

Obr. 11.17: Schéma opticky buzeného submilimetrového laseru

O_1, O_2 – okénka, Z_1, Z_2 – zrcadla, 1 – svazek budícího záření s frekvencí ν_{CO_2} , 2 – výstupní svazek laseru s frekvencí ν_s

Opticky buzené submilimetrové lasery mívají účinnost 0,1 až 1%. Vysílají impulsy záření o špičkovém výkonu jednotek kilowattů, v kontinuálním režimu se výkon pohybuje v rozmezí mikrowattů až miliwattů. Typickým představitelem submilimetrových laserů je laser s molekulami vody (H_2O), vysílající záření s vlnovými délkami 118,6 a 220,2 μm , nebo laser HCN s vlnovými délkami 331, resp. 337 μm .

Příklady ke kapitole 11:

- 11.1 Vysvětlete, jestli je náhodné, že svit z výboje v trubici $He-Ne$ laseru je podobný výstupnímu záření tohoto laseru.
- 11.2 Odhadněte hustotu elektronů v aktivním prostředí Ar laseru, kde hustota proudu v laserové trubici je 10^3 Acm^{-2} .
- 11.3 Jaký charakter rozšíření má křivka zesílení CO_2 laserů?

Kapitola 12

Plazmatické lasery

V plazmatickém laseru je inverze populace vytvářena uvnitř chladného plazmatu. V procesu *relaxace plazmatu* dochází za jistých podmínek k podstatně rychlejší depopulaci dolních energetických hladin než horních energetických hladin některých iontů nebo atomů. Mechanismus je obdobný jako u plynově dynamických laserů.

Experimentálně byla realizována celá řada plazmatických laserů s rozsáhlým spektrem vlnových délek výstupního záření. Nejvyšší součinitel zisku byl pozorován při laserových přechodech iontů argonu s vlnovou délkou 747 nm, iontů kadmia s vlnovou délkou 537,8 nm a rtuťi s vlnovou délkou 567 nm v rozpadajícím se plazmatu elektrického výboje.

Obecně plazma nemusí být vytvářeno elektrickým výbojem, ale i jinými způsoby, např.: (silnoproudým) elektronovým svazkem, produkty jaderných reakcí, chemickými reakcemi, nebo fokuzovaným laserovým zářením.

Plazmatické lasery s aktivním prostředím vytvořeným mnohonásobně nabitými ionty jsou jednou z cest k vytvoření rentgenového laseru.

Rentgenový laser je zdroj koherentního rentgenového záření. Pro laserovou činnost v této oblasti spektra je nutné aktivní prostředí budit tak, aby byla dosažena inverze populace hladin na energetických hladinách příslušejících vnitřním elektronovým slupkám atomů (iontů), nebo aby byla zajištěna excitace atomových jader.

Zrcadla s vysokou odrazivostí v oblasti vlnových délek 10 nm prakticky neexistují. Pro rentgenový laser přichází v úvahu konstrukce s dlouhým aktivním prostředím s vysokým součinitelem zesílení tak, aby výstupní záření bylo v podstatě *zesílenou spontánní emisí* ve směru osy aktivního prostředí.

Experimentálně byly realizovány rentgenové lasery s chladnoucím laserovým plazmatem vytvořeném na pevnolátkovém terči. Výstupní svazek vysokovýkonového impulsního laseru byl fokuzován cylindrickou čočkou na desku terče. Vzniklé plazma mělo tvar sloupce. Zesílená spontánní emise byla pozorována v oblasti expandujícího plazmatu ve směru osy sloupce.

Kapitola 13

Polovodičové lasery

13.1 Spektrum energií atomů v krystalech

Energie elektronů v atomech (iontech nebo molekulách) nabývají diskrétních hodnot, které si označujeme jako energetické hladiny. Energie těchto elektronů se může měnit uvnitř určitého intervalu, který nazýváme *pásem* nebo *zónou*. Každý energetický pás obsahuje konečný počet (obvykle řádově 10^{23} až 10^{24}) elektronových stavů. Zopakujme si, že elektrony náležejí k fermionům, tzn., že podléhají Pauliho výběrovým pravidlům, která říkají, že v každém kvantovém stavu může existovat pouze jeden elektron v daném kvantovém stavu. To znamená, že v každém stavu se mohou vyskytovat dva elektrony mající opačný spin. Dále platí, že elektron nemůže být excitován do vyššího stavu, pokud je tento stav obsazen jiným elektronem. Energetický pás je tedy buď úplně nebo částečně zaplněn, přičemž elektrony zaplňují energetické hladiny od nejnižších výše.

