

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1. ZÁKLADNÍ PRAVIDLA KVANTOVÉ TEORIE	7
2.1.1. <i>Elektron v izolovaném atomu</i>	7
2.1.2. <i>Přehled základů fyziky polovodičů</i>	9
2.2. POLOVODIČE	10
2.3. VLASTNÍ A NEVLASTNÍ POLOVODIČE.....	11
2.3.1. <i>Elektrická vodivost polovodičů</i>	11
2.3.2. <i>Vlastní polovodiče</i>	11
2.3.3. <i>Nevlastní polovodiče</i>	13
2.4. PÁSOVÉ DIAGRAMY.....	16
2.4.1. <i>Elektron v krystalu - základy pásové teorie</i>	16
2.4.2. <i>Rozdělení látek podle jejich elektrických vlastností</i>	18
2.5. ELEKTRONY V PEVNÝCH LÁTKÁCH A JEJICH ENERGETICKÉ ROZDĚLENÍ	19
2.5.1. <i>Hustota stavů</i>	19
2.5.2. <i>Fermiho - Diracova rozdělovací funkce</i>	20
2.6. KONCENTRACE ELEKTRONŮ A DĚR.....	23
2.6.1. <i>Vztahy pro výpočet koncentrace elektronů a děr</i>	23
2.6.2. <i>Nábojová neutralita</i>	26
2.7. FERMIHO HLADINA	30
2.7.1. <i>Výpočet polohy Fermiho hladiny</i>	30
2.7.2. <i>Vlastní polovodič</i>	30
2.7.3. <i>Nevlastní polovodič</i>	31
2.7.4. <i>Slabě kompenzovaný polovodič</i>	33
2.7.5. <i>Silně kompenzovaný polovodič</i>	37
2.7.6. <i>Nekompenzovaný polovodič</i>	38
2.8. POHYBLIVOST	40
2.9. TEPLOTNÍ ZÁVISLOST	42
2.9.1. <i>Teplotní závislost koncentrace nosičů náboje v polovodičích</i>	42
3. PRAKTICKÁ ČÁST	45
3.1. CO JE TO INTERNET	45
3.2. INTERNETE, CO NÁM NABÍZÍŠ?	45
3.3. TVORBA WWW.....	46
3.3.1. <i>Příprava</i>	46
3.3.2. <i>V čem „programovat“</i>	46
3.4. PROGRAMY PRO TVORBU WWW STRÁNEK.....	47
3.4.1. <i>Microsoft Front Page (MS FP)</i>	47
3.4.2. <i>Paint Shop Pro 6 (PSP)</i>	49
3.4.3. <i>FTP program</i>	50

3.5.	STRUKTURA WWW STRÁNEK (WEBOVÝCH STRÁNEK).....	52
3.6.	KOMU MAJÍ TYTO STRÁNKY SLOUŽIT	53
3.7.	SHRNUTÍ.....	54
4.	ZÁVĚR	56
5.	POUŽITÁ LITERATURA.....	59
6.	SEZNAM OBRÁZKŮ, POUŽITÉ SYMBOLY	60
6.1.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	60
6.2.	POUŽITÉ SYMBOLY	61
7.	PŘÍLOHY.....	64

1. Úvod

Tato práce zahrnuje jakýsi výběr z látky o polovodičích. Konkrétně se zabývá oblastí zvanou fyzika polovodičů.

Celá látka je soustředěna do dvou částí a to části teoretické a části praktické.

První část tvoří teorie, která je složena z dostupné literatury. Zde bych vyzdvihl především skripta Elektronické součástky [1], které posloužily jako zdravý základ této práce. Část zabývající se fyzikou polovodičů, je psána velice stručně a studentům zabývajícím se studiem elektrotechnických škol nabízí jedinečnou příležitost jak efektivně a přehledně vstřebat tolik nezáživné teorie, která je ovšem základem všeho, co dnes používáme.

Postupně procházíme základy kvantové fyziky přes vlastnosti polovodičů. Jejich charakteristické vlastnosti jako jsou pásové diagramy, Fermiho hladina, koncentrace nosičů až po samotné tepelné závislosti.

Tato část byla složena z literatury, všechna použitá je uvedena v seznamu literatury, která vhodně doplňuje již na začátku zmíněná skripta a dále je rozšiřuje o praktické ukázky provedené pomocí počítačové animace či jen na základě vstupu, reakcí uživatele.

Druhá část, praktická, je zaměřena na samotné zpracování a publikování WWW nebo také jinak WEB stránek na Internetu. Je tvořena jako tzv. manuál. Ten by měl sloužit ostatním studujícím, případně další osobě, která se bude zabývat tvorbou WWW stránek v oblasti polovodičů.

Tato práce nezasahuje ještě zdaleka do podrobností, to taky nebylo cílem práce, ale ukazuje jakýsi základní směr studujícímu, nebo chcete-li, základní návod, kterak využít již napsanou literaturu ke studiu.

Stránky zde popisované budou vystaveny na adrese <http://skripta.trunky.cz>

2. Teoretická část

2.1. Základní pravidla kvantové teorie

2.1.1. Elektron v izolovaném atomu

V roce 1913 stanovil Niels Bohr tři postuláty, vysvětlující některé do té doby nepochopitelné vlastnosti elektronů:

1. Elektron může trvale kroužit kolem jádra jen v některé z určitých drah (kvantových drah, orbitů).
2. Pokud elektron obíhá v některé z kvantových drah, atom nevyzařuje žádnou energii, jeho energie je konstantní.
3. Při přechodu elektronu z jedné kvantové dráhy na druhou atom energii buď absorbuje nebo emituje.

Tato **kvantizace** drah pohybu elektronu vede ke **kvantizaci energie** elektronu. Podle [8], pro elektron s hlavním kvantovým číslem **n** je tato energie:

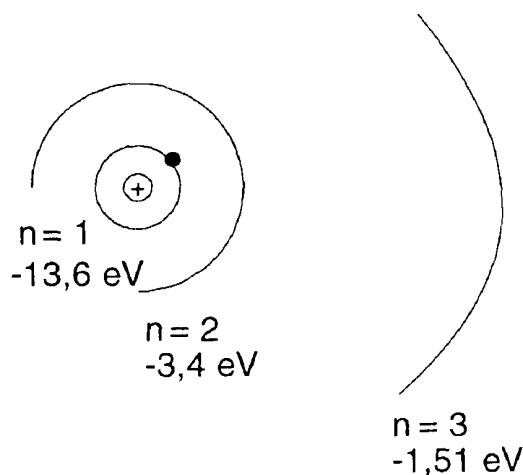
$$E = -\frac{m_0 q^4}{2(4\pi\epsilon_0 h n)^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad n = 1, 2, 3,$$

(2-1)

kde **E** je vazebná energie elektronu v atomu vodíku,
m₀ je hmotnost volného elektronu (0,91.10⁻³⁰ kg),
q je absolutní hodnota náboje elektronu (1,602 . 10⁻¹⁹ C),
ε₀ je permitivita vakua (8,854.10⁻¹² Fm⁻¹),
h je Planckova konstanta (6,626.10⁻³⁴ Js), ħ= h/2π
n je hlavní kvantové číslo (identifikátor orbitu).

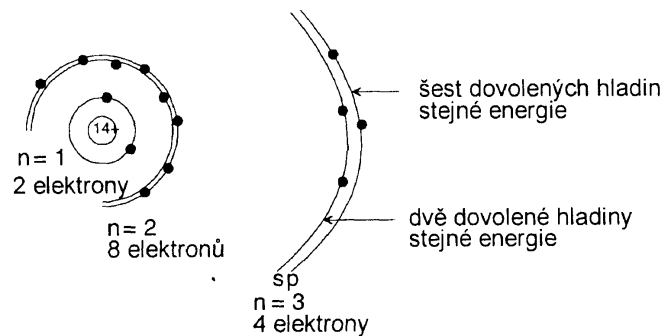
Jednotka elektronvolt (eV) je jednotka energie (1 eV = 1,602 .10⁻¹⁹ J). Vazebná energie elektronu je záporná, vazebnou energii v nekonečnu (tj. energii volného elektronu ve vakuu) klademe rovnu nule. Energie elektronu je tedy uvnitř vodíkového

atomu omezena pouze na určité hodnoty (viz obr.2-1) a z Bohrova modelu vyplývá, že přechod elektronu z orbitu s vyšším kvantovým číslem n na orbit s nižším kvantovým číslem n je provázen vyzářením energie o hodnotě rovné rozdílu energií těchto dvou orbitů. Tato energie je zpravidla světelná ($\Delta E = h \cdot \nu$) a proto můžeme pozorovat emitované světlo pouze o diskretních vlnových délkách.



Obr. 2-1 Vodíkový atom - první tři dovolené kvantové dráhy a jejich energie

Podobně jako vodíkový atom můžeme znázornit i komplexnější 14 elektronový atom křemíku (obr. 2-2.). Zde 10 ze 14 elektronů obsazují energetické úrovně o velmi nízké energii a jsou velmi těsně svázané s jádrem atomu. Tato vazebná energie je tak silná, že během chemických reakcí zůstává prakticky neporušena. Tyto elektrony nazýváme **vnitřní elektrony**. Zbývající 4 elektrony jsou vázány relativně slabě, účastní se chemických reakcí a jsou nazývány **valenčními elektrony**.



Obr. 2-2 Izolovaný atom křemíku

2.1.2. Přehled základů fyziky polovodičů

S ohledem na elektrickou vodivost lze rozdělit pevné látky na vodivé a nevodivé, což je známé již od roku 1729 (S. Gray). Teprve M. Faraday objevil r. 1833 záporný teplotní součinitel odporu na Ag_2S , a tím i novou skupinu látek - polovodiče. Již v osmdesátých letech minulého století byly známy čtyři hlavní znaky charakterizující polovodiče. Vedle záporného teplotního součinitele odporu byl znám fotoelektrický jev (Becquerel 1839), vznik napětí na osvětleném styku polovodiče s elektrolytem a fotoodporový jev na selenu (W. Smith, 1873) a fotovoltaiický jev - selenový fotočlánek (Adams a Day, 1876), dále usměrňovací jev objevený Brownem r. 1874 na hrotovém detektoru z PbS a z pyritu. Technické aplikace začínaly konstrukcí selenových fotočláneků a selenových usměrňovačů (Fritts, 1883). V roce 1879 byl objeven Hallův jev, který se stal velice důležitým pro vyšetřování vodivostního mechanismu a používá se dodnes. Bose uváděl r. 1904 hrotový detektor pro detekci Hertzových vln. V téže době začínal A. F. Ioffe se systematickým průzkumem iontových krystalů. Milníkem v historii polovodičů bylo vypracování pásového modelu (r. 1931) A. H. Wilsonem a teorie usměrňovacího jevu, kterou nezávisle na sobě rozpracovali N. F. Mott v Anglii, W. Schottky v Německu a B. J. Davidov v Sovětském svazu v roce 1938. Systematický výzkum na germaniu a křemíku ve čtyřicátých letech vedl nejen ke konstrukci vysokofrekvenčních diod pro radar, ale také ověřoval pásový model na jednoduchých elementárních polovodičích, což se dříve v případě Se a Cu_2O nepodařilo. Tranzistorový efekt, který objevil v

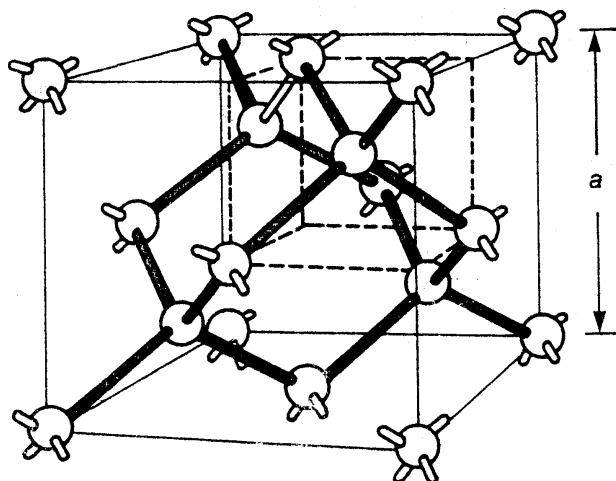
r. 1947 W. Shockley, J. Bardeen a W. Brattain, zahájil epochu polovodičové elektroniky, která se rozvíjí dodnes.

2.2. Polovodiče

Lze je definovat jako látku, která má elektronovou bipolární vodivost, tj. vedení elektrického proudu je v ní zprostředkováno elektrony a dírami, a jejíž elektrická vodivost se zvětšuje se vzrůstající teplotou. Význačnou vlastností polovodičů je schopnost měnit svou vodivost vlivem, vnějších fyzikálních dějů – působením tepla, světla, elektrického pole, magnetického pole apod., nebo přidáním nepatrného množství příměsí (tj. cizích atomů) do čisté látky polovodiče.

Vliv některých vnějších fyzikálních dějů na polovodič vynikne při porovnávání základních vlastností vodiče – lineární závislost a nelineární závislost. [5].

Polovodiče jsou obvykle tuhé (krystalické nebo amorfni) nebo kapalné látky. Většina dnes vyráběných součástek je z polovodičů **diamantové krystalové struktury** (např. **Ge** – germanium, **Si** - křemík).



diamantová mřížka Si

Obr. 2-3 Ukázka diamantové mřížky u Si

2.3. Vlastní a nevlastní polovodiče

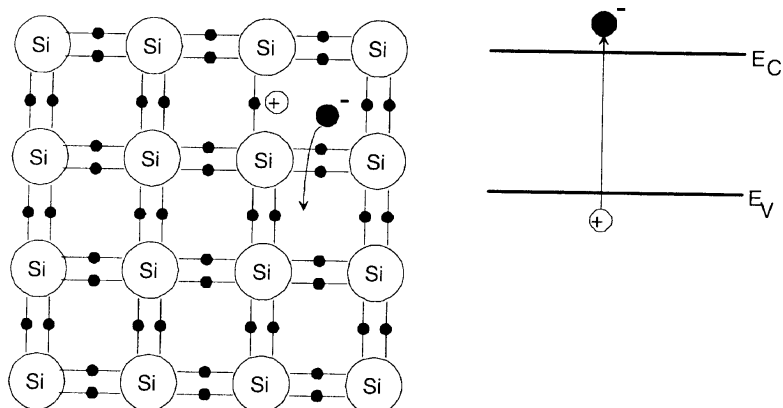
2.3.1. Elektrická vodivost polovodičů

U polovodičů existují dva typy vodivosti, tzv. vlastní a nevlastní vodivost. **Vlastní** (intrinsickou) **vodivostí** se vyznačují všechny polovodiče, **nevlastní vodivost** existuje jen u tzv. **příměsových** (dotovaných, extrinzických, nevlastních, legovaných) polovodičů.

2.3.2. Vlastní polovodiče

Dokonalý vlastní polovodič (dokonalý krystal bez poruch a příměsí) se v přírodě nevyskytuje, při pečlivé výrobě se mu však můžeme přiblížit. Vlastní (intrinzický) polovodič se podobá izolantu. Za teploty **0 K** je vodivostní pás prázdný, tj. v polovodiči nejsou žádné volné elektrony, které by mohly vést proud. Vlivem teploty nebo jiného vnějšího vlivu však může elektron získat dostatečnou energii a "přeskočit" do vodivostního pásu. Hovoříme o tzv. **ionizaci**, k níž je nutné určité množství tzv. **ionizační energie**. **Ionizační energie** (užívá se i termín aktivační energie) je nutná k překonání zakázaného pásu a uvolnění elektronu z vazby, její velikost musí tedy být nejméně **E_G** .

