**Zdroje světla**

Budeme se zabývat pouze a jedině zdroji pro optické komunikace, to znamená LED a LASER.

K tomu nejdříve musíme pochopit pásmový model

Nastudujeme si Bohrův model atomu ( to je ten, u kterého obíhají elektrony kolem jádra ) <http://artemis.osu.cz/mmfyz/am/am_1_5.htm> Vzorečky můžete vynechat. Zhruba uprostřed jsou slupky , to je v podstatě vzdálenost elektronu od jádra. Dole vidíte atomy s několika elektrony. Na základě Pauliho vylučovacího principu se musí každý elektron od druhého něčím lišit, buď slupkou, nebo ....... doplňte si na základě znalostí z Fyziky

Vzdálenost od jádra, tedy slupka, odpovídá energii elektronu.

Pásmový model je závislost energie elektronu na jeho (toho elektronu) poloze v prostoru .

A dál nečtěte, dokud tuto větu nepochopíte a nezažijete



Na svislé ose je energie elektronu v J (později uvidíme, že existují lepší jednotky) , na vodorovné ose je vzdálenost od nějakého referenčního bodu. Energie je závislá na poloze v prostoru. To znamená, že bychom potřebovali tři osy , x,y,z . A další osu na tu energii. Na papír je tohle nenakreslitelné. Proto se běžně používá jenom řez, ze tří os prostoru máme na papíře nakreslenou jenom jednu - x . Pásmový model se samozřejmě používá pro různé výpočty , v počítači není problém udělat čtyřrozměrné pole, ale na papír to rozumně nejde.

Mějme teď atom vodíku. Ten má (sem dosaďte kolik) elektronů. Tímto atomem vodíku budeme pohybovat ve vakuu, aby na něj nic nepůsobilo. Energie elektronu(ů) bude tedy v závislosti na prostoru ...... , Nakreslete si to ! A teprve potom přejděte na další stránku

Pásmový model izolovaného atomu vodíku



Nakreslili jste doufám tohle. Ještě jednou se podíváme a ukážeme si prstem: tady je vzdálenost .... tady je energie ... a vidíme, že energie v závislosti na vzdálenosti je ......

Já fakt vím, proč se to máte teď naučit. Občas se stane ( a to nejen u studentů, ale i na konferencích ! ) že někdo ukazuje krásné grafy ,a přitom vůbec netuší, co ty grafy znamenají .

Když si teď vezmeme jeden atom hélia, a ve vakuu, tak jeho pásmový model bude vypadat takto:



Proč ? No má dva elektrony !

Odbočka: lepší jednotka pro energii

Joule pro energii je sice hezká fyzikální jednotka, ale pro energii elektronu nepoužitelná, neb je příliš velká. Proto používáme jinou jednotku – elektronvolt Ev . Je to energie, kterou dostane (nebo ztratí) elektron, když překová rozdíl potenciálů 1V. Máme tedy ve vakuu dvě elektrody . Mezi nimi je napětí 1V. Elektron vyletí z jedné elektrody a dopadne na druhou. Přitom získá energii 1 eV. Je přitom úplně jedno, po jaké dráze se ten elektron pohybuje. Jeho energie závisí pouze na napětí mezi elektrodami. Pole s touto vlastností se nazývá potenciální. Elektrostatické pole je pole potenciální.

No a teď - kolik joulů je 1EV ? Připomeneme si známou rovnici W = U.Q Q je samozřejmě náboj elektronu, U je 1V , a dosadíme !

1eV = ........ J . Spočítat a napsat.

