

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
Ústav elektrotechnologie

LABORATORNÍ CVIČENÍ Z PŘEDMĚTU
ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY A VÝROBNÍ PROCESY

Číslo úlohy: 6

Název úlohy: Počítačové vytváření pásových modelů polovodičových materiálů

Jméno a příjmení, ID: Tomáš Vavrinec, 240893	Atmosférický tlak: 102.6 hPa	Teplota okolí: 25.1°C	Relativní vlhkost: 37.2%
Měřeno dne: 14.10.2022	Odevzdáno dne:	Ročník, stud. skupina: 2	Kontrola:
Spolupracovali: Daniel Poisl			

Zadání

1. Nakreslete a porovnejte pásové modely křemíku, germania a arzenidu galia. Ve skupině polovodičů $A^{III}B^V$ vyhledejte polovodič s nejmenší a největší šířkou zakázaného pásu.
2. U vlastního polovodiče křemíku Si (germania Ge) vypočítejte polohu Fermiho hladiny v rozsahu teplot 0[K] až 600[K]. Teplotní závislost polohy Fermiho energetické hladiny vynesete do grafické závislosti. Vypočtenou křivku srovnajte s průběhem teplotní závislosti v programu Pásový model.exe
3. Sledujte vliv změny koncentrace donorů a akceptorů v příměsovém polovodiči Si na polohu Fermiho energetické hladiny při teplotě 300 K. Graficky zpracujte závislost polohy Fermiho energetické úrovně na koncentraci příměsí. Vypočtenou křivku srovnajte s průběhem teplotní závislosti v programu Pásový model.exe

Teoretický úvod

Uvnitř krystalu se elektrony mohou vyskytovat jen uvnitř energetických pásech (vodivostní a valenční). Může se stát, že se tyto pásy překrývají (vodiče), nebo že se mezi nimi vytvoří mezera tzv. zakázaný pás (izolanty a polovodiče). Rozdíl mezi polovodičem a vodičem je v šířce zakázaného pásu. Polovodiče mají šířku zakázaného pásu do 3[eV], (tato hranice není úplně fixní jde spíš o orientační hranici). Aby mohl být valenční elektron ve vodivostním páse, musí mít energii alespoň o hodnotě šířky zakázaného pásu navíc oproti výchozí poloze.

Polovodič může být vlastní a nevlastní, vlastní polovodič se skládá jen z atomů jednoho prvku, nevlastní polovodič pak obsahuje příměsi typu P (Pozitiv) nebo typu N (Negativ). Příměsi mají o elektron víc (N) nebo mén (P) a tak doplňují volné nosiče, buď volné elektrony nebo díry. Atomu, který doplní elektron, se říká donor a atomu, který akceptuje elektron (doplní díru), se říká akceptor.

U polovodičů také mluvíme o Fermiho energetické hladině což je energetická hladina, na které se nachází elektrony s pravděpodobností 50%. U vlastní polovodičů je Fermiho hladina uprostřed zakázaného pásu a u nevlastních polovodičů se vzdaluje od prostředka v závislosti na množství příměsí podle vztahu.

$$E_f = \frac{W_v + W_c}{2} + \frac{1}{2}kT \cdot \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad (1)$$

nebo

$$E_f = W_v + \frac{W_g}{2} + \frac{3}{4}kT \cdot \ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right) \quad (2)$$

Kde k je Boltzmannova konstanta, T je teplota, W_v je energie valenčního pásu, W_c je energie vodivostního pásu, W_g je hladina zakázaného pásu, m_p je hmotnost elektronů a m_n je hmotnost děr.

Efektivní hustota stavů ve valenčním páse

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Efektivní hustota stavů ve vodivostním páse