Elektron, který se uvolní, zanechá po sobě ve valenčním pásu atom postrádající jeden elektron (chová se potom jako kladný iont). Tento kladný iont se může zneutralizovat přijetím elektronu, který k němu přejde ze sousedního atomu. Tím se však z tohoto sousedního atomu stane kladný iont a může být opět zneutralizován příchodem dalšího elektronu. Vidíme, že atomy se jako pevná součást mřížky nepohybují, ale kladný náboj se může přemisťovat. Tento kladný náboj nazýváme **díra**. Přestože **díra** jako reálná částice neexistuje, je užitečné jí přiřadit některé vlastnosti materiální částice (podobné, jako má elektron, ale opačný náboj **+q**).



Obr. 2-4 Vznik páru elektron díra.

Ve vlastních polovodičích mohou tedy přenášet elektrický proud za teplot nad 0 K jednak volné elektrony ve vodivostním pásu (každý elektron přenáší náboj $-q$), jednak pohyblivé díry ve valenčním pásu (náboj $+q$).

Pro obě tyto částice se užívá název **nosiče** (nebo **nositelé**) **náboje**. Protože současně vzniká volný elektron a pohyblivá díra, hustota elektronů se rovná hustotě děr:

$$\mathbf{n = p = n_i}$$

(2-2)

kde **n** je počet elektronů,

p je počet děr,

n_i je intrinzická koncentrace nosičů na jednotku objemu; podle soustavy SI je to 1 m^3 , v praxi i v literatuře se však běžně používá 1 cm^3 .

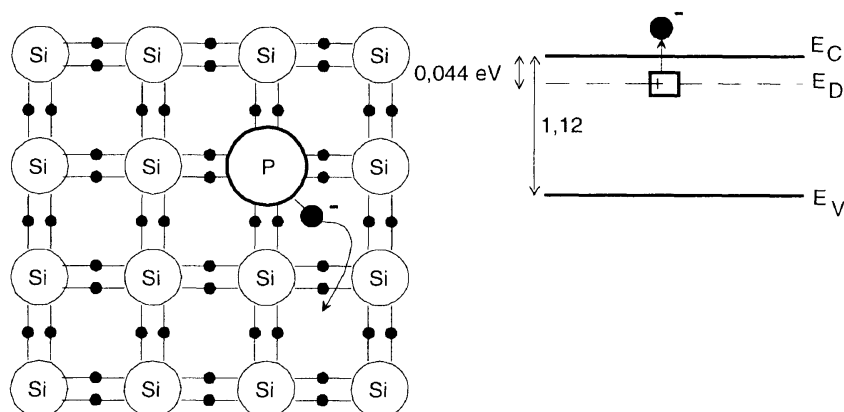
Je užitečné si zapamatovat, že intrinzická koncentrace nosičů je při 300 K pro křemík 10^{16} m^{-3} (10^{10} cm^{-3}) a pro germanium 10^{19} m^{-3} (10^{13} cm^{-3}), intrinzická koncentrace však silně závisí na teplotě. Proces uvolňování elektronů při ionizaci atomů nezpůsobuje změnu výsledného náboje daného objemu polovodiče (po uvolněním elektronu zůstává v krystalové mřížce ionizovaný atom s kladným nábojem).

Vlastní polovodiče jsou tedy při teplotách kolem 300 K vodiče elektrického proudu, vlivem závislosti intrinzičké koncentrace na teplotě i jejich vodivost silně závisí na teplotě. Rozsah jejich měrných odporů je přibližně 10^{-2} až $10^9 \Omega\text{cm}$ (dobré vodiče mají měrný odpor $< 10^{-6} \Omega\text{cm}$, izolanty $> 10^{14} \Omega\text{cm}$).

2.3.3. Nevlastní polovodiče

Na elektrickou vodivost polovodičů mají výrazný vliv cizí atomy zabudované do krystalové mřížky (poruchy), které jsou v reálném krystalu vždy přítomny. Příměsové atomy jsou do co nejčistšího materiálu zaváděny i uměle, abychom získali materiál s vhodnými elektrickými vlastnostmi. Tento technologický postup, kdy se do základního materiálu přidávají atomy cizích prvků, nazýváme **dotování** (nebo též dopování či legování; přidávaná látka se nazývá **dopant** či legura). Nejčastěji přítom vstupují atomy příměsí do krystalové mřížky jako náhrada některých původních atomů (tzv. substituce).

Polovodič typu N



Obr. 2-5 Příměsový polovodič typu N.

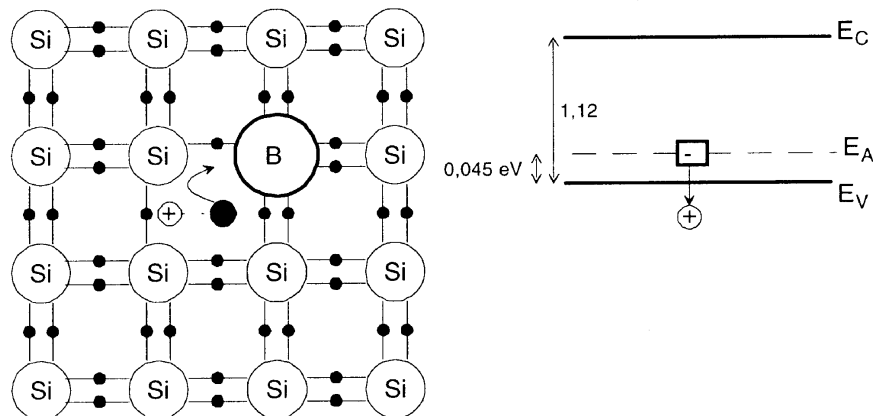
Je-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku (prvku IV. skupiny - např. Si, Ge) nahrazen atomem pětimocného prvku (prvku V. skupiny - např. P, As, Sb), pak čtyři z jeho valenčních elektronů se účastní vytvoření vazby se sousedními atomy, pak elektron je nadbytečný a je vázán k atomu velmi slabě. Tento elektron může být uvolněn dodáním velmi malé (aktivační) aktivační energie a účastnit se vedení

proudu. Typická hodnota aktivační energie je asi 0,05 eV pro běžné příměsi v Si; každá příměs má svoji typickou hodnotu aktivační energie. Tuto energii elektron získá už při nízkých teplotách, takže při pokojové teplotě jsou téměř všechny atomy příměsi ionizovány. Vznikají tak kladné ionty příměsí, které zůstávají v mřížkových polohách, a volné elektrony. Proto se pětimocné příměsi nazývají **donory** (dodávají elektrony do vodivostního pásu).

V pásovém diagramu vytvářejí donorové atomy tzv. **donorovou hladinu** (s energií E_D), která se nachází v zakázaném pásu těsně pod dnem vodivostního pásu (E_C) - viz Obr. 2-5. V polovodiči typu **N** (v polovodiči s elektronovou vodivostí) převažují jako nosiče proudu elektrony, nazýváme je proto **majoritní nosiče**.

Polovodič typu P

Podobně nahradíme-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku atomem trojmocného prvku (prvku III. skupiny - např. B, In, Ga, Al), pak se všechny tři jeho valenční elektrony účastní vazeb se sousedními atomy a čtvrtá zůstane neúplná. Stačí malá energie k tomu (opět typická hodnota je asi 0,05 eV pro Si), aby se některý z elektronů ze sousedních vazeb uvolnil a zaplnil neúplnou vazbu trojmocného atomu - tj. trojmocný atom se ionizuje záporně a vytvoří v sousedství "kladnou" díru (tj. nedostatek jednoho elektronu). Tato díra se může pohybovat a umožnit tak vedení proudu (působí-li na ni vnější elektrické pole). Trojmocné příměsi se nazývají **akceptory** (přijímají, lépe řečeno zachycují elektrony z valenčního pásu). V pásovém diagramu vytvářejí akceptorové příměsi tzv. **akceptorovou hladinu** (s energií E_A),



Obr. 2-6 Příměsový polovodič typu P.

ležící těsně nad stropem valenčního pásu (E_V) - viz Obr. 2-6. Již za malé teploty jsou téměř všechny akceptorové příměsi ionizovány a ve valenčním pásu jsou vytvořeny díry, které v polovodiči typu P (v polovodiči s děrovou vodivostí) převažují jako nosiče proudu - majoritními nosiči jsou zde díry.

Vodivost příměsových polovodičů (typu N a P) se nazývá souborně **nevládní** (extrinzičnou) **vodivostí**. Při ionizaci (aktivaci) příměsi vzniká jeden pohyblivý nosič a jeden nepohyblivý iont. Při ionizaci atomů ve vlastních (intrinzičských) polovodičích vzniká pohyblivý elektron a pohyblivá díra.

Případ vlastního polovodiče bez příměsí i případy čistě donorového nebo čistě akceptorového polovodiče (bez příměsí opačného typu) jsou případy pouze teoretické, protože reálné technologické možnosti nám neumožňují takovéto ideální polovodiče vyrobit.

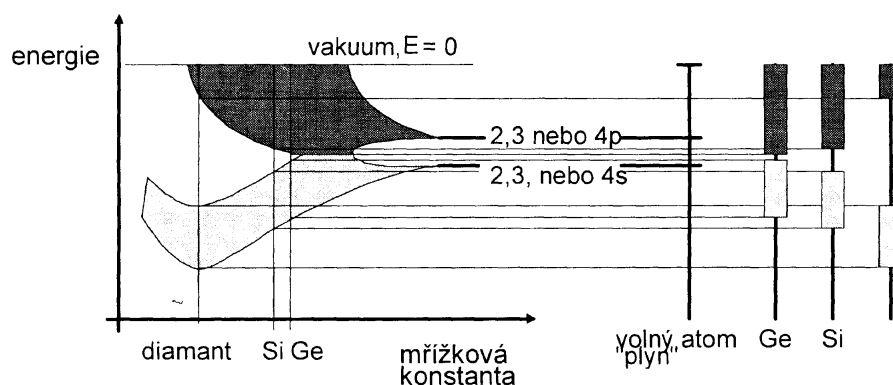
Při zvyšování koncentrace příměsí se donorové nebo akceptorové hladiny štěpí - vznikají pásy příměsí. Při velké koncentraci příměsí splývá akceptorova hladina s valenčním pásem a donorova hladina s vodivostním pásem - polovodič se chová jako kov (**degenerovaný polovodič**).

2.4. Pásové diagramy

2.4.1. Elektron v krystalu - základy pásové teorie

Pro izolovaný atom můžeme uvažovat čárový energetický diagram sestávající z diskrétních energetických hladin. Při přibližování dvou atomů dochází k projevům přitažlivých (vazebních, atraktivních) a odpudivých (repulsivních) sil.

Odpudivé síly převládají při malých vzdálenostech mezi atomy a přitažlivé ve větších vzdálenostech. V určité vzdálenosti a_0 , kterou nazýváme **rovnovážná mřížková konstanta**, jsou tyto síly v rovnováze, soustava atomů má minimum potenciální energie a je proto ve stabilním stavu. Při vzájemném působení dvou atomů dochází také ke štěpení energetických hladin, které byly původně v obou atomech na stejné úrovni (na tento jev se můžeme dívat jako na rozšíření Pauliho vylučovacího principu na více atomů nebo na celý krystal).

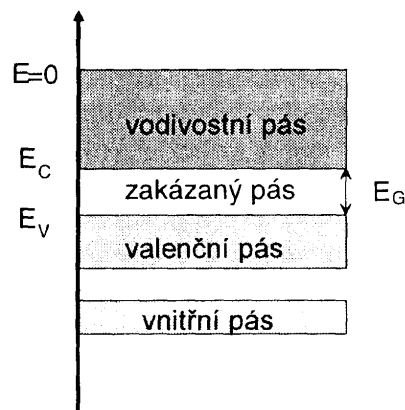


Obr. 2-7 Teoretický energetický diagram prvků IV. skupiny v závislosti na mřížkové konstantě. Pásový model napravo vznikne řezem v místě příslušné mřížkové konstanty.

Na Obr. 2-7 je znázorněna část energetického diagramu prvků IV. skupiny periodické tabulky (které mají podobnou elektronovou strukturu se čtyřmi valenčními elektrony) v závislosti na jejich mřížkové konstantě. V případě velké vzdálenosti mezi jednotlivými atomy je energetické spektrum čárové, protože jednotlivé atomy spolu neinteragují. Při vzájemném přibližování atomů v krystalu, obsahujícím N atomů, se hladina s rozštěpí na $2N$ dovolených stavů a hladina p na $6N$ dovolených stavů.

Představíme-li si, že 1 cm^{-3} křemíku obsahuje asi $5 \cdot 10^{22}$ atomů, můžeme hovořit o spojitéch pásech dovolených energií.

Pásové diagramy dovolených energií elektronů jsou důležitým modelem pro studium elektrických vlastností pevných látek. Hovoříme o tzv. **pásové teorii** nebo **pásovém modelu pevných látek**. Pásky dovolených hodnot energie elektronu označíme jako **dovolené pásky**, oblasti mezi těmito pásky jsou pásky zakázaných hodnot energie elektronu - **zakázané pásky**. Jednoduchý pásový model pevné látky je na obr. 2-8.



Obr. 2-8 Jednoduchý pásový model pevné látky.

Energetické pásky dělíme na tyto skupiny:

1. Vnitřní pásky:

Tyto pásky patří elektronům pevně vázaným k jádrům. Jsou poměrně úzké a pro přenos elektrického náboje nemají význam.

2. Valenční pás:

V tomto pásu jsou hladiny elektronů vytvářejících chemickou vazbu.

3. Vodivostní pás:

V tomto pásu jsou hladiny elektronů uvolněných z chemických vazeb. Tyto elektrony se mohou pohybovat v meziatomovém prostoru a způsobovat vodivost látky. Je to nejvyšší dovolený energetický pás.

4. Zakázané pásky:

Oddělují od sebe pásky dovolených energií.

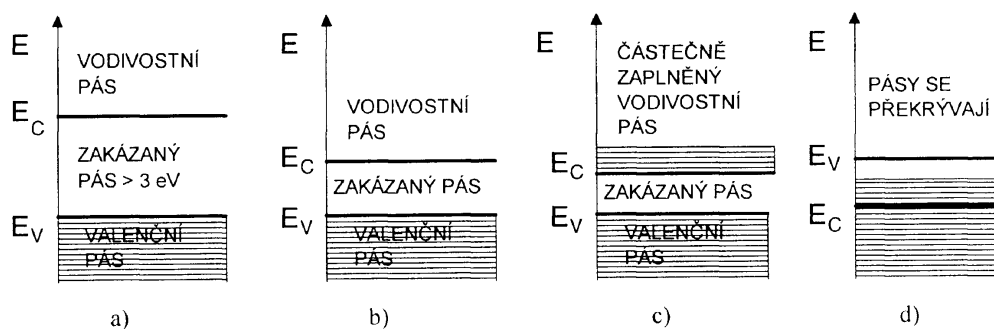
Poslední tři pásy - vodivostní, zakázaný a valenční - **svou polohou** a energetickou šířkou určují **základní vlastnost pevných látek** z hlediska vedení elektrického proudu (přenosu náboje). Běžně se dolní okraj vodivostního pásu označuje E_C (C = conductivity), E_V je horní kraj valenčního pásu (V = valence). Zakázaný pás má šířku E_G (nebo ΔE ; G = gap).

Elektrické vlastnosti látky charakterizuje zejména šířka zakázaného pásu E_G , která mimo jiné závisí na meziatomové vzdálenosti a_0 atomů v krystalu.

Na (Obr. 2-7) vidíme, že Ge s mřížkovou konstantou 0,565 nm má menší E_G ($E_G = 0,66$ eV) než Si ($a_0 = 0,543$ nm, $E_G = 1,12$ eV) a mnohem menší než diamant C ($a_0 = 0,357$ nm, $E_G = 5,47$ eV). Hodnoty jsou uvedeny pro teplotu 300 K.