Elektrické vlastnosti pevných látek závisejí na uspořádání periodické krystalické mřížky atomů. Z kvantově mechanických výpočtů energetických hladin elektronů v periodické mřížce vyplývá, že dovolené elektronové stavy se vyskytují uvnitř definovaného pásu energií. Mezi těmito pásy existují energetické intervaly, které nejsou obsazeny žádnými elektrony. Nejnižší zaplněný pás se nazývá *pásem valenčním*. Nejbližší vyšší energetický pás dovolených

energií (v pevných látkách částečně nebo úplně prázdný) se nazývá pásem *vodivostním*. Jestliže je valenční pás úplně zaplněný a vodivostní pás je prázdný, potom je daná pevná látka *dielektrikem* nebo *polovodičem*. Látku definujeme jako dielektrikum, pokud vzdálenost valenčního a nejnižše položeného vodivostního pásu je tak velká, že teplotní excitace nemůže způsobit přechod elektronů do vodivostního pásu. Na rozdíl od toho, u kovů se buď valenční a vodivostní pásy překrývají, nebo vodivostní pás je částečně zaplněn, takže vlivem elektrického pole se elektrony mohou volně pohybovat, protože v okolí mají volné neobsazené stavy. Je-li energetický pás mezi valenčním a vodivostním pásem malý (kolem 2 až 3 eV nebo menší), potom termální excitace může převést elektrony z valenčního pásu do pásu vodivostního. Hodnota vodivosti v tomto případě leží mezi hodnotou pro *kov* a *dielektrikum* a látka se nazývá *polovodič*.

13.2 Polovodiče

Polovodičem označujeme látku charakterizovanou hodnotou vodivosti σ při pokojové teplotě takovou, že leží mezi hodnotami vodivosti kovů ($\sigma \simeq 10^6$ až $10^9 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) a dielektrik ($\sigma \simeq 10^{-10}$ až $10^{-12} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$). Polovodič se od kovu odlišuje kromě celkově menší vodivosti zásadně tím, že s rostoucí teplotou se jeho vodivost prudce zvětšuje, zatímco vodivost kovu naopak klesá. Polovodiče se dále vyznačují velkou citivostí některých fyzikálních parametrů na takové vnější vlivy, jako jsou změny teploty, tlaku, osvětlení aj. Vlastnosti polovodičů vysvětluje pásová teorie pevných látek. Vysoce vyčištěné polovodiče vykazují tzv. vlastní vodivost.

Při teplotě absolutní nuly je vodivostní pás neobsazený a je oddělen zakázaným pásem od zaplněného valenčního pásu – vodivost polovodiče je nulová. S růstem teploty jsou elektrony tepelně excitovány a přejdou z valenčního do vodivostního pásu. Ve valenčním pásu bude existovat nenaplněný stav – tzv. *díra*. Díra má tytéž vlastnosti jako elektron s výjimkou toho, že představuje

kladný náboj. V přítomnosti elektrického pole se díry pohybují ve směru pole, tak jako kladně nabitě částice. K elektrické vodivosti přispívají tedy jak elektrony ve vodivostním pásu, tak i díry v pásu valenčním. Vlastní vodivost a vlastní koncentrace nosičů závisejí podstatně na poměru šířky zakázaného pásu E_g k teplotě (tj. na hodnotě výrazu E_g/kT , kde k je Boltzmanova konstanta). Je-li tento poměr veliký, bude koncentrace vlastních nosičů malá a vodivost bude nízká a naopak.

