nejvíce zesílen.

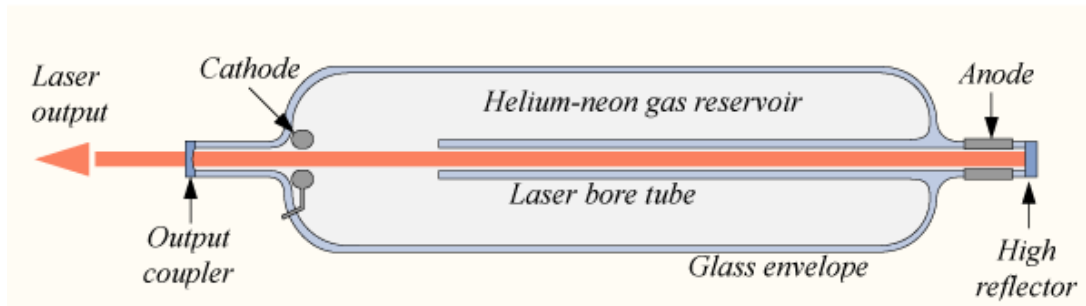
Jako rezonátor se využívá například zrcadlo, nebo, pokud je aktivním prostředím krystal, přímo lom na hranici krystal-vnější prostředí. Je důležité a typické, aby jedno ze zrcadel bylo polopropustné, aby konečně došlo k emisi záření z aktivního prostředí požadovaným směrem mimo laser.

Konstrukce rezonátoru je poměrně komplikovaná věc, v současnosti se využívá například sférických zrcadel, které zajišťují zacílení paprsků do středu zrcadel a tak vytváří pouze úzký svazek, který nakonec uniká do vnějšího prostředí.

Rovinná zrcadla mají problém: aby se paprsek udržel uvnitř rezonátoru, musí na zrcadla dopadat kolmo, což je velmi nepravděpodobný směr vzhledem k tomu, že první spontánní emise má náhodný směr. Může se tedy stát, že několik prvních fotonů ze spontánních emisí uniká mimo rezonátor nikoliv přes zrcadla, ale "do stran". To nám vcelku nevadí, protože při počtu atomů, které jsou v aktivním prostředí, dojde velmi brzo k vytvoření takovéto paprsku, který se odrazí od sférických zrcadel tak, že je zacílen do jejich středu a pak vychází ven správným směrem.

6 Využití laserů

Laser našel své uplatnění především v medicíně a průmyslu a to díky tomu, že se jedná o velmi koncentrovanou a sterilní energii.



Obrázek 6: Schéma helium-neonového laseru

Můžeme tak řezat nejrůznější materiály od anorganických, jako například dřevo, až po organické, jako například kůži.

Laser dokáže stimulovat mitochondrie a tak napomáhat k výrobě ATP. Důsledkem výroby ATP je rychlejší hojení rány.

Laserem lze také léčit například zelený zákal, kdy lékař posvítí paprsek na tzv. Shmeův kanálek, kudy je běžně odváděna voda z oka, a několika zásahy tento kanálek zvětší, čímž napomůže k odvodu vody a ke snížení očního tlaku.

Dalším využitím mohou být nejrůznější fyzikální experimenty s extrémními stavy hmoty - laser totiž umožňuje zacílení na velmi malý objem, kde dokáže vytvořit extrémní podmínky, jejíž studium má v dnešní fyzice poměrně velký význam.

7 Závěr

Pevně doufám, že tato práce splnila svůj účel a informovala o základních principech funkce laseru.

Bohužel to bylo bez nezbytné matematiky v pozadí kvantové fyziky, která je obtížná a která obvykle používá prostředky ve středoškolské matematice minimálně nezavedené.

Reference

- [1] Laserstarts.org
EINSTEIN'S LEGACY
<http://laserstars.org/history/einstein.html>
- [2] Wikipedia
Photoelectric effect
http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect
- [3] Albert Einstein (1917)
Zur Quantentheorie der Strahlung
http://www.ulp.ethz.ch/education/quantenelektronik/Paper_Einstein2.pdf/
- [4] Wikipedia
Laser
<http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>

- [5] Wikipedia
Excited state
http://en.wikipedia.org/wiki/Excited_state
- [6] Wikipedia
Stimulated emission
http://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated_emission
- [7] Wikipedia
Helium-Neon laser
http://en.wikipedia.org/wiki/Helium-neon_laser
- [8] <http://www.emred.fi/>
Helium-Neon energy levels
<http://www.emred.fi/images/hene-2.png>