A dále pokračujeme s pásmovým modelem. My samozřejmě potřebujeme polovodič, jako je křemík, galium, germanium ...... To jsou pevné látky s množstvím elektronů. Naštěstí nás zajímají pouze ty elektrony, které jsou ve valenční slupce . Ty pod nimi mají jenom nepatrný vliv na chování polovodiče. Další věc je, že platí Pauliho vylučovací princip. To znamená, že elektrony v atomech, které jsou blízko, nemohou mít stejnou energii. Vezměme si pět atomů. a dejme je ve vakuu blízko sebe. Pásmový model pak bude vypadat takto:



Je tam pět různých energií, máme pět atomů hodně blízko sebe. Protože se ta pětice může v prostoru pohybovat kamkoli a nic na ni nepůsobí, je závislost energie na vzdálenosti přímka, energie je stále stejná.

No a teď si už vezmeme doopravdický kus křemíku nebo jiného polovodiče. Ten má mnoho atomů natlačených u sebe. Takže budeme mít strašně moc čar, které budou hodně blízko u sebe. Tohle se nedá nakreslit, a hlavně, žádnou metodou se nedají rozlišit energie, které jsou hodně blízko u sebe. Nakreslíme proto pás nebo pásmo , odtud pásmový model



Opět je ro závislost energie elektronu na poloze atomu ! Pokud máme homogenní kus křemíku, jsou všechny atomy stejné, takže když se pohybujeme tím krystalem (osa x) , tak jsou energie stále stejné.

Již dříve jsme řekli, že nás budou zajímat pouze elektrony, které jsou ve vazební slupce, tedy ty nejvzdálenější od jádra. Ty mají samozřejmě nějakou energii a pás jejich energií se nazývá valenční pás. Pokud se elektron urve z vazby a začne se pohybovat krystalem, vede proud. Takovýto elektron má samozřejmě větší energii než elektron valenční, proto je vodivostní pás nad valenčním.



A stále si dokola opakujeme, že na vodorovné ose je poloha elektronu, na svislé je jeho energie.

Uprostřed je takzvaný „zakázaný pás“ . To jsou energie, které elektron nemůže mít. V literatuře najdete mnoho tvrzení typu „elektron přeskočí zakázaný pás ... elektron nemůže být v zakázaném pásu ....“ Tohle všechno si stále překládejte do „energie elektronu se skokem zvětší ..... elektron nemůže mít energii.....“

Podle šířky zakázaného pásu se látky dělí na:

**Nevodiče** – zakázaný pás je široký > 5eV (to jsem vygooglil, snad). Protože zakázaný pás je široký, potřebujeme velkou energii k tomu, aby se elektron urval z vazby a toulal se matriálem, tedy potřebujeme velkou energii k tomu, aby látka začala vést elektrický proud. To znamená, že nevodič proud nevede, ale dá se prorazit – např. vysokým napětím dodáme elektronům energii, a ty pak překonají zakázaný pás.

**Polovodiče** - zakázaný pás je široký < 3 eV Látka vede, ale potřebuje k tomu dost energie, zejména tepelné

**Vodiče** – valenční a vodivostní pás se stýkají nebo překrývají. To znamená, že se elektron bez problémů utrhne z vazby a toulá se materiálem – tohle je typické pro kovy. Tady ani nelze odlišit, které elektrony jsou právě vazební a které jsou vodivostní – kov se maluje jako krystalová mřížka s jádry atomů, a kolem je „elektronový plyn“ , který se bez problémů pohybuje kolem jader. Proto kov vede. A ještě jednou, v pásmovém modelu se tato situace nakreslí tak, že valenční a vodivostní pás se stýkají nebo překrývají.

Podívejte se na

<http://z-moravec.net/elektronika/zaklady-fyziky-polovodicu/pasova-teorie-pevnych-latek/> Na tomto odkazu si prostudujte a zapište pojem “Fermiho hladina”

a na

<https://www.itnetwork.cz/images/6837/elektro/pasmovy_model.png>

A ohledně Fermiho energie tohle – je to lepší !

<http://atmilab.upol.cz/vys/fermi.html>

A potom ještě kolega Reichl

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/770-model-elektronoveho-plynu>

Nás ale zajímají polovodiče. A to polovodiče nevlastní, tedy ty , do kterých jsme přidali donory nebo akceptory ( tohle umíte ! )

<http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/primes_polovodic.html>

Tím, že jsme do čistého polovodiče přidali nečistoty – donory, vznikla v pásmovém modelu další hladina – hladina donorů.