Obvykle polovodiče chápeme v užším smyslu slova jako soubor látek, ve kterých se polovodičové vlastnosti projevují už při pokojové teplotě. Takové látky potom dělíme na tři základní skupiny:

1. *Prvky IV skupiny periodické soustavy*. Jejich představiteli jsou *germanium Ge* a *křemík Si*. Atomy těchto elementů mají čtyři valenční elektrony a vytvářejí krystalickou mřížku typu diamantu s kovalentní vazbou atomů.
2. *Polovodiče podobné diamantu* - skupina $A^{III}B^V$. Patří k nim spojení prvků III skupiny periodické tabulky (*Al, Ga, In*) s prvky V skupiny (*P, As, Sb*). Jsou to např. polovodiče *GaAs, InSb, GaP, InP*. Atomy třetí skupiny mají tři valenční elektrony a páté skupiny mají pět valenčních elektronů, tzn., že střední počet valenčních elektronů na jeden atom v těchto spojeních jsou čtyři elektrony. Každý atom vytváří čtyři valenční vazby s okolními sousedy, výsledkem čehož je vytvoření krystalické mřížky podobné mřížce diamantu pouze s tím rozdílem, že nejbližšími sousedy atomu A^{III} je atom B^V a atomu B^V atom A^{III} . Díky této struktuře jsou atomy v těchto materiálech rovnoměrně nabitě, ovšem vazby jsou kovalentní a iontové. Kovalentní vazba ovšem převládá, a proto určuje jejich strukturu, v důsledku čehož jsou tyto krystaly podobné germaniu a křemíku.

Dále do této části patří spojení elementů II a VI skupiny periodické tabulky $A^{II}-B^{VI}$. Příkladem jsou *ZnTe, ZnSe, CdTe, CdS* atd. Také tyto elementy mají středováním čtyři valenční elektrony na jeden atom.

Vlastnosti polovodiče u nich nejsou tak výrazné. Představa o čtyřvalenčnosti nebo diamanto-podobnosti se ukázala správná při hledání dalších polovodičů. Byly nalezeny skupiny typu $A^{II}-B^{VI}-C_2^V$. Příkladem takových polovodičů jsou např. $ZnSnP_2$, $CdGeAs_2$.

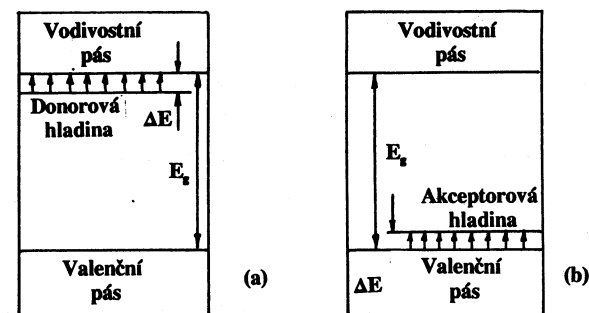
3. *Prvky VI a V skupiny a jejich analogy.* Prvky VI skupiny jsou *Te* a *Se*. Byly jako polovodiče známy dříve než *Ge* a *Si*. Prvky V skupiny (např. *As*, *Sb*, *Bi*) jsou polokovy, ale vlastnostmi blízké polovodičům. Sloučeniny typu $A^{IV}B^{VI}$ (*PbS*, *PbSe*, *SeTe*, *GeTe*) mají středováním pět valenčních elektronů na jeden atom a lze je použít pro konstrukci detektorů infračerveného záření. Pokud se vytvoří sloučeniny prvků VI skupiny s přechodovými kovy (*Ti*, *V*, *Mn*, *Fe*, *Ni*, *Sm*, *Eu*), pak u nich už převládá iontová vazba.

Všechny tyto polovodiče bez příměsí, které vykazují vlastní vodivost, nazýváme čisté polovodiče. Mají stejný počet vodivostních elektronů a děr.

13.2.1 Příměsové polovodiče typu P a N

Velmi důležitou vlastností polovodičů je, že některé příměsí a poruchy výrazně ovlivňují jejich elektrické vlastnosti především elektrickou vodivost (polovodiče pak vykazují tzv. příměsovou vodivost). V polovodičových sloučeninách působí jako příměs také stechiometrický nedostatek jedné složky. Záměrné přidávání příměsí do polovodiče se nazývá *legování* nebo *dopování*. Protože součin koncentrace elektronů N a děr P je při dané teplotě konstantní a nezávisí na hustotě příměsí, musí zavedení vhodných příměsí zvyšujících hodnotu N způsobit zmenšení P. Ve znečištěném krystalu můžeme tedy snížit — a to někdy velmi podstatně — celkovou koncentraci nosičů N+P řízeným přidáváním vhodné příměsí. Taková redukce se nazývá kompenzace příměsí jednoho typu přidáním příměsí jiného typu. Příměsové atomy — dopanty jsou dvojího typu. *Donory* jsou nečistoty typu N a dodávají do vodivostního pásu krystalické mřížky daného materiálu elektrony. Jsou to tedy příměsové ato-