2.4.2. Rozdělení látek podle jejich elektrických vlastností

Objev dovolených a zakázaných pásů energie v krystalických látkách vedl k jednoduchému a názornému výkladu elektrické vodivosti. Rozdělení látek na **vodiče, polovodiče a izolanty** se provádí podle hodnot **měrné vodivosti** a její **teplotní závislosti** a jako výrazné kritérium se uvádí **šířka zakázaného pásu**.



Obr. 2-9 Pásový model: a) izolantu b) polovodiče c) monovalentního kovu d) bivalentního kovu.

Na Obr. 2-9. jsou vedle sebe znázorněny pásové modely pro izolant, polovodič a vodič (kov). Předpokládáme, že látky zde uvažované jsou na teplotě absolutní nuly (**0 K**), kdy elektrony zaujímají nejnižší možné energetické úrovně. Výpočty při teplotě absolutní nuly jsou jenom teoretickou abstrakcí, která nám umožňuje jednodušší postupy a snazší pochopení problému, než při uvažování reálných teplot.

U **izolantů** je valenční pás zaplněn elektrony, nad ním ležící zakázaný pás je širší než 3 eV (např. diamant 5,48 eV při 0 K). Izolanty téměř nevedou elektrický proud, protože příliš široký zakázaný pás nedovoluje elektronům přejít z valenčního pásu do pásu vodivostního (to platí za všech teplot až do tepelného nebo elektrického průrazu).

Pásový diagram **polovodičů** je shodný s pásovým diagramem **izolantů**, ovšem šířka zakázaného pásu je 0,1 až 2 eV (u Ge 0,66 eV a u Si 1,12 eV při 0 K). Za teploty 0 K je vodivostní pás prázdný, tj. v polovodiči nejsou žádné volné elektrony, které by mohly přenášet náboj (vést proud), a proto se polovodič chová jako izolant. Při zvyšování teploty mohou některé elektrony získat dostatečnou energii a přejít do vodivostního pásu - **polovodič začíná vést proud**.

U **kovů** se vyskytují dva případy. **Monovalentní** kovy (např. sodík, rubidium) mají velmi úzký zakázaný pás ($E_G < 0,1$ eV) a vodivostní pás je i za teploty 0 K částečně zaplněn. **Bivalentní** kovy (např. měď) nemají zakázaný pás a vodivostní pás se překrývá s valenčním. Kovy jsou proto dobré (elektrické i tepelné) vodiče, a to i za velmi nízkých teplot. Mrak volných elektronů v kovu se též nazývá elektronovým plynem.

Polovodiče tvoří samostatnou ostře ohraničenou skupinu látek. V podstatě jsou to izolanty, které se působením vnitřních nebo vnějších činitelů (teplo, světlo, tlak, elektromagnetické pole, radioaktivní záření, poruchy krystalové mřížky) mění na částečné vodiče elektrického proudu.

2.5. Elektrony v pevných látkách a jejich Energetické rozdělení

2.5.1. Hustota stavů

Celkový počet dovolených stavů ve vodivostním a valenčním pásu Si je roven čtyřnásobku počtu atomů v krystalu (každý atom Si má čtyři valenční elektrony). Energetickému rozložení dovolených stavů říkáme **hustota stavů**.

Výpočet hustoty stavů je založen na kvantově mechanické analýze. Uvedeme zde jenom souhrn výsledků.

Pro energie nepříliš vzdálené od hranice pásu můžeme odvodit [2, 3]:

$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^* (E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} = \text{konst.} \sqrt{E - E_C} \quad , \quad E \geq E_C$$

$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^* (E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} = \text{konst.} \sqrt{E_V - E} \quad , \quad E \leq E_V$$

(2-3)

kde $g_C(E)$ a $g_V(E)$ jsou hustoty stavů v závislosti na energii ve vodivostním a valenčním pásu

m_n^* a m_p^* jsou efektivní hmotnosti elektronu a díry.

Jestliže budeme předpokládat dvě velmi blízké energie E a $E + dE$, pak $g_C(E)dE$ je počet dovolených stavů v jednotce objemu, které ležící ve vodivostním pásu mezi energiemi E a $E + dE$ (podobnou úvahu můžeme provést i pro valenční pás). Jednotkou hustoty stavů je tedy "počet . cm^{-3} . eV^{-1} ".

2.5.2. Fermiho - Diracova rozdělovací funkce

Zatímco hustota stavů udává, kolik dovolených stavů existuje pro danou energii E , Fermi-Diracova rozdělovací funkce $f(E)$ určuje, kolik existujících dovolených stavů pro energii E bude zaplněno elektrony, nebo jinými slovy, určuje pravděpodobnost, že dovolený stav bude zaplněn elektronem. Fermi-Diracova funkce je tedy funkce hustoty pravděpodobnosti:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]}$$

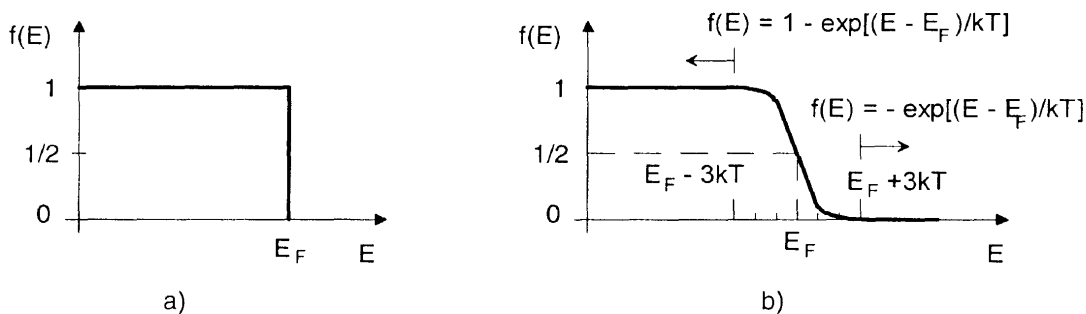
(2-4)

kde E_F je Fermiho energie (**Fermiho hladina**),
 k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$),
 T je teplota v Kelvinech.

a) $T \rightarrow 0 \text{ K}$,

b) zobecněná závislost (s jednotkou na ose energie v kT pro $T > 0 \text{ K}$).

Jestliže $T \rightarrow 0 \text{ K}$, pak $(E - E_F) / kT \rightarrow -\infty$ pro všechny energie $E < E_F$ a $(E - E_F) / kT \rightarrow +\infty$ pro všechny energie $E > E_F$. Tedy $f(E) = 1$ pro $E < E_F$ a $f(E) = 0$ pro $E > E_F$.
(viz Obr. 2-11a).



Obr. 2-10 Energetická závislost Fermi-Diracovy funkce

Vidíme, že všechny stavy pro energie pod E_F budou obsazeny elektrony a všechny stavy pro energie nad E_F budou prázdné.

Nyní předpokládejme teplotu $T > 0 \text{ K}$. Potom pro $E = E_F$ nalezneme $f(E_F) = 1/2$.

Protože pro běžné výpočty je použití Fermi-Diracovy funkce (2-4) nepraktické, používáme její zjednodušený tvar.

Lze dokázat, že pro $E \geq E_F + 3kT$ platí, $f(E) \approx \exp[-(E - E_F)/kT]$ a pro $E \leq E_F - 3kT$ platí, $f(E) \approx 1 - \exp[(E - E_F)/kT]$.

Při pokojové teplotě ($T \approx 300 \text{ K}$) je $kT \approx 0,026 \text{ eV}$ a $3 kT \approx 0,078 \text{ eV} \ll E_G$ (pro Si je E_G asi 1,12 eV), což znamená, že se nedopouštíme příliš velké chyby,

jestliže používáme tyto zjednodušené vztahy pro výpočet $f(\mathbf{E})$. Tyto výsledky jsou shrnuty na Obr. 2-11. Je zřejmé, že se vzrůstající teplotou se zvětšuje hodnota $3 kT$ a křivka se "roztahuje".

Z předchozího rozboru plynou dvě možné definice Fermiho energie:

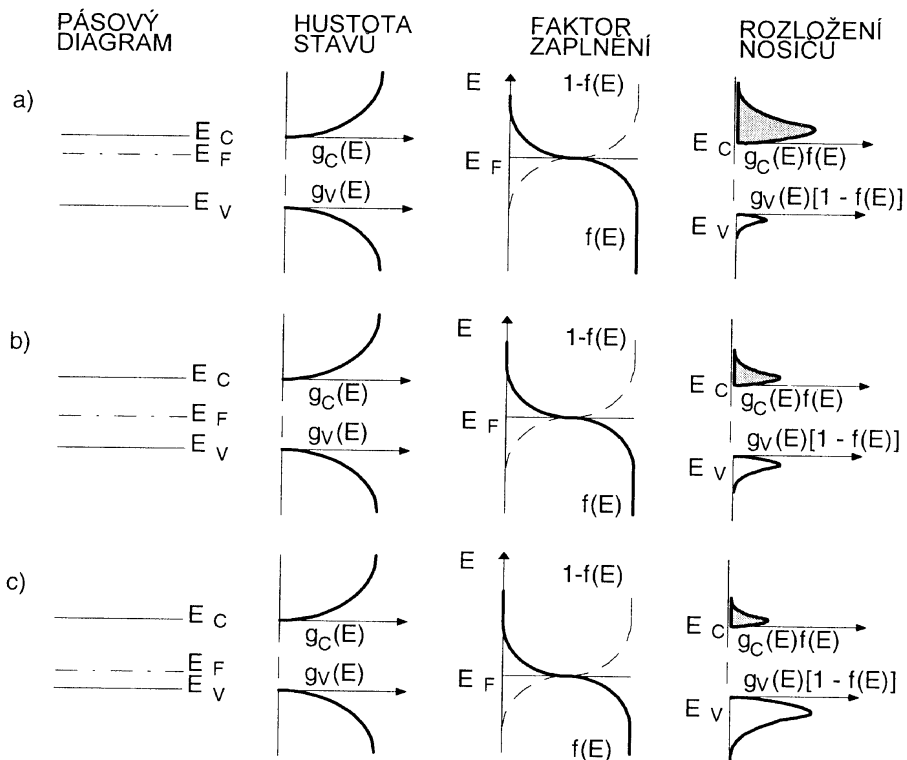
- a) Při teplotě $T = 0 \text{ K}$ odděluje Fermiho energie obsazené stavy od neobsazených.
- b) Při teplotě $T > 0 \text{ K}$ je Fermiho energie definována jako hladina, která je obsazena s pravděpodobností $1/2$.

Ještě musíme zdůraznit, že Fermi-Diracova rozdělovací funkce platí v polovodičích pouze za rovnovážných podmínek. I když jsme ji zavedli ve spojitosti s fyzikou polovodičů, je to statistická funkce, která má v kvantové mechanice obecnější platnost.

Rovnovážné rozložení nosičů

Stanovili jsme již hustotu dovolených stavů a pravděpodobnost zaplnění těchto stavů za rovnovážných podmínek. Nyní můžeme jednoduše stanovit rozložení nosičů v jednotlivých energetických pásech. Součin hustoty dovolených stavů a faktoru jejich zaplnění, tedy $f(\mathbf{E})g_c(\mathbf{E})$, udává rozložení elektronů ve vodivostním pásu. Podobně součin hustoty stavů a faktoru jejich nezaplnění, $[1-f(\mathbf{E})] g_v(\mathbf{E})$, dává rozložení děr (nezaplňených stavů) ve valenčním pásu. Souborně je rovnovážné rozložení nosičů znázorněno na obr.

Ve vlastním (intrinzickém) polovodiči leží Fermiho hladina uprostřed zakázaného pásu ($E_F = E_i$), v polovodiči typu **N** v horní polovině zakázaného pásu a v polovodiči typu **P** v dolní polovině zakázaného pásu.



Obr. 2-11 Rozložení nosičů při poloze Fermiho hladiny: a) v horní polovině zakázaného pásu (p. typu N), b) uprostřed zakázaného pásu (vlastní p.), c) v dolní polovině zakázaného pásu (p. typu P)

2.6. Koncentrace elektronů a děr

2.6.1. Vztahy pro výpočet koncentrace elektronů a děr

Počet elektronů na jednotku objemu ve vodivostním pásu, ležících mezi energiemi E a $E + dE$, můžeme spočítat jako součin počtu dovolených stavů v tomto energetickém intervalu a pravděpodobnosti jejich obsazení elektronem, tedy $f(E)g_C(E)dE$.

Chceme-li spočítat celkový počet elektronů ve vodivostním pásu, musíme tento vztah integrovat přes všechny energie vodivostního pásu, tedy od dna vodivostního pásu E_C až po jeho strop E_{strop}

$$n = \int_{E_C}^{E_{strop}} f(E) g_C(E) dE \quad (2-5)$$

Podobný vztah můžeme napsat i pro celkový počet děr ve valenčním pásu, integrujeme-li od dna valenčního pásu E_{dno} do jeho stropu E_V .

$$p = \int_{E_{dno}}^{E_V} [1 - f(E)] g_V(E) dE \quad (2-6)$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu z rovnic (2-3a) a (2-4), pak dostaneme pro koncentraci elektronů ve vodivostním pásu a děr ve valenčním pásu.

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_C}^{E_{strop}} \frac{\sqrt{E - E_C} dE}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \quad (2-7)$$

$$p = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_{dno}}^{E_V} \frac{\exp[(E - E_F) / kT] \sqrt{E_V - E} dE}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \quad (2-8)$$

Po integraci a dalších úpravách dostaneme důležité vztahy pro výpočet koncentrace elektronů a děr,

$$n = N_C \exp [-(E_C - E_F)/kT]$$

$$p = N_V \exp [-(E_F - E_C)/kT]$$

(2-9)

kde N_C je efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu,

N_V je efektivní hustota stavů ve valenčním pásu.

$$N_C = 2 \left[\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right]^{3/2} = \text{konst} \cdot T^{3/2} \quad (2-10)$$

$$N_V = 2 \left[\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right]^{3/2} = \text{konst} \cdot T^{3/2} \quad (2-11)$$

Vztahy (2-9) však nejsou příliš pohodlné pro běžné výpočty. Protože už víme, že Fermiho hladina u vlastního polovodiče leží ve středu zakázaného pásu ($E_F = E_i$) a dále pro vlastní polovodič platí $n = p = n_i$, můžeme vztahy (2-9) dále zjednodušit:

$$\begin{aligned} n_i &= N_C \exp [-(E_C - E_i)/kT] \\ n_i &= N_V \exp [-(E_i - E_C)/kT] \end{aligned} \quad (2-12)$$

Odtud

$$\begin{aligned} N_C \exp(-E_C/kT) &= n_i \exp(-E_i/kT) \\ N_V \exp(E_V/kT) &= n_i \exp(E_i/kT) \end{aligned} \quad (2-13)$$

Nyní po dosazení ze vztahu (2-12) do původních vztahů (2-9) získáme velmi důležité vztahy:

$$\begin{aligned} n &= n_i \exp [(E_F - E_i)/kT] \\ p &= n_i \exp [(E_i - E_F)/kT] \end{aligned} \quad (2-14)$$

Stejně jako rovnice (2-12) platí rovnice (2-14) pro libovolný polovodič za rovnovážných podmínek.