Uvnitř zakázaného pásu je další hladina – donorová hladina. To znamená: elektron nemůže mít energii odpovídající energiím v zakázaném pásmu, kromě jedné energie, která odpovídá donorové hladině. Zakázaný pás je u Si 1,1 eV, u Ge 0.76 eV. A donorová hladina je od spodku vodivostního pásma vzdálena 0,01 eV. To znamená, že stačí takhle malinká energie, a elektron se urve a putuje krystalem, tedy vede. Je také jasné, že obrázek v žádném případě není v měřítku, protože ta 0.01 eV by tam vůbec nebylo vidět.

Ohledně polovodiče typu P jsem na Internetu nenašel obrázek, který by mě uspokojil. Takže jenom text. Do intrinzistního polovodiče přidáme trojmocný prvek – akceptor. Oprašte Mendělejevovu tabulku a podívejte se, co to může být. Atomy krystalu polovodiče jsou uspořádány v krásné čtvercové mřížce. Normálně je tam křemík ( nebo jiný 4 mocný prvek , ale pracujme s křemíkem ). Mz do toho nacpeme nečistotu ( v poměru asi 1:1000000 ). Takže občas v té krásné krychlové mřížce je místo 4 mocného křemíku 3 mocná nečistota. No jo, ale všude kolem jsou 4 mocné křemíky, které touží po vazbě s okolím (???? to si někde nastudujte – kovalentní vazba znamená, že dva elektrony vytvoří společný orbit a obíhají okolo dvou jader, alespoň v teminologii Bohrova modelu . K tomu si přečtěte třeba <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/765-vazba-kovalentni> ) Takže tam potom chybí jeden elektron a převládne kladný náboj jádra. Ale kladný náboj přitahuje okolní elektrony ! Takže shltne nějaký elektron z okolního křemíku, ale tím ten okolní křemík o jeden elektron přijde a je zase v tomto místě kladný náboj. Ten urve elektron z okolního křemíku ................. Ono to tedy vypadá, jako by se tím krystalem pohyboval kladný náboj. A dá se s tím tak reálně počítat. Ve skutečnosti se ale opět pohybují jenom elektrony. Tomuhle se říká díra. Pohyblivost děr je tedy menší než pohyblivost elektronů kvůli komplikovanějšímu způsobu vzniku díry.

A tenhle odkaz mi přijde dost dobrej !

<http://www.skriptum.wz.cz/fyzika/polovod.htm>

V pásmovém modelu tím přibude hladina akceptorů



Zakázaný pás je stejně široký jako nahoře , jenom jsem upravil měřítko, aby bylo alespoň trochu vidět, že hladina akceptorů je hodně blízko valenčnímu pásu. Opět je asi 0,01 eV od valenčního pásu. Vodivost tady je jinak , a je to pro mě záhada. Elektron přejde z valenčního pásma na hladinu akceptorů, tím zahltí díru, (až sem to bez problémů chápu ) a tím to nějak vede proud (a tady je už to pro mne záhada, zkuste googlit)

Pokročíme dál: v jednom krystalu uděláme oblast s typem vodivosti N ( znečistíme to donory ) a druhou oblast s typem vodivosti P(znečistíme to akceptory). Správně, tím vznikne .................. . Protože je to všechno v jednom krystalu a nepůsobí na to žádné vnější vlivy, vyrovnají se Fermiho hladiny tak, že jsou všude v celém krystalu na stejné úrovni (tohle by vám vysvětlil nějaký fyzik, já nevím, proč ). Teď si vystřihněte pásmový model polovodiče N a pásmový model polovodiče P , a dejte si je vedle sebe tak, aby Fermiho hladiny byly na stejné úrovni.