my, které mohou uvolňovat elektrony. Opačný typ dopantů jsou *akceptory*, které mohou přijímat elektrony z valenčního pásu a tedy zanechávají v tomto pásu díry. Jsou-li atomy donorů přítomny v podstatně větším počtu než atomy akceptorů, z hlediska elektrické vodivosti budou převažovat tepelnou ionizací donorů uvolňované elektrony — polovodič se bude nazývat typu N (nebo polovodič s elektronovou vodivostí). Převládají-li akceptory, budou do valenčního pásu uvolňovány díry a vodivost bude ovládána děrami — polovodič se bude nazývat typu P (nebo polovodič s děrovou vodivostí). Dopanty způsobují změnu energetického diagramu daného prostředí. V zakázaném pásu se vyskytují nové hladiny dané těmito „nečistotami“. Obr. 13.1a) ukazuje schéma energetických hladin materiálu typu N, obr. 13.1b) materiálu typu P. Vzdálenost donorové hladiny od vodivostního pásu je ΔE . Tato hodnota je řádově 0,01 eV, což je jedna setina hodnoty šířky zakázaného pásu E_g . To, že ΔE je malé, znamená, že elektrony v donorové hladině jsou slabě vázány k atomu a stačí malá tepelná excitace, aby přešly do vodivostního pásu.



Obr. 13.1: Schema energetických hladin polovodičového materiálu

a) typu N; b) typu P

Předpokládejme, že máme polovodič typu N při teplotě 0 K. Při dostatečně velké koncentraci nečistot v materiálu (nejméně 10^{18} cm^{-3}) se polovodič nazývá vysoce dopovaný. Protože $\Delta E < E_g$, první přechody při zvýšení

teploty budou probíhat z donorového pásu do pásu vodivostního. Zatímco přechody z valenčního pásu do pásu vodivostního téměř za této teploty ještě neexistují. Při teplotě 20 až 50 K bude donorová hladina vyprázdněna a všechny elektrony budou převedeny do vodivostního pásu.

Akceptorové atomy vytvářejí akceptorovou hladinu vzdálenou od valenčního pásu o energetický interval ΔE . Malá tepelná excitace převádí elektrony z valenčního pásu na akceptorovou energetickou hladinu. Tato hladina je tedy satureována při teplotách 20 až 50 K. Elektrony, které opouštějí valenční pás, ponechávají za sebou díry, které vytvářejí vysoce dopovaný materiál typu P.

Mezi polovodiče patří celá řada anorganických krystalických látek, ale i některé látky amorfní. V poslední době byly připraveny i různé organické polovodiče a předpokládá se i větší možnost využití kapalných polovodičů.

13.3 Laserová činnost

Na kvantové přechody elektronů do nejnižšího vodivostního pásu se můžeme dívat jako na generaci páru elektronu a díry. Elektron se ve vodivostním pásu snaží obsadit nejnižší volný stav, zatímco díra se snaží obsadit nejvyšší stav ve valenčním pásu. Při zpětném přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu dochází k *rekombinaci* páru elektron–díra [?].

Předpokládejme, že na polovodičový materiál dopadají fotony, jejichž energie je rovna nebo větší než energetický interval zakázaného pásu tohoto materiálu. Takový foton může být absorbován elektronem obsazujícím horní hladinu valenčního pásu a způsobí jeho přechod do vodivostního pásu. Stejná pravděpodobnost existuje pro opačný proces, ve kterém elektron obsazující hladinu vodivostního pásu je iniciován fotonem k přechodu do pásu valenčního. V tomto případě dochází k rekombinaci páru elektron–díra a je vyzářena energie rovná energetickému rozdílu těchto dvou hladin. Tento vyzářený sekundární foton má stejný stav jako foton přicházející. Zatím, co v prvním případě došlo k absorpci fotonu polovodičem, nyní dochází ke stimulované

emisi. Pokud elektron přejde samovolně z vodivostního do valenčního pásu, dochází k emisi spontánní.