Nyní si už můžeme odvodit vztah pro podmínku tepelné rovnováhy. Vynásobíme-li rovnice (2-14), dostáváme vztah:

$$n p = n_i^2 \quad (2-15)$$

Vynásobením rovnic (2-9) můžeme vypočítat hodnotu intrinzické koncentrace n_i :

$$n_i^2 = N_C N_V \exp[-(E_C - E_V)/kT] = N_C N_V \exp(-E_G/kT) \quad (2-16)$$

a po odmocnění

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-E_G / 2kT) = \text{konst} \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_G/2kT) \quad (2-17)$$

Z rovnice (2-17) je zřejmé, že intrinzická koncentrace n_i s rostoucí teplotou exponenciálně vzrůstá. Při pokojové teplotě (300 K) je pro křemík n_i přibližně rovno $1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ($= 1,45 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$).

2.6.2. Nábojová neutralita

Další důležitou vlastností polovodičů je zachovávat za rovnovážných podmínek **nábojovou neutralitu**. Předpokládejme stejnoměrně dotovaný polovodič s konstantním počtem atomů dopantů v celém objemu. Za rovnovážných podmínek musí být takovýto polovodič nábojově neutrální, součet všech nábojů v jeho objemu musí být roven nule.

Předpokládáme-li dále, že všechny příměsi jsou ionizované a uvědomíme-li si, že náboj ionizovaných donorů je kladný a náboj ionizovaných akceptorů záporný, pak musí platit:

$$\text{náboj/objem} = qp - qn + qN_D - qN_A = 0 \quad (2-18)$$

nebo

$$p - n + N_D - N_A = 0 \quad (2-19)$$

Vztah (2-19) nám umožňuje provádět další výpočty koncentrace nosičů pro vlastní i nevlastní polovodič.

Vlastní polovodič

Vlastní polovodič neobsahuje žádné příměsi a proto $N_D = 0$, $N_A = 0$. Platí proto

$$\begin{aligned} p - n + N_D - N_A = 0 & \Rightarrow p = n \\ np = n^2 = p^2 = n_i^2 & \Rightarrow n = p = n_i \end{aligned} \quad (2-20)$$

Z podmínky nábojové neutrality jsme tedy dostali stejné výsledky, které jsme na základě našich předchozích úvah pro vlastní polovodič předpokládali.

Nevlastní polovodič

Předpokládejme nyní nedegenerovaný polovodič typu N s plně ionizovanými příměsemi. Reálný polovodič typu N obsahuje vždy určité množství akceptorových příměsí (takový polovodič je nazýván **kompensovaný polovodič**), ale platí pro něj $N_D \gg N_A$ nebo $N_D - N_A \approx N_D$. Z podmínky nábojové neutrality plyne

$$p - n + N_D = 0$$

(2-21)

a z podmínky tepelné rovnováhy (2-15):

$$p = n_i^2/n$$

(2-22)

Po dosazení vztahu

(2-22) do (2-21) dostaneme:

$$n_i^2/n - n + N_D = 0$$

$$n^2 - nN_D - n_i^2 = 0$$

(2-23)

což je kvadratická rovnice s neznámou **n**, jejíž řešení je

$$n = \frac{N_D}{2} + \left[\left(\frac{N_D}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2}$$

(2-24)

Odtud můžeme pro daný polovodič a teplotu spočítat koncentraci elektronů **n** a z (2-22) pak koncentraci děr **polovodiče**.

Pro většinu běžných výpočtů nám však postačí následující úvaha:

Při pokojové teplotě je pro křemík n_i asi 10^{10} cm^{-3} . Koncentrace dopantů bývá nejméně 10^{14} cm^{-3} , tedy $N_D \gg n_i$. Z (2-24) potom plyne $n \approx N_D$ a $p \approx n_i^2/N_D$. Analogickou úvahu můžeme provést i pro polovodič typu P. Shrneme-li tyto výsledky,

pak pro nedegenerovaný polovodič typu N s plně ionizovanými příměsemi a při splnění podmínek $N_D \gg N_A$ a $N_D \gg n_i$ platí:

$$n = N_D, \quad p = n_i^2/N_D$$

(2-25 a,b)

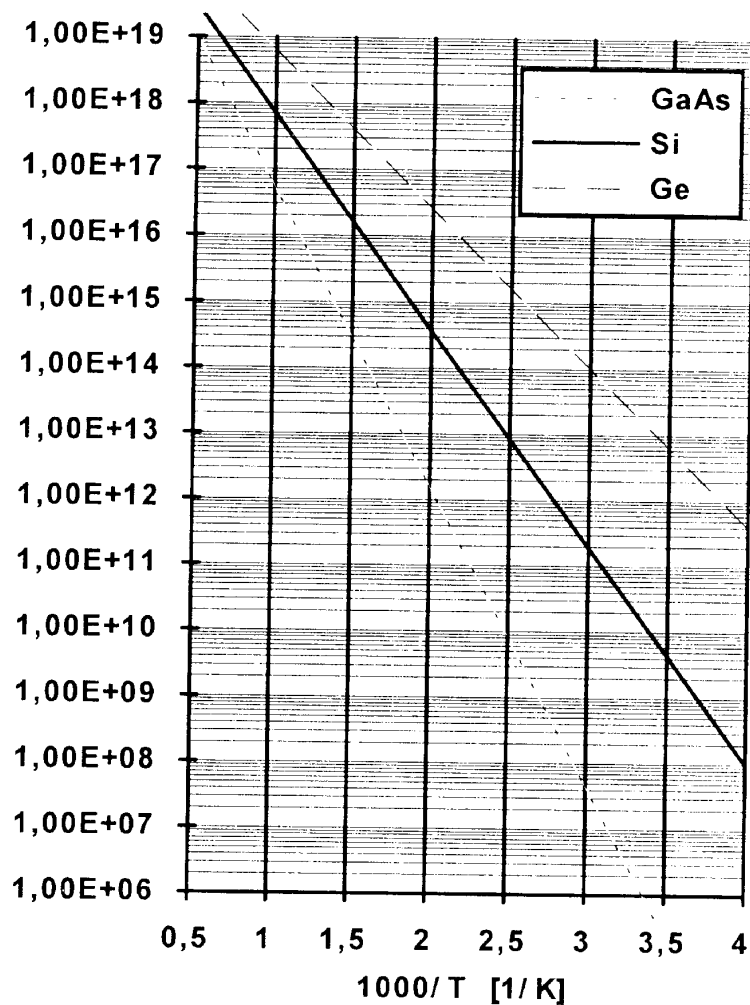
a pro nedegenerovaný polovodič typu P s plně ionizovanými příměsemi a při splnění podmínek $N_A \gg N_D$ a $N_A \gg n_i$

$$p = N_A, \quad n = n_i^2/N_A$$

(2-26 a,b)

Při vzrůstající teplotě se intrinzická koncentrace n_i zvětšuje viz (2-17) a Obr. 2-12) a při dostatečně vysoké teplotě může dokonce přesáhnout koncentraci příměsí N_A nebo N_D .

Jestliže bude teplota dále vzrůstat, $n_i \gg N_D$ a z rovnice (2-24) vyplyne, že $n \approx n_i$. Z (2-25b) potom dostaneme také $p \approx n_i$. Při dostatečně vysokých teplotách se každý polovodič stává vlastním polovodičem (viz také Obr. 2-6).



Obr. 2-12 Teplotní závislost intrinzičké koncentrace nosičů n_i [cm⁻³] pro GaAs, Si, Ge

2.7. Fermiho hladina

2.7.1. Výpočet polohy Fermiho hladiny

Z Obr. 2-11. a ze vztahů (2-9) nebo (2-14) je zřejmá závislost koncentrace nosičů na poloze Fermiho hladiny. Jestliže za rovnovážných podmínek známe n nebo p , můžeme vypočítat E_F nebo naopak.

2.7.2. Vlastní polovodič

Protože pro vlastní polovodič platí $n = p$, pak ze vztahů (2-9) plyne

$$N_C \exp[(E_F - E_C)/kT] = N_V \exp[(E_V - E_F)/kT] \quad (2-27)$$

Řešením této rovnice pro E_F a dosazením za N_V , a N_C z (2-10) (2-11) dostaneme

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{3/2} \quad (2-28)$$

Protože efektivní hmotnost elektronů a děr není při teplotách větších než 0 K stejná, můžeme vypočítat, že Fermiho hladina se s teplotou posunuje v zakázaném pásu nahoru a leží asi 0,012 eV nad středem zakázaného pásu při teplotě 300 K. Pro běžné výpočty však můžeme tuto odchylku zanedbat.

2.7.3. Nevlastní polovodič

Pro nevlastní polovodič typu N platí přibližně $n = N_D$ a po dosazení do (2-14)

$$N_D = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] \quad (2-29)$$

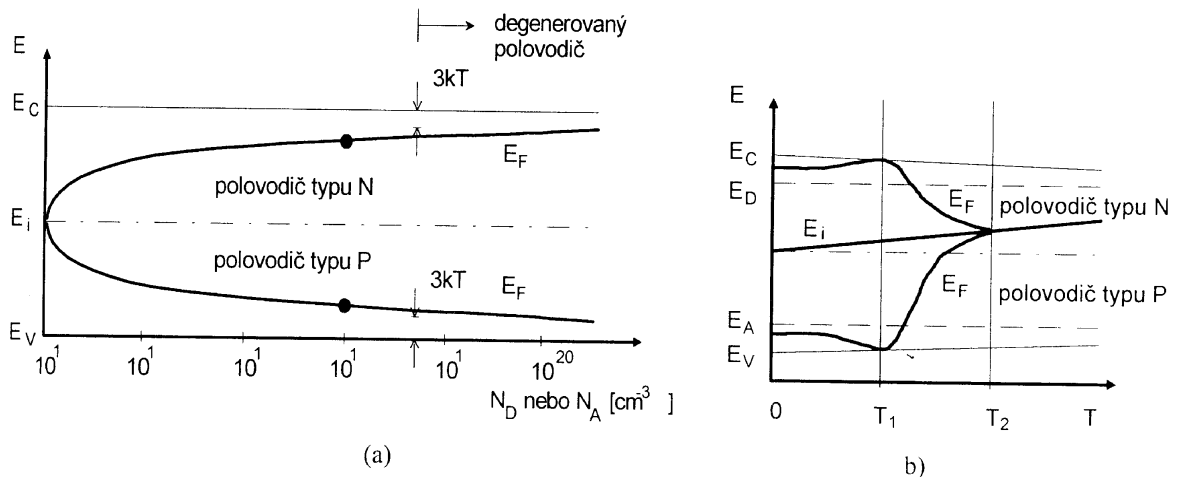
Odtud plyne

$$E_F - E_i = kT \ln(N_D/n_i) \quad (2-30)$$

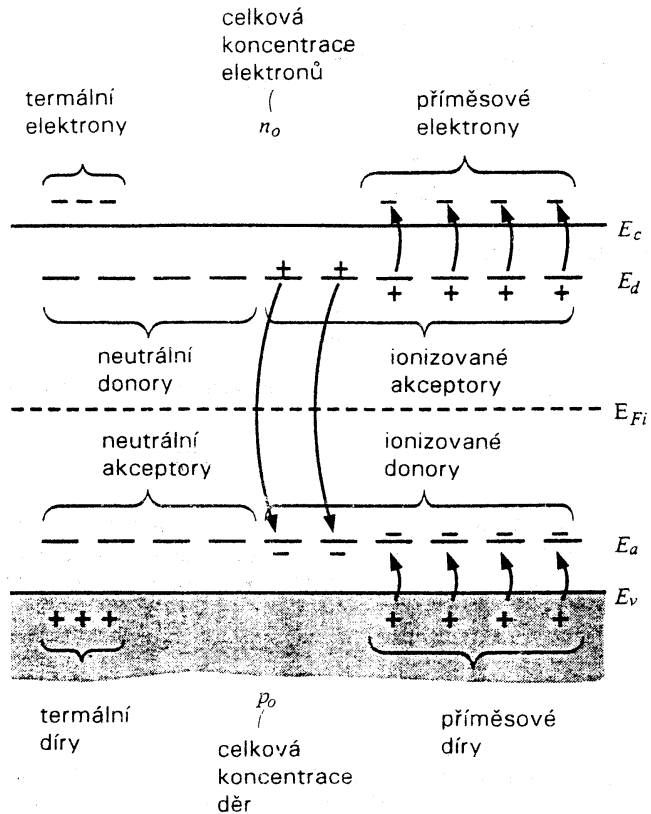
Analogicky pro polovodič typu P dostaneme

$$E_i - E_F = kT \ln(N_A/n_i) \quad (2-31)$$

Z rovnic (2-61) a (2-54) vyplývá, že Fermiho energie je závislá na koncentraci příměsí v nevlastním polovodiči a na teplotě. Fermiho hladina se posunuje se vzrůstající teplotou i se vzrůstající koncentrací příměsí nahoru v polovodiči typu N a dolů v polovodiči typu P. Tato závislost je schématicky naznačena na Obr. 2-13. Jestliže se Fermiho hladina přiblíží k E_C , nebo E_V , na méně než $3 kT$, dostaneme **degenerovaný** nebo **vysoce dotovaný polovodič**, který označujeme jako N^+ nebo P^+ materiál. Maximální koncentrace příměsí pro nedegenerovaný polovodič jsou při 300 K pro Si $N_D \approx 1,6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ a $N_A \approx 7,7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.



Obr. 2-13 a) Poloha Fermiho hladiny v Si v závislosti na koncentraci příměsí. V označeném bodě je nakreslena b) závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě, teploty T_1 a T_2 jsou aktivační teploty. Poloha Fermiho hladiny v intrinzickém polovodiči je označena E_i . Se stoupající teplotou se také zužuje šířka zakázaného pásu se strmostí řádu $10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$



Obr. 2-14 Vzájemná kompenzace akceptorů a donorů v polovodiči.

2.7.4. Slabě kompenzovaný polovodič

Pro koncentrace nosičů náboje je opět podstatná poloha Fermiho hladiny. Tu je možno určit z podmínky elektrické neutrality krystalu. Součet koncentrace elektronů ve vodivostním pásu a koncentrace ionizovaných akceptorů N_A^+ musí být roven součtu koncentrace děr ve valenčním pásu a koncentrace ionizovaných donorů N_D^+ :

$$n_0 + N_a^- = p_0 + N_d^+$$

(2-32)

nebo

$$n_0 + (N_a - p_a) = p_0 + (N_d - n_d)$$

(2-33)

Bereme-li v úvahu obsazení příměsových hladin, pak dostaneme vztah: .

$$\frac{n(n + N_a)}{N_D - N_A - n} = \frac{1}{g} N_c \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$$

(2-34)

Dále se omezíme na případy, kdy:

$$N_D > N_A, \quad p = 0$$

(2-35)

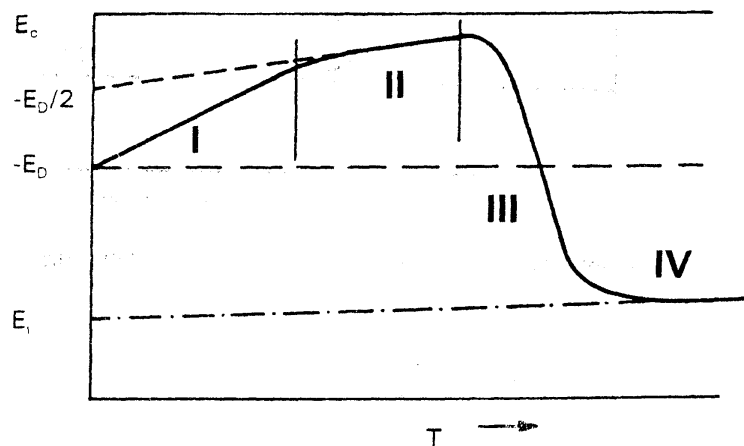
Pokud jsou v polovodiči přítomny oba typy příměsí, dochází k jejich vzájemné kompenzaci. Zde je možno rozlišit dvě úrovně kompenzace - slabou a silnou.