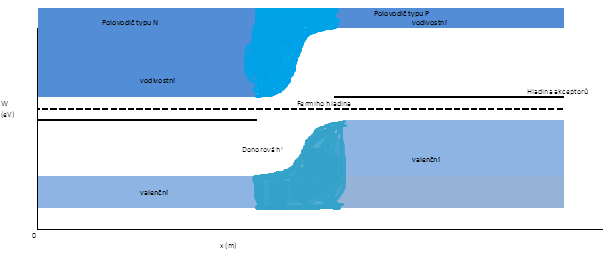
A na další stránku se podívejte, až to uděláte

Mělo by to vypadat nějak takhle:



Tohle samozřejmě není celé, valenční a vodivostní pás je i v místě, kde přechází N v P . Tady to máte zatím jenom posazené vedle sebe.

A tady jsem se pokusil domalovat ty pásy – valenční a vodivostní. Netrefil jsem odstín, smůla.



Takže takhle vypadá pásmový model přechodu P-N, pokud ta dioda leží na stole a nic s ní neděláme. Stále si opakujeme: na svislé ose je energie elektronu, na vodorovné je poloha v krystalu. To modré jsou energie, kterých může elektron nabývat, mezi nimi je zakázaný pás .

A teď musíme udělat odbočku.

**Energie fotonu**

je dána pouze a jedině jeho kmitočtem (kmitočtem toho fotonu).

W = f \* h

W – energie

f – kmitočet

h – Planckova konstanta

hvězdička mezi – násobení

Planckova konstanta se většinou značí jako h přeškrtnuté, někde si to najděte, já to neumím napsat.

Nyní si vypočteme tabulku

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| barva | vlnová délka | kmitočet Hz | energie J | energie eV |
|  | 1310 nm |  |  |  |
|  | 1550 nm |  |  |  |
|  | 1620 nm |  |  |  |
| R |  |  |  |  |
| G |  |  |  |  |
| B |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Jen hezky počítejte ! výsledkem je energie fotonu v elektronvoltech , mělo by to vyjít nějaké jednotky eV

Dále na diodu přivedeme napětí v propustném směru. Protože teď už krystal není v rovnováze, posunou se Fermiho hladiny o hodnotu e \* U

posuv = e \* U

e – náboj elektronu

U – napětí na přechodu

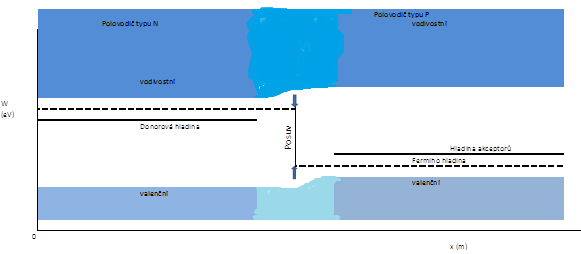
hvězdička – násobení

Na obrázku to máte okótováno jako „posuv“



Posuv je samozřejmě energie, je to na svislé ose.

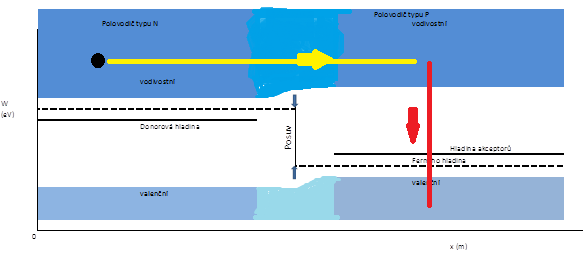
Na dalším obrázku jsem vám opět vybarvil pásy v oblasti přechodu. Vidíme, že když elektron přechází z oblasti N do P, má stále stejnou energii. Nic mu tedy nebrání přejít přes přechod, no a dioda vede.