Termální excitace polovodiče způsobuje, že pouze velmi malý počet elektronů přechází z valenčního do vodivostního pásu, koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je tedy velmi nízká. Tzn., že za normálního stavu procesy absorpce světla dominují nad procesy emise. Aby polovodičový materiál mohl zesilovat dopadající světelné záření, musí být vytvořen inverzní stav obsazení hladin s koncentrací elektronů v dolních hladinách vodivostního pásu větší než v horních hladinách pásu valenčního, tzn., s větší koncentrací děr v tomto pásu. Polovodiče, ve kterých je vytvořeno toto obsazení hladin, se nazývají degenerované. Tyto polovodiče dělíme na polovodiče typu P a N. Polovodiče čisté (bez příměsí) mohou být degenerované v N i v P typu pouze současně.

Funkce polovodičového laseru je založena na vzniku stimulované emise záření v aktivním polovodičovém materiálu při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu na existenci zářivé rekombinace nosičů náboje (elektronů a děr).

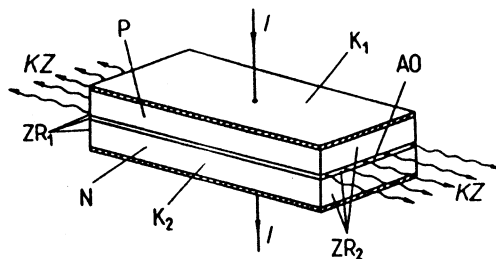
Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány, mohou v aktivním prostředí difundovat a driftovat. Na rozdíl od ostatních laserů pracovní (zářivý) přechod v polovodiči neexistuje mezi diskrétními energetickými hladinami, ale mezi dovolenými energetickými pásy. V polovodičovém aktivním prostředí je možné dosáhnout velkého optického zesílení (až 10^4 cm^{-1}). Vzhledem k tomu jsou rozměry aktivního elementu polovodičového laseru mnohem menší než u ostatních laserů (délka rezonátoru $\simeq 50 \mu\text{m}$ až 1 mm).

Pro generaci koherentního záření je zapotřebí zajistit, aby se v aktivní oblasti laseru dosáhlo inverze populace a dále, aby vznikla kladná zpětná vazba.

Inverze populace se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje přechodem P-N (injekční laser), obecně lze však použít i jiných prostředků buzení jako

např. optického, elektronového svazku, lavinového jevu v polovodičích.

Kladná zpětná vazba se vytvoří obvykle úpravou struktury polovodičového laseru do tvaru otevřeného planparalelního rezonátoru ohraničeného dvěma polopropustnými zrcadly (viz obr. 13.3) Vzhledem k rozdílu lomu na rozhraní krystal-vzduch je zajištěn dostatečný činitel odrazu takto vytvořených zrcadel rezonátoru.



Obr. 13.2: Schematické uspořádání polovodičového laseru

N – polovodič s vodivostí N; P – polovodič s vodivostí P; $K_{1,2}$ – kontakty; I – protékající proud; AO – aktivní oblast; KZ – koherentní záření, $ZR_{1,2}$ – rovinné čelní plochy s opticky lesklým povrchem (kolmé na osu struktury a navzájem rovnoběžné)

Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velký zisk (až 50%), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek od $\lambda = 0,3 \mu\text{m}$ až po $\lambda = 30 \mu\text{m}$. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu.

Chlazení je jedním z vážných problémů polovodičových laserů. Zvýšení teploty způsobuje přechod elektronů na vyšší energetické hladiny vodivostního pásma, čímž se snižuje koncentrace elektronů v blízkosti valenčního pásu.

Tentýž proces zvyšuje také koncentraci elektronů v horních hladinách valenčního pásu, čímž se snižuje hodnota inverzního obsazení hladin. Toto vše vede ke snížení zisku, k rostoucím ztrátám a k potřebě vyššího prahového výkonu laseru.

Z hlediska rozbíhavosti je záření soustředěno do úzké oblasti P-N přechodu (řádově μm). Vzhledem k malým rozměrům svazku difrakce potom vede k velké rozbíhavosti výstupního paprsku. Světlo s délkou vlny λ procházející štěrbinou o šířce a se rozptýlí do úhlu θ , pro který platí:

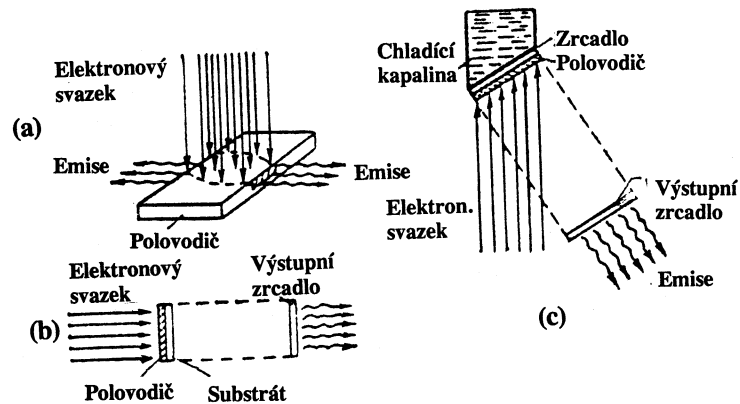
$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}. \quad (13.1)$$

(Úhel θ – úhlová vzdálenost od středu difrakčního obrazu do 1. difrakčního minima). Pro obvyklý polovodičový laser, např. *GaAs* je šířka štěrbin $a = 6 \mu\text{m}$, pro generovanou vlnovou délku $\lambda = 900 \text{ nm}$ potom plyne: $\sin \theta = 0,1$ a $\theta = 8,60^\circ$. Tato hodnota rozbíhavosti je velká ve srovnání s rozbíhavostí laserů jiných typů. Vějířovitý svazek je charakteristický pro všechny polovodičové lasery a je spolu s velkou teplotní závislostí hlavní nevýhodou polovodičových laserů.

13.3.1 Polovodičový laser buzený svazkem elektronů

Polovodičový laser s aktivním prostředím tvořeným vlastním polovodičem může být buzen fotony, jejichž energie je rovna nebo je větší než energie zakázaného pásu. Mnohem častěji je místo fotonů užito k buzení svazku elektronů. Rychlé elektrony (50 až 100 keV) procházejí polovodičovým vzorkem a iniciují přechody z pásu valenčního do pásu vodivostního. Mezi takto buzené aktivní materiály patří galium arsenidový (*GaAs*) polovodičový laser, kadmium sulfidový (*CdS*) a kadmium selenidový (*CdSe*) polovodičový laser. Více než polovina energie elektronového svazku je ztracena a vede k ohřevu polovodičového čipu. Proto se takové buzení z teplotních důvodů provádí většinou pulsně. Teplotní závislost je natolik velká, že pro mnoho polovodičů je práh generace za normálních teplot takový, že generace nemůže vzniknout.

Tyto polovodičové lasery generují záření pouze při nízkých teplotách. Např. *GaAs* lasery se chladí na 80 K. Některé systémy *CdS* a *CdSe* pracují pouze při teplotě kapalného helia (4,2 K).



Obr. 13.3: Polovodičové lasery buzené elektronovým svazkem

Na obr. 13.3 je ukázáno několik uspořádání při buzení polovodičových laserů svazkem elektronů. *Elektronový svazek* může dopadat na polovodičový čip buď kolmo, nebo paralelně k emitovanému záření. V případě 13.3(a) svazek elektronů dopadá kolmo na plochu polovodičového čipu vybroušeného do tvaru kvádrů. Dvě plochy rovnoběžně se směrem dopadu elektronového svazku jsou vybroušeny podél přírodních krystalických rovin a tvoří zrcadla otevřeného rezonátoru 13.3(a). Při podélném buzení 13.3(b) laser užívá externí zrcadla vytvářející otevřený rezonátor. V tomto případě je aktivním prostředím tenká vrstva polovodičového materiálu nanesená na průhledném transparentním substrátu s velkou tepelnou vodivostí (např. na safíru). Další uspořádání je na obr. 13.3(c), kdy elektronový svazek dopadá na chlazenou vrstvu polovodiče v určitém úhlu k ose rezonátoru. Příkladem takového laseru je kadmium sulfidový laser (*CdS*). Generuje záření s vlnovou délkou $\lambda = 0,49 \mu\text{m}$ s účinností 25%. Prahová proudová hustota je $0,4 \text{ Acm}^{-2}$ při

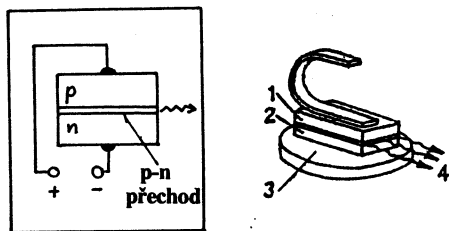
80 K a $0,03 \text{ Acm}^2$ při 4,2 K. Energie svazku elektronů je 60 keV.