Slabě kompenzovaný polovodič je charakterizován podmínkou:

$$N_D \gg N_A$$

(2-36)

Při určování polohy Fermiho hladiny se používají různé formy aproximace ve čtyřech teplotních oblastech.



Obr. 2-15 Závislost Fermiho hladiny na teplotě pro slabě kompenzovaný polovodič.

I. Při nízkých teplotách dochází pouze ke slabé ionizaci příměsí. Můžeme tedy předpokládat, že:

$$n \ll N_D - N_A, \quad n \ll N_A$$

(2-37)

Rovnice (2-34) přejde na tvar:

$$n = \frac{N_D - N_A}{N_A} \frac{N_c}{g} \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$$

(2-38)

a pro Fermiho hladinu bude platit:

$$E_F = -E_D + kT \ln \frac{N_D - N_A}{g N_A}$$

(2-39)

II. Při mírně vyšších teplotách bude splněna podmínka:

$$n \ll N_D - N_A, \quad n \gg N_A$$

(2-40)

Potom platí:

$$n = \sqrt{\frac{(N_D - N_A)N_c}{g}} \exp\left(-\frac{E_D}{2kT}\right)$$

(2-41)

Fermiho hladinu určíme ze vztahu:

$$E_F = -\frac{E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D - N_A}{gN_c}$$

(2-42)

III. V oblasti teplot, kde platí:

$$kT \gg E_D$$

(2-43)

Dochází k úplné ionizaci příměsí a pro koncentraci elektronů tedy platí:

$$\begin{aligned} n_0 + N_A &= \frac{n_i^2}{n_0} + N_D \\ n_0^2(N_D - N_A)n_0 - n_i^2 &= 0 \\ n_0 &= \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left[\frac{N_D - N_A}{2}\right]^2 + n_i^2} \end{aligned}$$

(2-44)

Pro $N_D - N_A \gg n_i$

$$n = N_D - N_A$$

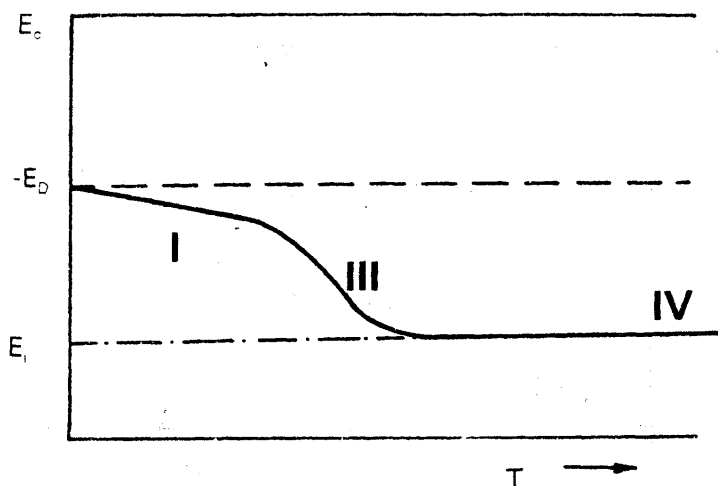
(2-45)

IV. V oblasti vysokých teplot již převažuje mezipásová generace nosičů a intrinzická koncentrace převyšuje koncentraci příměsí. Jedná se o oblast vlastní vodivosti, kdy Fermiho hladina splyne s intrinsickou hladinou (Obr. 2-15):

$$E_F = E_i$$

(2-46)

2.7.5. Silně kompenzovaný polovodič



Obr. 2-16 Závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě pro silně kompenzovaný polovodič

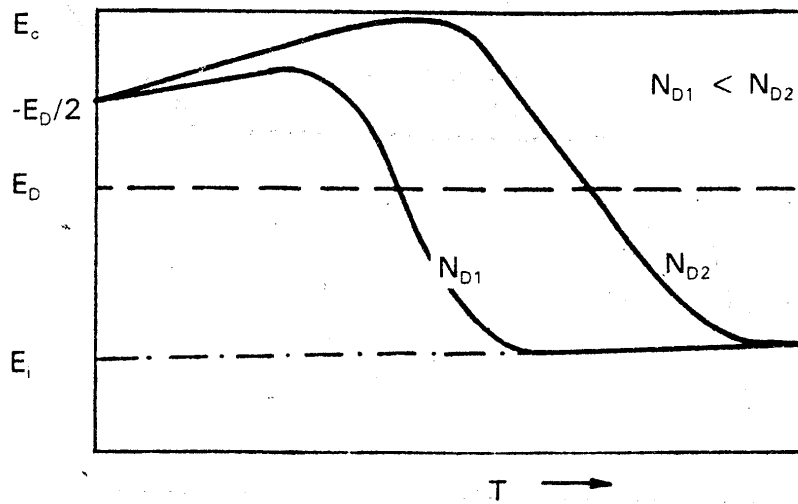
V **silně kompenzovaném polovodiči** (Obr. 2-16), který je charakterizován podmínkou:

$$N_D \geq N_A, \quad N_D - N_A \ll N_A$$

(2-47)

není možno splnit podmínky pro teplotní oblast II. a oblast I. tedy přímo přechází do oblasti III.

2.7.6. Nekompensovaný polovodič



Obr. 2-17 Závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě pro nekompensovaný polovodič.

V případě nekompensovaného polovodiče typu N musí platit:

$$n = N_D^*$$

(2-48)

a tedy :

$$E_F = -E_D + kT \ln \left[\frac{1}{4} \sqrt{1 + \frac{16N_D}{gN_c} \exp\left(\frac{E_D}{kT}\right)} - \frac{1}{4} \right]$$

(2-49)

Pro nízké teploty, je možno vzhledem k slabé ionizaci příměsí předpokládat, že:

$$n \ll N_D$$

(2-50)

a tedy

$$n = \left[\frac{N_D N_c}{g} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{E_D}{2kT}\right) \quad (2-51)$$

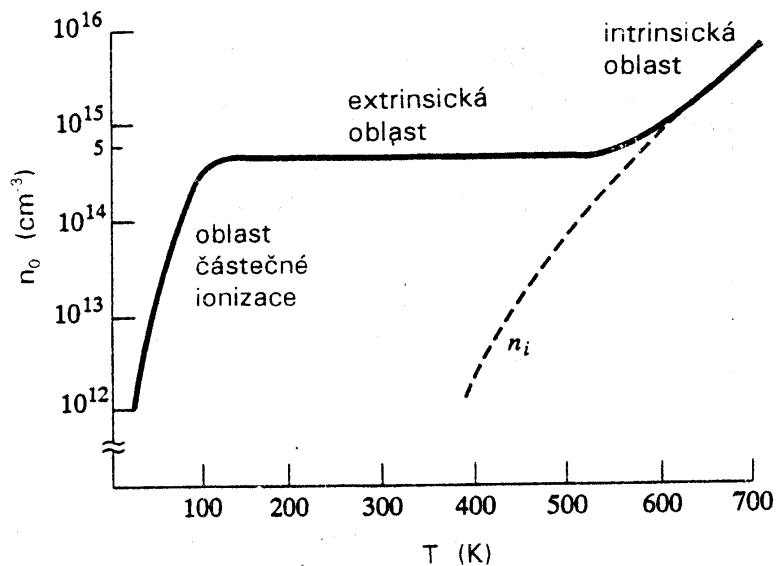
Fermiho hladina je pak určena vztahem

$$E_F = -\frac{E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{gN_c} \quad (2-52)$$

Při vyšších teplotách, kdy je ionizace úplná, platí (Obr. 2-17) :

$$E_F = kT \ln \frac{N_D}{N_c} \quad (2-53)$$

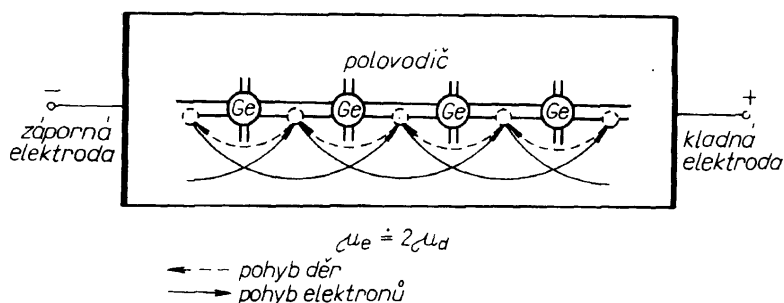
Poloze Fermiho hladiny odpovídá koncentrace nosičů náboje. Na Obr. 2-18 je teplotní závislost koncentrace elektronů v křemíku s dotací $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.



Obr. 2-18 Závislost koncentrace elektronů Si na teplotě. $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

2.8. Pohyblivost

Vlivem **elektrického pole** se volné nosiče náboje - elektrony a díry usměrní tak, že elektrony se podle zákonů elektrostatiky pohybují od záporné elektrody ke kladné (Obr. 2-1). Při pohybu elektronu od jednoho atomu germania (Ge) k dalšímu zůstává ve valenční vazbě dvou sousedních atomů Ge prázdné místo, které se pohybuje opačným směrem, tj. od kladné elektrody k záporné. Znázorňují to čárkované čáry se šipkami na Obr. 2-19. ohyb elektronů je na obrázku vyznačen plnými čarami se šipkami. Míru pohyblivosti volných nosičů udává tzv. **pohyblivost**



Obr. 2-19 Pohyb nosičů náboje v polovodiči vlivem elektrického pole

Pohyblivost je veličina charakterizující pohyb volných nosičů náboje v polovodiči, na který působí elektrické pole. Pohyblivost se udává vztahem:

$$\mu = \frac{v}{E},$$

(2-54)

kde v je střední hodnota rychlosti nosiče náboje,

E velikost intenzity elektrického pole ve směru žádaného působení.

Nejčastěji se uvádí driftová pohyblivost a Hallova pohyblivost.

Driftová pohyblivost je průměrná rychlost v nosičů náboje vyvolaná jednotkovou intenzitou elektrického pole E_x působící ve směru pohybu x . V anizotropním krystalu je to obecně tenzor.

Hallova pohyblivost, μ_H je výsledná pohyblivost. zjištěná z měření Hallovy konstanty R_H . Udává se vztahem

$$\mu_H = R_H \sigma ,$$

(2-55)

kde σ je konduktivita (měrná vodivost).

$$\sigma = en\mu ,$$

(2-56)

kde e je elementární náboj,
 n koncentrace nosičů náboje,
 μ pohyblivost příslušných nosičů.

Pro proud děr platí

$$I_d = S\sigma_d E$$

(2-57)

kde konduktivita děr je $\sigma_d = e n_d \mu_d$. Pro proud elektronů platí

$$I_e = S\sigma_e E$$

(2-58)

kde konduktivita elektronů je $\sigma_e = e n_e \mu_e$.

$$I_E = I_d + I_e = S(\sigma_e + \sigma_d) E$$

(2-59)

kde S je průřez (plochou kolmý na dráhu nosičů náboje (je stejný po celé dráze),
 E intenzita elektrického pole ve směru pohybu nosičů náboje,
 n_d koncentrace děr v jednotce objemu,

- μ_d pohyblivost děr,
- n_e koncentrace elektronů v jednotce objemu,
- μ_e pohyblivost elektronů.

Celkový proud v polovodiči je dán součtem proudu J_E , vznikajícího vlivem elektrického pole, a difúzního proudu J_D , působících ve stejném směru, nebo přesněji součtem jejich proudových hustot ($J = I/S$). Platí

$$J_C = J_E + J_D \quad (2-60)$$

Pásové schéma homogenního polovodiče v elektrickém poli s intenzitou E působí na elektron silou

$$F = -eE \quad (2-61)$$

V homogenním polovodiči platí Ohmův zákon, pokud elektrony během průletu střední volné dráhy v elektrickém poli nezískají rychlost srovnatelnou s tepelnou rychlostí elektronů.

2.9. Teplotní závislost

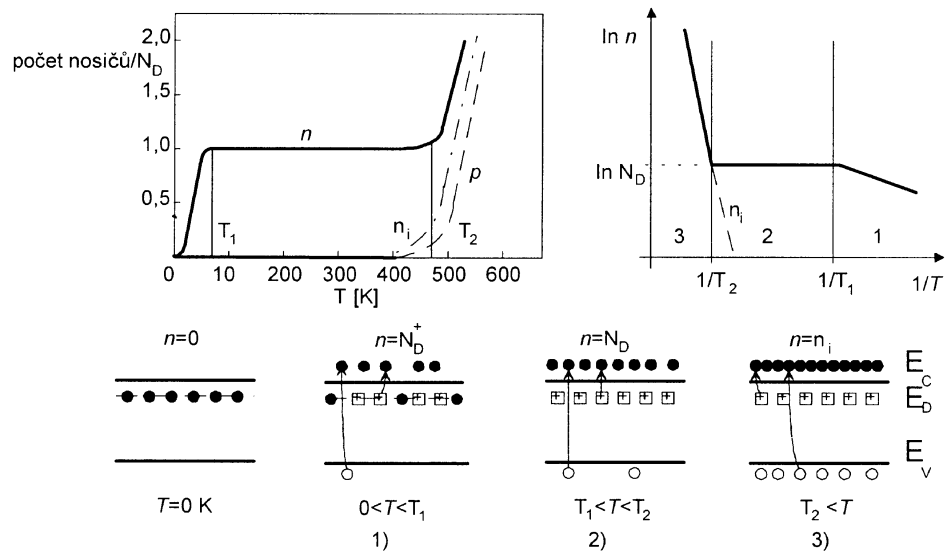
2.9.1. Teplotní závislost koncentrace nosičů náboje v polovodičích

Kromě nevlastní vodivosti má i nevlastní polovodič vlastní vodivost. Je možné odvodit, že za **tepelné rovnováhy** platí mezi koncentrací děr a volných elektronů důležitý vztah:

$$n p = n_i^2 \quad (2-62)$$

Koncentrace volných nosičů náboje závisí na koncentraci donorů a akceptorů, teplotě a pásové struktuře polovodiče. Pro pochopení principů vlastní a nevlastní

vodivosti nám dobře poslouží závislost koncentrace volných nosičů na teplotě např. pro polovodič typu N - viz obr.



Obr. 2-20 Závislost koncentrace nosičů na teplotě u nevlastního polovodiče typu N – pro $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Při nulové teplotě ($T = 0 \text{ K}$) je koncentrace obou typů nosičů rovna nule. Při zvyšování teploty dochází nejprve k aktivaci nevlastních příměsí, protože lokální hladiny donorů jsou v těsné blízkosti vodivostního pásu. koncentrace volných elektronů je přibližně rovna koncentraci těchto aktivovaných donorů (N_D^+). Při tzv. **první aktivační teplotě** T_1 (pro Si asi 80 K) dochází téměř k plné aktivaci příměsí a při dalším zvyšování teploty až do teploty T_2 je koncentrace nosičů téměř konstantní a rovná koncentraci donorů (N_D).

Při teplotě T_2 , která se nazývá **druhou aktivační teplotou**, dochází k aktivaci mechanismu vlastní generace a z nevlastního polovodiče se stává polovodič vlastní. Oblast mezi první a druhou aktivační teplotou (označenou jako oblast 2 na obr.), tedy přibližně interval 100 až 450 K, vymezuje normální pracovní teplotní rozsah většiny polovodičových součástek (tzv. **extrinzickou teplotní oblast**), kdy se polovodič chová jako nevlastní s poměrně malou závislostí vodivosti na teplotě. Pod první aktivační teplotou se polovodič nachází v **oblasti zamrznutí** (oblast 1) a nad

druhou aktivační teplotou (oblast 3) v **intrinzické teplotní oblasti**. Sklon přímky **$\ln n = f(1/T)$** v oblasti 3 odpovídá aktivační energii, respektive ΔE_G .