Budeme si nyní myslet, že máme křemíkovou diodu. Hladina donorů je skoro u vodivostního pásu, hladina akceptorů je skoro u valenčního pásu. Pokud má dioda vést proud, musí být oba pásy v polovodiči N i P téměř vyrovnány. To ale znamená, že posuv Fermiho hladin má téměř hodnotu zakázaného pásu pro křemík. Tak, a teď vypočtěte hodnotu napětí na diodě v propustném směru ! Jako myslím opravdu **vypočtěte** , tedy dosaďte do výše uvedených vztahů a vypočtěte U . Nevyjde vám úplně přesně to, co je v katalogu, ale skoro.

Pokračujeme dále. Pokud je dioda v propustném směru, je na polovodiči N záporný pól a na polovodiči P kladný pól. Je tam tedy elektrostatické pole, které žene elektrony z oblasti N do oblasti P. Elektronu nic nebrání v pohybu – je ve vodivostním pásu, to znamená, že se urval z vazby a toulá se materiálem. Z pásmového modelu vidíme, že po cestě nemusí měnit energii, takže prostě běží do oblasti P. Ale v oblasti P číhají díry. Díra je místo, které má kladný náboj. Díra tedy elektron přitáhne. Elektron se zapojí do vazební slupky, začne obíhat v orbitu kolem jádra, a tím ztratil energii. Na obrázku se to znázorní tím, že elektron „spadne“ z vodivostního pásu do valenčního. Vy si ale stále opakujte: tady elektron ztratil energii. Možná si teď řeknete: no ale tak po nějaké době elektrony zaplní všechny díry v oblasti P, a tím polovodič mizí ! To ale není pravda, protože polovodič P je připojen na zdroj, který elektrony neustále odcucává. A tím vyrábí nové díry.

Obdobně se dá nakreslit pohyb děr, ty zase putují z P do N , jsouce taženy elektrickým polem. Ale díry fakt moc neumím, ask google. A hlavně, nám to dál bude jedno.



Žlutá – cesta elektronu (na vodorovné ose je poloha v krystalu) . Červená – snížení energie elektronu. V tomto místě elektron mizí z vodivostního pásu, tedy se přestává toulat krystalem, protože ho shltla nějaká díra. A projeví se to snížením jeho energie.

Energie, kterou elektron ztratil, se samozřejmě musí někde projevit. Buď tím, že se krystal ohřeje (to nejčastěji) , nebo tím, že se promění ve foton. A energie fotonu přímo udává jeho kmitočet, tedy vlnovou délku.

A my si to teď spočítáme ! Úvaha je stejná jako u usměrňovací diody: donorová a akceptorová hladina jsou blízko u valenčního a vodivostního pásu, takže ten rozdíl jde zanedbat. Fermiho hladiny jsou posunuty, takže jejich posuv skoro odpovídá šířce zakázaného pásu. Posuv Fermiho hladin odpovídá napětí v propustném směru. Výpočet tedy půjde tímto směrem: Barva světla – energie fotonu – šíře zakázaného pásu – posuv Fermiho hladin – napětí na přechodu v propustném směru . Tabulku si klidně udělejte v Excelu nebo tak nějak, asi budete potřebovat ještě kmitočet, ale poradíte si. Najděte si také nějaké LED a podívejte se na jejich napětí. Nevyjde to přesně, ale jakžtakž ano.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| barva | vlnová dél. | energie | napětí vypočtené | napětí z katalogu |
| R |  |  |  |  |
| G |  |  |  |  |
| B |  |  |  |  |

Ještě jedna poznámka - materiál na LED je GaAS a podobné, takže zakázaný pás má samozřejmě jinou šířku než u Si. A vidíme, že šířkou zakázaného pásu nastavujeme kmitočet vycházejícího záření.

Protože při svícení LED elektrony zapadají do děr a ztrácejí energii dost chaoticky, tak **vyráběné světlo není koherentní.**

O LED si dále přečtete u Ing. Tučka na <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/19%20Optoelektrick%25c3%25a9%20jevy.doc>

je to na konci dokumentu