13.3.2 Injekční polovodičové lasery

Ve většině případů je *aktivní materiál* polovodičových laserů složen z polovodiče typu P a N. Polovodiče vytvářejí tzv. P-N přechod. *Buzení* je v tomto případě prováděno přiložením elektrického pole k polovodičovému přechodu. *Rezonátor* je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Vlivem elektrického pole jsou vodivostní elektrony injektovány do oblasti přechodu z oblasti polovodiče typu N, zatímco díry jsou do oblasti přechodu injektovány ze strany polovodiče typu P. V P-N přechodu elektrony a díry rekombinují při současné emisi záření. Odrazem od zrcadel otevřeného rezonátoru a mnohanásobným přechodem oblastí přechodu vzniká laserové záření.

Polovodičové lasery generující na P-N přechodu polovodiče se nazývají injekčními polovodičovými lasery. Nejznámějším je *GaAs* polovodičový čip. Oblast typu N je dosažena dopováním galia telurem (*Te*) v koncentracích $3 \cdot 10^{18}$ až $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, zatímco stupeň degenerace P oblasti je dosažen dopováním materiálu zinkem (*Zn*) v koncentraci kolem 10^{19} cm^{-3} . Laser generuje záření v blízké infračervené oblasti na vlnové délce v okolí $\lambda = 0,82$ až $0,9 \mu\text{m}$. Na obr. 13.4(b) je příklad takového injekčního polovodičového laseru. Leštěné konce čipu seříznuté v pravém úhlu k přechodu P-N hrají roli zrcadel otevřeného rezonátoru. Celkový laser je velmi malý, jeho rozměry jsou pouze 1 mm. Tloušťka P-N přechodu je $2 \mu\text{m}$. Výstupní výkon v kontinuálním provozu je kolem 10 mW, v impulsním provozu je dosaženo výkonu 100 W. Největšího výstupního výkonu a nejlepší účinnosti bylo dosaženo s *GaAs* polovodičovým laserem chlazeným na teplotu kapalného helia.

Polovodičové lasery s injekčním buzením jsou nejlevnější a nejmenší lasery. Vzhledem k tomu, že výroba polovodičových součástek je dnes velmi dobře zvládnuta, lze i tyto lasery dobře průmyslově vyrábět. V současné době mají velký komerční význam především pro aplikace v počítačové technice a v sa-



Obr. 13.4: Injekční polovodičový laser

motné technice laserů, protože jsou využívány jako zdroje záření pro buzení pevnolátkových laserů. Pevnolátkové lasery se tím stávají mnohem kompaktnější a s tímto buzením konkurují laserům barvivovým a plynovým. Účinnost polovodičových laserů dosahuje 50 až 60%.

Příklady ke kapitole 13:

- 13.1 Co je výhodnější pro zvýšení účinnosti polovodičového laseru – zvýšení nebo snížení teploty?
- 13.2 Jaký je vliv změny teploty na spektrum zesílení polovodičového laseru?

Kapitola 14

Aplikace laserů

Laser se za dobu třiceti let od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů [20]. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, při různých technologických operacích ve výrobě, v astronomii, geodesii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, v energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, ve vojenské technice, v automatizaci a dálkovém řízení. Podívejme se na některé z těchto aplikací.

14.1 Lasery v medicíně

Léčivou moc slunečních paprsků znali lidé odedávna. Moudrost, že slunce léčí lidské nemoci, se traduje již ze starověku a uctívání Slunce jako boha přinášejícího zdraví je pravděpodobně staré jako lidstvo samo. Teprve koncem osmnáctého století začaly být soustavně shromažďovány údaje o vlivu slunce na lidský organismus. Podnětem k tomu byly významné objevy v oblasti optiky. Bylo zjištěno, že sluneční světlo obsahuje celý soubor viditelných barev. Brzy na to se ukázalo, že ve slunečním spektru jsou obsaženy i neviditelné barvy — infračervená a ultrafialová. Před medicínou vyvstal úkol objasnit, jak všechny tyto druhy viditelného i neviditelného záření působí na člověka. V roce 1940 německý oftalmolog Gerd Meyer-Schwicherath ukázal, že světlo (bylo to směrované a koncentrované sluneční záření) může být užito k léčení