3. Praktická část

3.1. Co je to INTERNET

Internet chápeme jako celosvětovou síť počítačů navzájem propojených. Propojení počítačů je provedeno zpravidla pomocí síťových karet či modemů.

V této síti se vyskytuje velké množství rozličných druhů počítačových sítí, které nemusí obsahovat ani stejný operační systém ani stejné hardwarové prostředky. Dalo by se říci, že v této síti mohou být připojen s čímkoliv, třeba mikrovlnou troubou, která bude natolik chytrá, že bude obsahovat alespoň základní softwarové vybavení pro připojení do celosvětové sítě.

Ted' jsem naznačil, že pro komunikaci je třeba nějaký software pro připojení do sítě. Zde bylo třeba vybudovat, vymyslet, nějaký standard, aby bylo možno onu komunikaci v síti provést. Tímto standardem pro komunikaci se stal protokol TCP/IP.

3.2. Internete, co nám nabízíš?

Onou základní myšlenkou pro vznik počítačové sítě byla komunikace mezi odlehlými místy. Komunikace ve smyslu zasílání pošty, přesně takové jako známe dnes i my a tou je email. To se datoval rok 1968.

Postupem času se tato síť stále rozrůstala a zrychlovala, tedy zvětšovala se propustnost dat a také vzdálenost, kterou data „tekly“.

Pro nás jedním z důležitých dat je rok 1992, kdy se světu představil tak zvaný „hypertext“. To jsou naše dnešní WWW stránky. Jak je vidno, technologie je to nová, ale prudce vzrostla v oblibě a masově se rozšířila. A to hlavně kvůli svým schopnostem podávat na internetu výklad informací ve formě textu a grafiky, což ve skalních dobách internetu nebylo myslitelné. Tehda se posílaly dokumenty co by soubory a nebylo je tudíž možno otevírat a číst aniž bychom si je nejprve stáhli na svůj počítač.

3.3. Tvorba WWW

3.3.1. Příprava

Základem všech publikací je sběr informací a hlavně literatury. V této fázi nelze jednoznačně říci jak a kde literaturu hledat, ale stačí vycházet jako třeba já, vybrat základní literaturu, v mém případě skripta, a dál je v hodně doplnit.

3.3.2. V čem „programovat“

Ano, je to tak, ono se dá opravdu říci o tvorbě WWW stránek, že autor je programuje. Pokud jste ještě nikdy nenahlédli pod pokličku souborům umístěných na WWW stránkách, tak věřte, že tyto soubory jsou z 99% obyčejné textové soubory, které mají strukturu programovacího jazyka. V našem případě jazyka HTML.

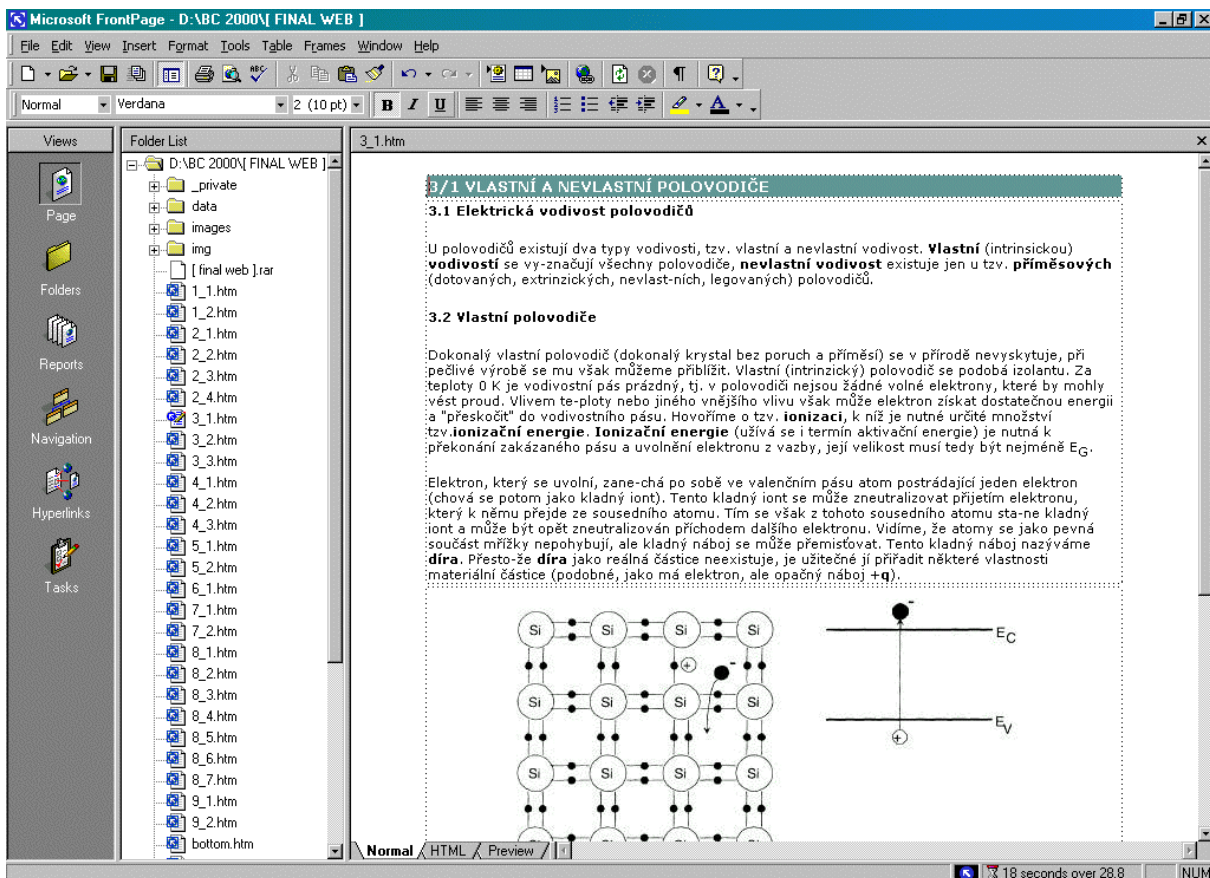
Kromě HTML existují ještě jiné pomocné jazyky a to buď přímo určen, tedy pouze pro tvorbu WWW, například javascript, nebo můžeme použít vyšších programovacích jazyků, ale to je jen otázka vkusu a určení použití stránek

V mém případě převládal jazyk HTML podpořen javascripty. A protože jsem už řekl, že HTML dokumenty jsou čistě textové tzn., že neobsahují žádné obrázky, ty s k souborům připojí v době prohlížení.

V další části ukáži jak jsem postupoval při návrhu těchto WWW stránek, co jsem použil a kde jsem především čerpal informace.

3.4. Programy pro tvorbu WWW stránek

3.4.1. Microsoft Front Page (MS FP)



Obr. 3-1 Ukázka práce v programu MS FP

Produkt společnosti Microsoft nebude třeba asi nikomu představovat. S jejími produkty se dostane do styku každý, teda omlouvám se „menšině“ uživatelů Mac a Linux či jiných alternativních operačních systémů (OS), kdo pracoval na PC v prostředí Windows. Z tohoto plyne, že celá tato práce byla vytvořena v prostředí Windows.

Práce byla kompletně, až na nějaké výjimky, napsána v MS FP. Je jednoduché se z programem naučit pracovat, pokud už umíte zacházet s jinými programy od společnosti Microsoft. Navíc v kombinaci MS WORD a MS FP, lze dosáhnou slušných výsledků.

Program je šířen v balíku MS Office, nebo zadarmo s Internet Explorerem.

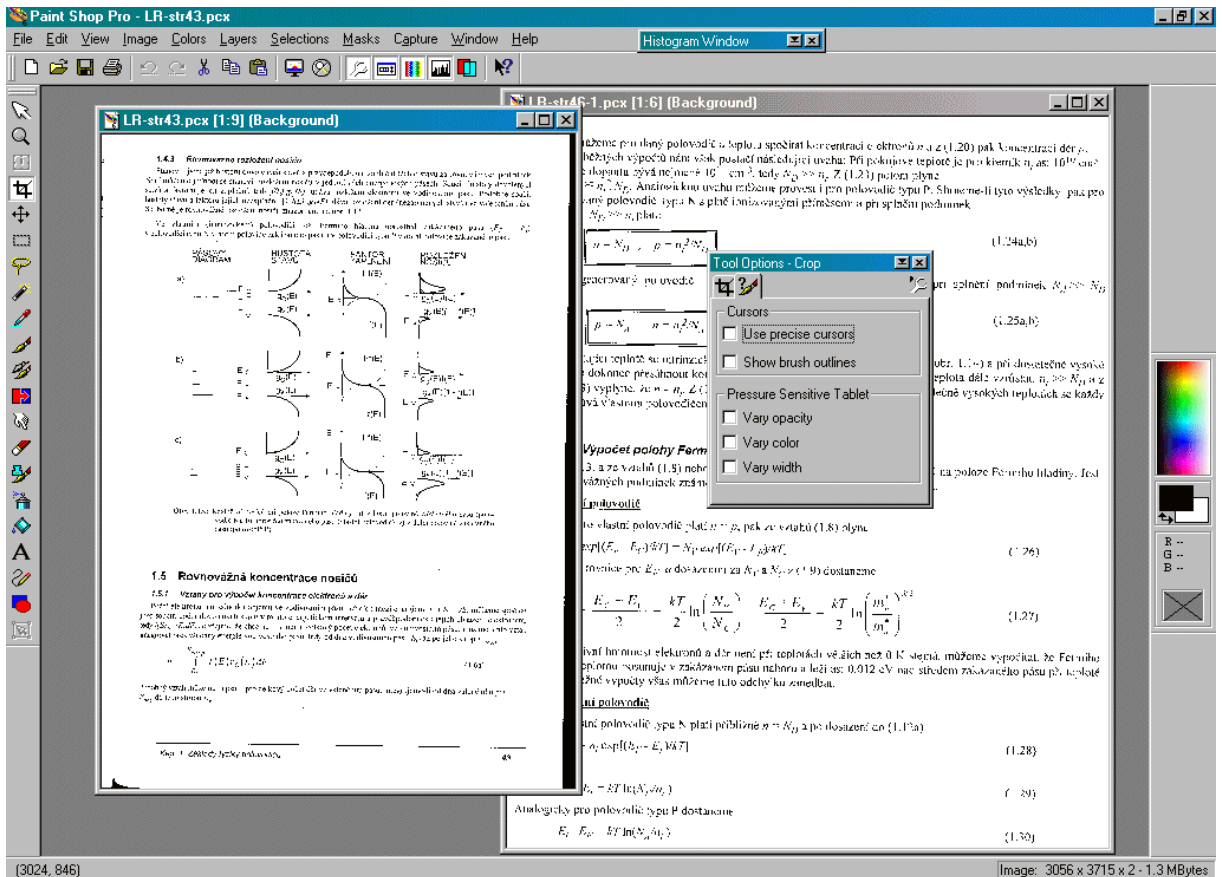
Program MS FP podporuje i skriptování, tvorbu dynamických stránek, manipulaci s objekty typu „drag ‘n’ drop“, čili táhni a pusť. Celou dobu máte možnost pracovat v prostředí, které vám hned ukazuje, jak bude vypadat vaše finální podoba. Je zde také samozřejmě možnost úpravy zdrojového kódu. Tedy, vše v jednom.

V programu MS FP lze využít veškerý potenciál v tvorbě HTML dokumentů vycházející z jeho normy. Běžně jsou zde dostupní pomocníci pro tvorbu FRAME – rámců, tabulek, oken atd. Dalo by se říci, že tato aplikace plně postačuje široké veřejnosti vzhledem ke své ceně i možnostem a není třeba hledat komerční produkty, které ač nabízí určitě nějakou tu dobrůtku navíc, stojí už ale mnohem více než zadarmo.

Mnou zvolená koncepce stránek vychází z toho, co je na Internetu nejčastěji použito. Bylo použito rozlišení obrazovky 800x600 bodů, čemuž odpovídá běžné rozlišení, dnes nejpoužívanějších monitorů 14“ a 15“. Pro zobrazení je třeba použít WWW Browser – WWW prohlížeč a to buď Internet Explorer verze 4 a výše (už jen málokdo používá verze nižší, v mém okolí nikdo) nebo Netscape Navigator/Communicator 4. Vše bylo na těchto prohlížečích odladěno, ale může se stát, že nastane nějaký problém a vámi oblíbený prohlížeč, nebude chtít spolupracovat. V tomto případě budete muset hledat chybu sami, nebo pokud se vám to nepovede, můžete mě kontaktovat a chybu společně odstraníme.

Bližší informace hledejte na adrese <http://www.microsoft.cz>

3.4.2. Paint Shop Pro 6 (PSP)



Obr. 3-2 Ukázka práce v programu PSP

Ke grafickému zpracování neodmyslitelně patří také programy, které se zabývají tvorbou, úpravou, prostě zpracováním obrazových předloh. A to jak fotek nasnímaných v počítači pomocí skeneru nebo stažené přímo z digitálního fotoaparátu.

Jedním z těch mnoha programů, které pokrývají tuto oblast patří i PSP. Netvrdím, že je jediným, či nejlepším ze všech, ale jako běžný uživatel, student, hodnotím jeho cenu a výkon. Program mne nadchl možnostmi za velmi příznivou cenu. Je totiž šířen v licenci SHAREWARE, takže za minimální poplatky, cenu, lze si tento produkt objednat k trvalému užívání, nebo jako já, jen na dobu 30 dní, pak je třeba tento program zaregistrovat nebo smazat.

Vkládání grafiky na Internet je ošemetná věc. Je třeba si uvědomit, kolik je jí třeba a podle toho zvolit příslušný formát obrázků. Sice velmi působivě vypadají stránky, které překypují grafikou, ale představím-li si studenta, který je doma připojen pomocí modemu, tak mu tato stránka způsobí nemalé potíže. Modem přenáší data po telefonní lince a to maximální rychlostí 56kb/s a dotýčný student by pak při prohlížení stránek mohl strávit celé hodiny, aniž by se dostal k cíli.

Takže, obrázky ano, ale v úsporné míře. Měly by mít co nejmenší velikost, ale pozor, ne na úkor kvality.

V mém případě bylo použito formátu JPEG a GIF, což jsou dva nejrozšířenější formáty pro zpracování WWW stránek. Tyto grafické formáty v sobě zahrnují kompresi a tím podstatně snižují velikost výsledného souboru. Formát JPEG má tzv. ztrátovou kompresi, která se nastavuje v %, jako ztráta a formát GIF má tzv. bezztrátovou kompresi. Formát JPEG se hodí spíše pro obrázky, fotky atd. a formát GIF pro grafiku, u které mají být rozlišeny detaily v co největší míře, třeba jako rovnice, mat. výrazy atd.

PSP si s těmito formáty radí výtečně. Umí i jiné, ale ty už nelze v takové míře využít na WWW stránkách.

Bližší informace o programu PSP na webových stránkách <http://www.jasc.com/>.

3.4.3. FTP program

Pokud se nám už podařilo sestavit vhodně strukturované stránky je třeba je nějak dostat na počítač, kterému se říká na Internetu server, který nám umožní zviditelnit naše stránky na Internetu. K tomu potřebujeme využít služeb protokolu FTP.

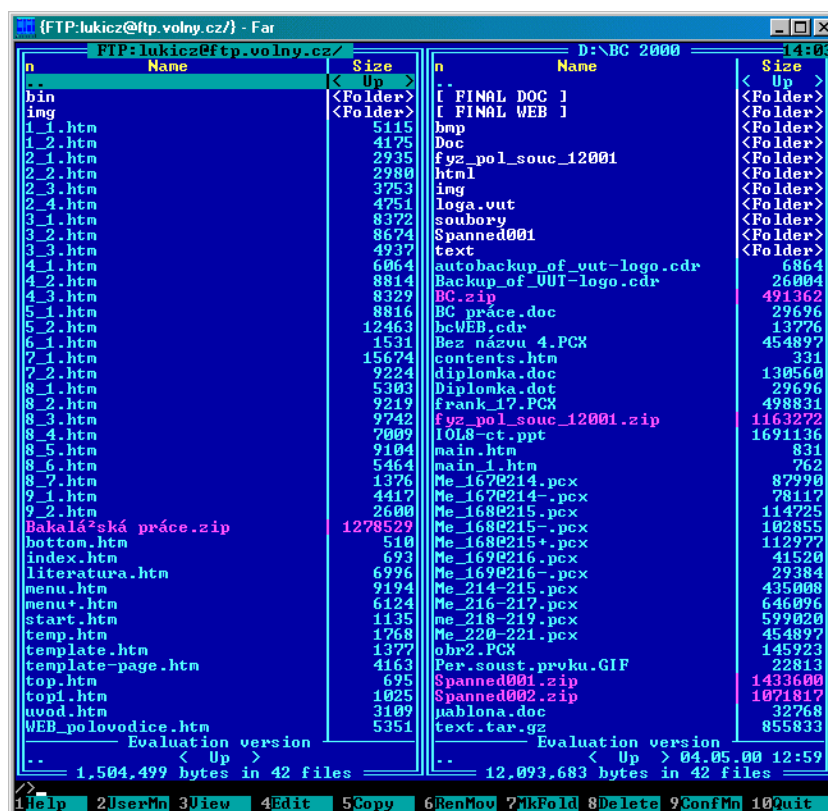
S protokolem FTP pracují programy, které mají odvozen název, právě z názvu protokolu FTP. To znamená, že svoje data přesuneme na stranu serveru pomocí nějakého takové programu.

Mnoho z těchto programů je volně šířitelných a tím i zadarmo. Nebude problém nějaký takový program třeba najít u vás doma, pokud jste připojeni do Internetu.

Tyto programy můžeme ještě jednoduše rozdělit podle toho jak jsou vřidné k uživateli. Máme proto programy s grafickým rozhraním, ty lze ovládat myší, nebo programy, které jsou určeny pro příkazový řádek. Standardním programem ve Windows je „příkaz“ ftp. Je nutné spustit příkazový řádek a v něm pak pracovat.

Mnohem snazší pro uživatele jsou ony grafické nástavby nebo celé programy, pracující v grafické podobě, podobné exploreru ve Windows. Například FTP Voyager, WS FTP, Cute FTP aj.

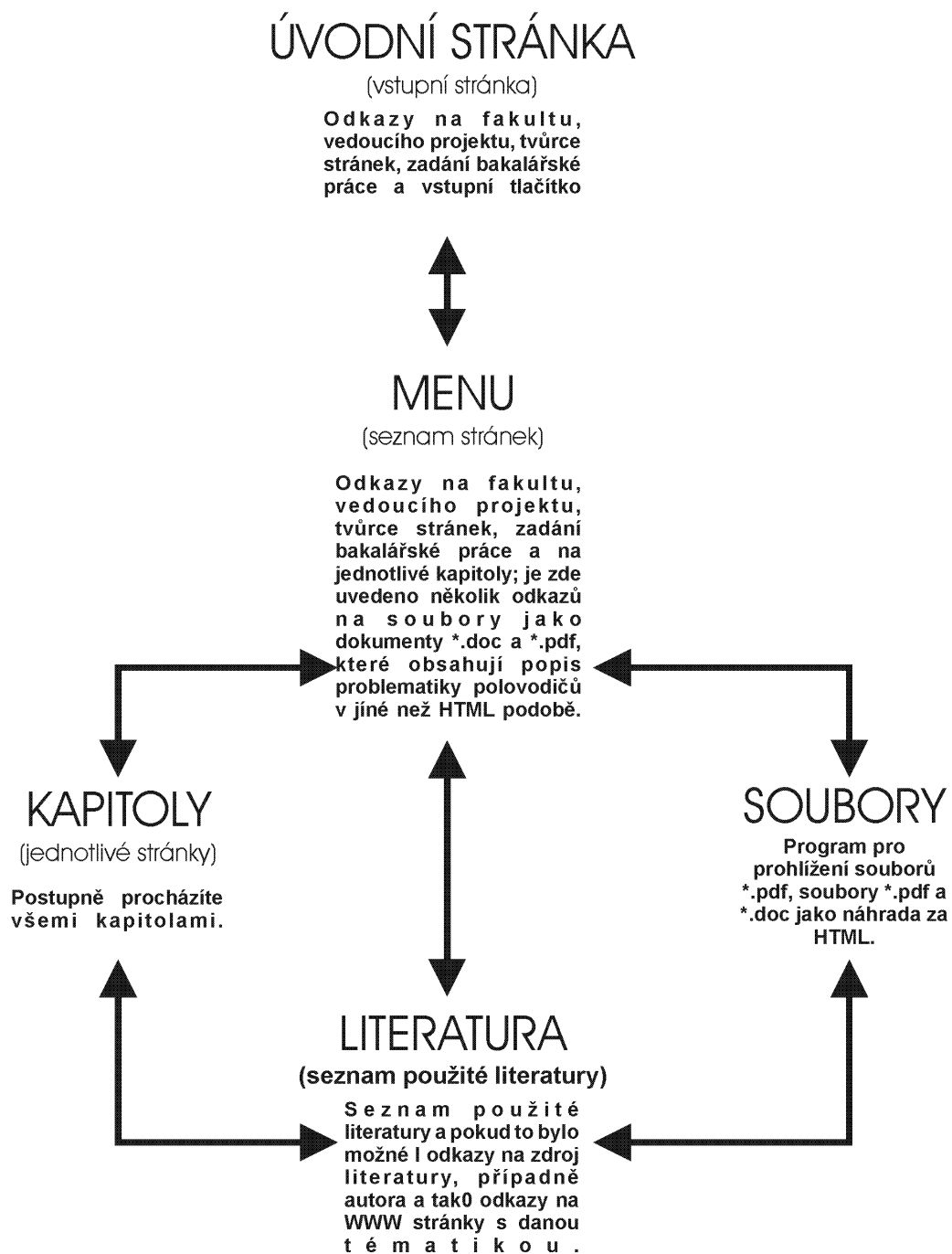
Také některé souborové manažery umí pracovat, byť třeba v omezené míře, s protokolem FTP. Můžeme brát v úvahu třeba program Windows Commander, FAR Manager aj.



Obr. 3-3 Přenos dat FTP protokolem v programu FAR

3.5. Struktura WWW stránek (webových stránek)

STRUKTURA WWW STRÁNEK



Obr. 3-4 Schématická struktura WWW stránky

WWW stránky, které popisují, mají strukturu, kterou vidíte na Obr. 3-4.

Stránky samotné jsou tvořeny ze dvou částí. První část, horní, zabírá informační proužek, který se nachází v horním rámci – FRAME. Větší okno je tvořeno rámcem druhým. Toto okno již zabírá větší část plochy. Horní rámec obsahuje po dobu prohlížení stále stejný obsah, pro snazší orientaci, kdežto spodní rámec, slouží k zobrazování informací. Tedy i samotných stránek.

Při vstupu se nejdříve otevře vstupní stránka, která pouze informativní charakter. Vedou z ní jen odkazy na stránky fakulty FEI a UMEL, dále na vedoucí mé práce. A stránka končí odkazem VSTUPTE. Tento odkaz nás posune o stránku dále a to na MENU. Vzhled stránky a ovládání je popsáno v příloze.

Z této stránky pak máme hned několik možností pokračovat v prohlídce. Buď budu postupovat po kapitolách na internetu ve formátu HTML, nebo si mohu jednotlivé kapitoly stáhnout k sobě na lokální disk a to ve formátu *.doc (MS WORD97/2000) nebo *.pdf (Portable Document Format). K tomu ale potřebujeme buď prohlížeč *.pdf souboru nainstalovaný na lokálním disku, či doma v počítači, nebo pokud už máme nainstalován tento program korektně a používáme WWW Browser – WWW prohlížeč, zobrazí se nám tento dokument v něm, jako by byl součástí WWW stránky.

Pokud nemáte tento program, tak si jej můžete stáhnout přímo z této WWW stránky nebo následovat odkaz na WWW stránky společnosti ADOBE.

Myslím si, že toto členění a uspořádání dokumentů, které se snaží přizpůsobit WWW stránkám se stejným či více méně podobným obsahem podporuje rychlost a přehlednost jak v ovládání tak při čtení.

3.6. Komu mají tyto stránky sloužit

Všeobecně je internet předurčen jako médium masového využití, tedy je v podstatě přístupný každému, kdo o něj projeví zájem.

V mém případě bych si dovolil tvrdit, že stránky zaměřené na polovodiče navštíví především studenti vysokých škol, kteří budou mít určitě blíže k tématice, než jiní návštěvníci. Budou hledat vhodnou alternativu k výuce. Prostě zde naleznou jednoduchou a stručnou formou podanou látku. A věřím, také dle svých zkušeností, že je to v dnešní době možná lepší forma „skript“.

3.7. Shrnutí

V této části bych si dovolil shrnout a porovnat již nabízené produkty.

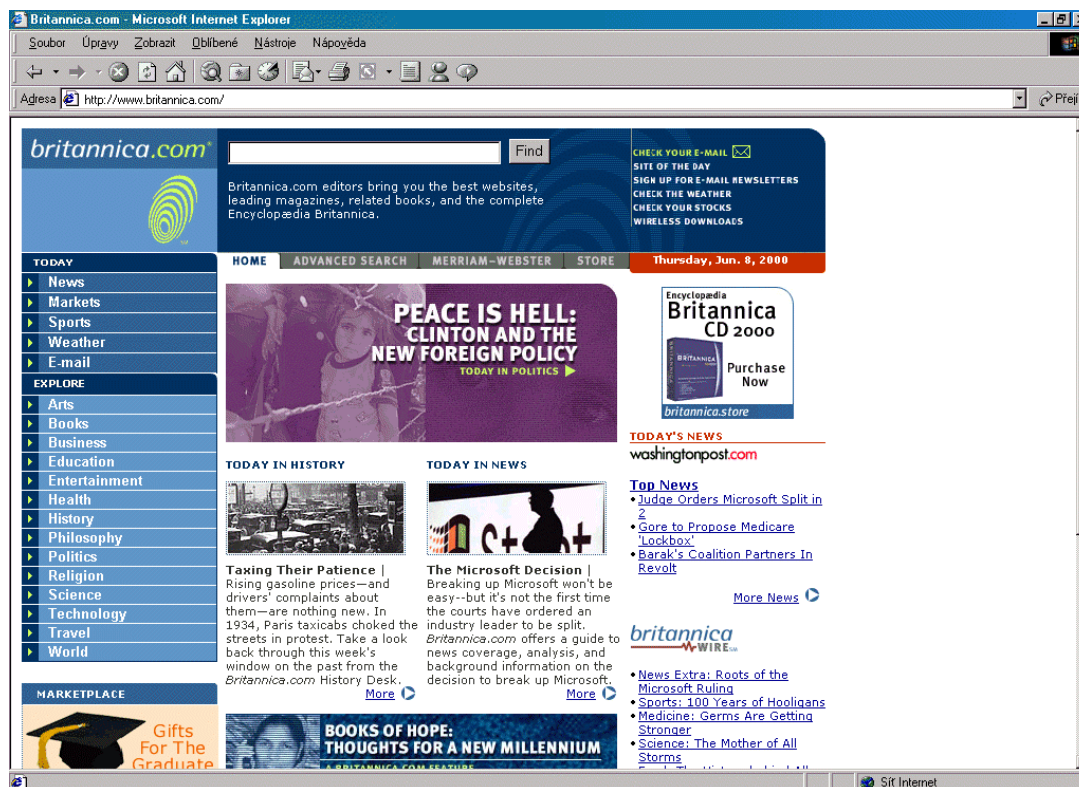
Začneme-li porovnáváním tištěných a elektronických dokumentů, tak lze jednoznačně říci, že na dlouhé večery si určitě pořídíte knížku či skripta, ale pokud by ty skripta mely být neustále aktuální, muselo by se vynaložit nemalých prostředků na přípravu dalších upravených vydání. Taky lze říci, že skripta zacházejí příliš ke kořenům věcí. Ne, není to závada, ale někdy stačí naznačit jen výsledek a pokud bude mít studující chuť se dozvědět více podrobností, zahledí se hlouběji. V tom má zase přednost elektronická publikace. Na povrchu vidím jen to co je pro mě v ten daný okamžik nejdůležitější a pokud chci více prostě se do něj „ponořím“.

Porovná-li WWW stránky s podobným zaměřením, trůfám si říci, že jsem dokázal obstát v nabídce přehledu teorie, tak i co po stránce kreativní. Pominu-li profesionálně vytvořené WWW stránky jako jsou třeba u encyklopedie BRITANNICA [9], tak můžu říci, že přehledností vítězím i nad jinou konkurencí.

A jak je to s ostatními stránkami s podobnou tematikou u nás? Popravdě řečeno, nenašel jsem doposud stránky, které by se zabývali nějakou podobnou tematikou. Brouzdáním po „českém“ s lze najít spousty odkazu na nějaké technická řešení, ale kreativně vyložený základ či teorie tu chybí.

V případě „zahraniční“ části internetu se dostaneme o kousek dále. Po usilovném pátrání se mi podařilo nalézt alespoň trošku odborných stránek. Jedno velké plus si ovšem zaslouží internetová publikace Encyklopedia Britannica [9]. Ta ale obsahuje jen jakýsi výtah z teorie, nejde rozhodně do podrobností a ani žádné vědecké výpočty tam rozhodně nenajdeme. Zato hezky v barvách umožňuje

nahlédnou pod vědeckou pokličku. A co je na tom nejkrásnější, že je tato publikace na Internetu a k tomu ještě volně dostupná.



Obr. 3-5 Encyklopedie Britannica na Internetu

Více o této problematice se dočtete na našich WWW stránkách, kde jsou uvedeny odkazy na mnou vypátrané stránky, které se zabývají polovodiči.

4. Závěr

Práce podává ucelené informace z oblasti polovodičů. Publikací na Internetu jako WWW stránek umožňuje zpřístupnit informace odborné veřejnosti a hlavně studentům škol.

Na WWW stránkách se bude i nadále pracovat, vzal jsem si za úkol, zpracovat veškeré takto vytvořené studijní materiály, které se týkají mého oboru studia, které doplní ostatní práce mých kolegů a sjednotit jejich úpravu pro snadnější orientaci. Pro zájemce z řad vyučujících by pak tyto složené stránky měly nabídnou možnost rychlejší přípravy na výuku s možností odkázání se na WWW.

V žádném případě by tyto stránky neměly nahrazovat aktivní výuku na školách, jako jsou přednášky, či dokonce brát tyto stránky, tuto práci, jako náhradu za vysokoškolská skripta. Jednoznačně lze říci, že tato práce má sloužit k „oživení“ výuky jako její doplněk.

Podstatnou výhodou publikování na Internetu je možnost tvoření jakýchsi strukturovaných celků, kdy jednotlivé celky jsou vzájemně propojené a to třeba tak, že v celém textu nám postačuje uvést pouze jeden vzorec, obrázek, který pak pomocí odkazů můžeme nabídnout k nahlédnutí v kterémkoliv okamžiku, kterékoliv straně textu, aniž by uživatel – student, vyučující, musel listovat celým textem a hledat shodně očíslovanou položku. Je to výhodné právě v okamžiku, kdy chceme např. zobrazit nebo ukázat, jak postupným odvozováním vznikl nějaký hodnotný výraz či výsledek.

Další přednost bychom mohli ukázat na vyhledávání nějakého textu. Tato možnost se nabízí už od vzniku počítačů s textově orientovanými aplikacemi. Hledáme-li třeba jedno slovo, tak při běžně psaném zpracování v knize, by nám to zabralo mnoho a mnoho času, tedy pokud zrovna ono slovo není uvedeno někde v rejstříku. Máme-li počítač, zabere nám to opravdu jen chvilku.

Jednou s předností publikování v elektronické podobě je také fakt, že již nebude třeba znehodnocovat papír, uchráníme naše lesy, pokud ale zase někoho nenapadne oním „uchráněným topivem“ topit.

Samozřejmě, že nesmíme opomenout další věc, že je sice dobré mít kvanta teorie pohromadě, ale pokud již tyto kvanta nebudou aktuální, což je v případě papírového vydání zvláště problematická věc, je potom nákladné zařizovat další výtisk – náklad. V případě elektronické podoby dokumentů, je mnohem jednodušší přidat pár řádek navíc, aniž by se muselo vynakládat nemalých prostředků. A tyto řádky opět mohou vznikat postupným doplňováním i několika osob a co víc, dokonce i kdekoliv na Zemi.

Samotné publikování WWW stránek na Internetu si bere za cíl, přiblížit zájemcům obsah studia na naší škole a tím pomoci při výběru oboru studia. Zájemce tak bude mít přehled o probírané látce, teda ne že by se ji začal učit než na školu nastoupí, ale takto si může uvědomit náročnost či požadavky na studium. Lépe se pak bude rozmýšlet o jeho specializaci.

Pokud dobře zpracované stránky na Internetu umístíme, dušiček, v podobě studentů, se dočkáme. Dobře zpracované stránky propagují, v jistém smyslu, školu, dělají ji reklamu, dávají vědět okolnímu světu jak si na tom daná škola stojí.

Naopak by se dalo říci, že škola z mizerně působícími stránkami spíše než přiláká, odradí. Ale ne vždy se dává na „první dojem“, tak i škola, která nemá WWW stránky vlastně může vychovávat v oboru nejlepší studenty, ale jak dlouho. Jak dlouho se bude šířit její jméno jen ústy? Nakonec dojde i na ně.

Je tady ještě jedna věc, která by stála za zmínění. Pokud chce autor o sobě nechat vědět, stejně tak i škola, musí si udělat reklamu, nebo napsat do nějaké odborné literatury. Na Internetu je to mnohem jednodušší. Tady během několika málo hodin, můžu dát o sobě vědět celému světu. K tomu nám slouží tzv. portály, nebo chcete-li „vyhledávače“, stránky, které kumulují odkazy na všemožné co na Internetu zveřejnit lze.

Podaří-li se zpracovat větší množství probírané látky do elektronické podoby i na jiná témata, tedy nejen fyziky polovodičů, může potom vzniknout soubor informací, které budou pokrývat veškerý vědní potenciál školy. To pak bude i dobrým základem pro výuku na takto „dokonalých školách.“

Co říci na konec? Internet může být dobrá věc jak pro školství, tak pro výchovu a i výuku mimo školu a domov. Takže ten Internet vlastně není jen o tom jak sestrojít bombu nebo jak někomu poslat virus, ono se „to“ vlastně bude moci využít i pro studium, že ano?

Doufám, že takto položený základ, pomůže budoucím studentům k pochopení vědní oblasti polovodičů, která je dnes, v době elektronické a elektrotechnické, jednou z hlavních oblastí.

5. Použitá literatura

- [1] Musil, V. – Brzobohatý, J. – Boušek, J.- Prchalová, I.: Elektronické součástky, VUT Brno, 1996; ISBN 80-214-0821-9; str. 35 – 47
- [2] Voves, J.: Fyzika polovodičových součástek, ČVUT, 1997; ISBN 80-01-01684-6; str. 8, 10, 16.
- [3] Vaniček, F.: Polovodičové struktury; ČVUT, 1990; ISBN 80-01-00310-8
- [4] Frank, H.: Fyzika a technika polovodičů; SNTL, 1990; ISBN 80-03-00401-2
- [5] Klímek, A. – Zíka, J.: Malá encyklopedie – Polovodičové součástky; SNTL ALFA, 1989
- [6] Bogr, J. – Musil, V.: Elektronika; VUT Brno, 1989
- [7] Eckertová, L.: Fyzikální elektronika pevných látek, Karolinum Praha, 1992
- [8] Sodomka, L.: Struktura a vlastnosti pevných látek, Praha SNTL, 1967
- [9] <http://www.britannica.com/> - **ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA**

6. Seznam obrázků, použité symboly

6.1. Seznam obrázků

Obr. 2-1 Vodíkový atom - první tři dovolené kvantové dráhy a jejich energie	8
Obr. 2-2 Izolovaný atom křemíku.....	9
Obr. 2-3 Ukázka diamantové mřížky u Si	10
Obr. 2-4 Vznik páru elektron díra.....	12
Obr. 2-5 Příměsový polovodič typu N.....	13
Obr. 2-6 Příměsový polovodič typu P.	15
Obr. 2-7 Teoretický energetický diagram prvků IV. skupiny v závislosti na mřížkové konstantě. Pásový model napravo vznikne řezem v místě příslušné mřížkové konstanty.	16
Obr. 2-8 Jednoduchý pásový model pevné látky.	17
Obr. 2-9 Pásový model: a) izolantu b) polovodiče c) monovalentního kovu d) bivalentního kovu.....	18
Obr. 2-10 Energetická závislost Fermi-Diracovy funkce	21
Obr. 2-11 Rozložení nosičů při poloze Fermiho hladiny: a) v horní polovině zakázaného pásu (p. typu N), b) uprostřed zakázaného pásu (vlastní p.), c) v dolní polovině zakázaného pásu (p. typu P).....	23
Obr. 2-12 Teplotní závislost intrinzické koncentrace nosičů n_i [cm^{-3}] pro GaAs, Si, Ge	30
Obr. 2-13 a) Poloha Fermiho hladiny v Si v závislosti na koncentraci příměsí. V označeném bodě je nakreslena b) závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě, teploty T_1 a T_2 jsou aktivační teploty. Poloha Fermiho hladiny v intrinzickém polovodiči je označena E_i . Se stoupající teplotou se také zužuje šířka zakázaného pásu se strmostí řádu 10^{-4} eV K^{-1}	32

Obr. 2-14	Vzájemná kompenzace akceptorů a donorů v polovodiči	33
Obr. 2-15	Závislost Fermiho hladiny na teplotě pro slabě kompenzovaný polovodič.	35
Obr. 2-16	Závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě pro silně kompenzovaný polovodič	37
Obr. 2-17	Závislost polohy Fermiho hladiny na teplotě pro nekompenzovaný polovodič.	38
Obr. 2-18	Závislost koncentrace elektronů Si na teplotě. $N_D=5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	39
Obr. 2-19	Pohyb nosičů náboje v polovodiči vlivem elektrického pole.....	40
Obr. 2-20	Závislost koncentrace nosičů na teplotě u nevlastního polovodiče typu N – pro $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$	43
Obr. 3-1	Ukázka práce v programu MS FP.....	47
Obr. 3-2	Ukázka práce v programu PSP	49
Obr. 3-3	Přenos dat FTP protokolem v programu FAR.....	51
Obr. 3-4	Schématická struktura WWW stránky	52
Obr. 3-5	Encyklopedie Britannica na Internetu	55

6.2. Použité symboly

E	je vazebná energie elektronu v atomu vodíku,
m_0	je hmotnost volného elektronu ($0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$),
q	je absolutní hodnota náboje elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$),
ϵ_0	je permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$),
h	je Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$), $\hbar = h/2\pi$
n	je hlavní kvantové číslo (identifikátor orbitu)
n	je počet elektronů

p	je počet děr
n_i	je intrinzická koncentrace nosičů na jednotku objemu; podle soustavy SI je to 1 m ³ , v praxi i v literatuře se však běžně používá 1 cm ³ .
E_D	energie donorového pásu
E_C	energie vodivostního pásu
E_A	energie akceptorového pásu
E_V	energie valenčního pásu
E_G, ΔE	energie zakázaného pásu
N, P	označení typu polovodiče
a₀	rovnovážná mřížková konstanta
g_C(E) a g_V(E)	jsou hustoty stavů v závislosti na energii ve vodivostním a valenčním pásu
m_n[*] a m_p[*]	jsou efektivní hmotnosti elektronu a díry.
f(E)	Fermi – Diracova funkce
E_F	je Fermiho energie (Fermiho hladina)
k	je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)
T, T₁, T₂	je teplota v Kelvinech
E_{strop}	strop vodivostního pásu
E_{dno}	dno valenčního pásu
N_C	je efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu
N_V	je efektivní hustota stavů ve valenčním pásu
n_i	intrinzická koncentrace
N⁺, P⁺	vysoce degenerovaný, dopovaný polovodič

N_A^+, N_D^+	koncentrace ionizovaných akceptorů, donorů
v	je střední hodnota rychlosti nosiče náboje
E	velikost intenzity elektrického pole ve směru žádaného působení.
μ	Pohyblivost
μ_H	Hallova pohyblivost
R_H	Hallova konstanta
ρ	konduktivita (měrná vodivost)
e	elementární náboj
S	je průřez (plochou kolmý na dráhu nosičů náboje (je stejný po celé dráze
E	intenzita elektrického pole ve směru pohybu nosičů náboje
n_d	koncentrace děr v jednotce objemu
μ_d	pohyblivost děr
n_e	koncentrace elektronů v jednotce objemu
μ_e	pohyblivost elektronů
J_E	proud vznikajícího vlivem elektrického pole
J_D	difúzní proud

7. Přílohy

I. Úvodní WWW stránka s obsahem

The screenshot shows the website header with the text 'BAKALÁŘSKÁ PRÁCE 2000 - VUT BRNO - ÚMEL'. Below the header is a banner with the title 'FYZIKA POLOVODIČŮ 2000' and a background image of a microscope. Underneath the banner is a section titled 'OBSAH STRÁNEK - KAPITOLY' with the subtitle 'ZADÁNÍ Bc. PRÁCE'. This section contains a 3x3 grid of chapter titles:

1. ZÁKLADNÍ PRAVIDLA KVANTOVÉ FYZIKY	2. POLOVODIČ	3. VLASTNÍ A NEVLASTNÍ POLOVODIČE
4. PÁSOVÉ DIAGRAMY	5. ELEKTRONY V PEVNÝCH LÁTKÁCH A JEJICH ROZDĚLENÍ	6. FERMIHO HLADINA
7. POHYBLIVOST	8. KONCENTRACE	9. TEPLOTNÍ ZÁVISLOST

Below the grid is a section titled 'SOUBORY KE STAŽENÍ' with the following information:

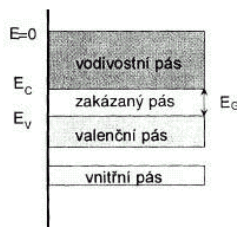
Kapitoly v PDF - jednotlivé kapitoly ve formátu *.pdf	kap. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Kapitoly v DOC - jednotlivé kapitoly ve formátu *.doc	kap. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Seznam použité literatury - seznam literatury :O)	seznam(zatím jen *.html/**.htm)
ADOBE Acrobat Reader 4.05 - program a čtení souboru *.pdf	Z lokálního disku / WEB Adobe

1. Hlavní lišta WWW stránek, obsahuje název, rok, fakultu a ústav,
2. na které se nachází v levé části tlačítko (odkaz) pro napsání pošty autorovi na adresu lukicz@volny.cz,
3. v pravé části jsou pak ještě dva odkazy, jeden na školu pod adresou www.fee.vutbr.cz
4. a druhý na ústav mikroelektroniky www.umel.fee.vutbr.cz
5. v části pod hlavní lištou je v sekci „OBSAH STRÁNEK - KAPITOLY“ seznam všech dostupných kapitol,
6. v sekci „SOUBORY KE STAŽENÍ“ jsou odkazy na dokumenty ve formátech *.pdf, *.doc. krom toho i odkaz na program pro prohlížení souborů *.pdf, pokud jej ještě nemáte nainstalovaný

II. Příklad WWW stránky

4/2 PÁSOVÉ DIAGRAMY

Pásové diagramy dovolených energií elektronů jsou důležitým modelem pro studium elektrických vlastností vlastností pevných látek. Hovoříme o tzv. **pásové teorii** nebo **pásovém modelu pevných látek**. Pásky dovolených hodnot energie elektronu označíme jako **dovolené pásky**, oblasti mezi těmito pásky jsou pásky zakázaných hodnot energie elektronu - **zakázané pásky**. Jednoduchý pásový model pevné látky je na obr. 1.5.



Obr. 1.5.: Jednoduchý pásový model pevné látky

Energetické pásky dělíme na tyto skupiny:

1. Vnitřní pásky:

Tyto pásky patří elektronům pevně vázaným k jádrům. Jsou poměrně úzké a pro přenos elektrického náboje nemají význam.

2. Valenční pás:

V tomto pásu jsou hladiny elektronů vytvářejících chemickou vazbu.

3. Vodivostní pás:

V tomto pásu jsou hladiny elektronů uvolněných z chemických vazeb.

Tyto elektrony se mohou pohybovat v meziatomovém prostoru a způsobovat vodivost látky. Je to nejvyšší dovolený energetický pás.

4. Zakázané pásky:

Oddělují od sebe pásky dovolených energií.

Poslední tři pásky - vodivostní, zakázaný a valenční - **svou polohou** a energetickou šířkou určují **základní vlastnost pevných látek** z hlediska vedení elektrického proudu (přenosu náboje). Běžně se dolní okraj vodivostního pásu označuje E_C (C = conductivity), E_V je horní kraj valenčního pásu (V = valence). Zakázaný pás má šířku E_G (nebo ΔE ; G = gap).

Elektrické vlastnosti látky charakterizuje zejména šířka zakázaného pásu E_G , která mimo jiné závisí na meziatomové vzdálenosti a_0 atomů v krystalu.

Na (nahore obr. 1.4.) vidíme, že Ge s mřížkovou konstantou 0,357 nm má menší E_G ($E_G = 0,66$ eV) než Si ($a_0 = 0,357$ nm, $E_G = 1,12$ eV) a mnohem menší než diamant C ($a_0 = 0,357$ nm, $E_G = 5,47$ eV). Hodnoty jsou uvedeny pro teplotu 300 K.

[<< ZPĚT | MENU | DALŠÍ >>]

1. Tato část zobrazuje náhled na HTML dokument tak, jak jej lze nalézt na WWW stránkách
2. horní část (bez titulku BC práce) obsahuje název kapitoly, její číslo
3. dole jsou pak jen odkazy pro posun v textu :

DALŠÍ >> pro .skok na další stránku, tedy v tomto případě na 4/3

MENU skok na hlavní menu stránek

<< ZPĚT krok na předchozí stránku, tedy v našem případě 4/1

Pokud chybí jeden z výše zmíněných odkazů, tak stránka nemá pokračování v daném směru.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma "WWW STRÁNKY - FYZIKA POLOVODIČŮ" jsem vypracoval samostatně s použitím doporučené odborné literatury, kterou jsem všechnu citoval v seznamu literatury a pod odborným vedením svého vedoucího práce.

V Brně dne 9.6.2000

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janě Trunkátové, CSc., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.