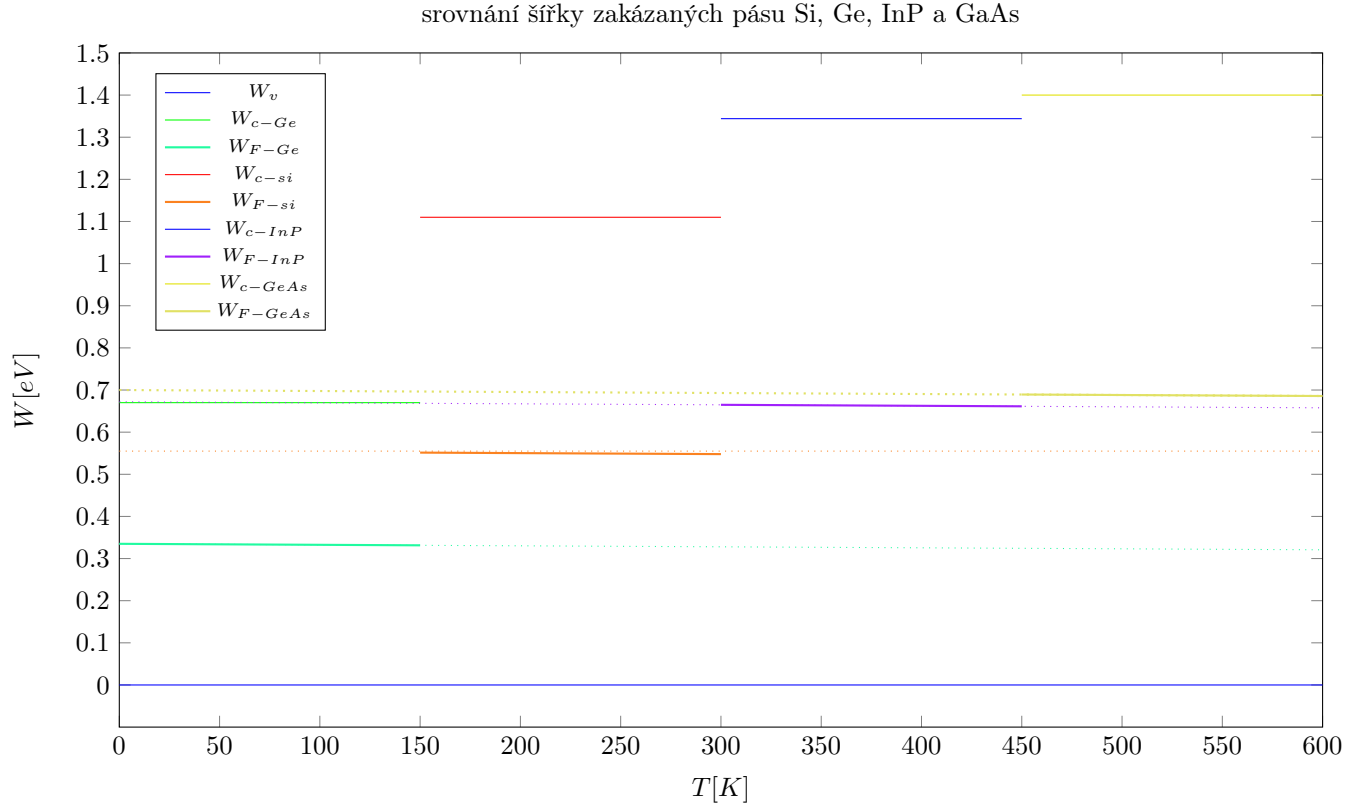
$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

Pro příměsové polovodiče se dá Fermiho hladina při dostatečné koncentraci určit podle vztahu:

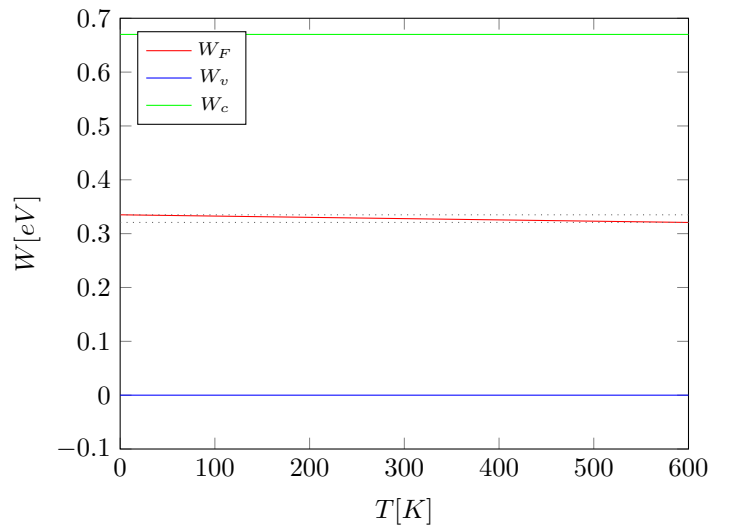
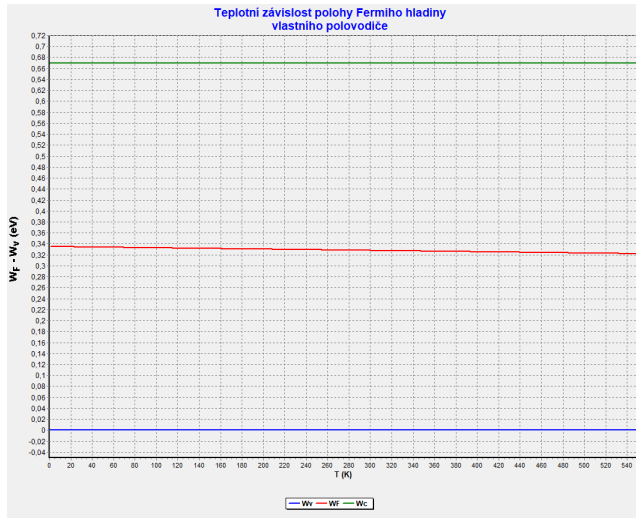
$$W_F = W_i + kT \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \quad W_F = W_i - kT \cdot \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (5)$$

Kde W_i je Fermiho hladina bez příměsí, n je koncentrace donorů, p je koncentrace akceptoru a n_i je koncentrace elektronů a děr ve vlastním polovodiči.

Podmínky měření

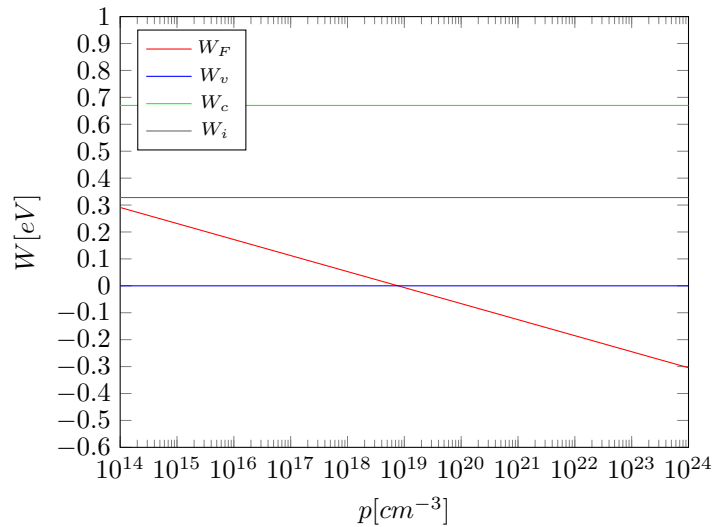
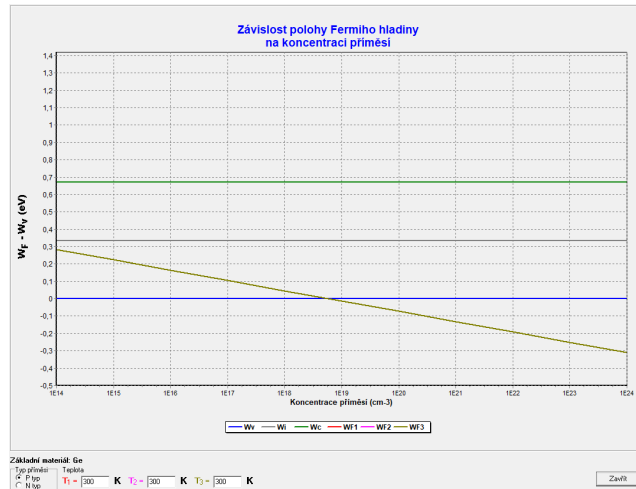


Nejtenší zakázaný pás ze skupiny $A^{III}B^V$ má Indium antimonide $InSb$, $W_g = 0.17$ [eV] a naopak nejširší má Nitrid boru BN , $W_g = 6.36$ (příklad polovodiče, který by podle šířky zakázaného pásu měl být izolant a přesto se řadí mezi polovodiče). Graf zároveň zobrazuje i závislost polohy Fermiho hladiny na Teplotě a je vidět, že se s měnící teplotou mění jen velmi málo.



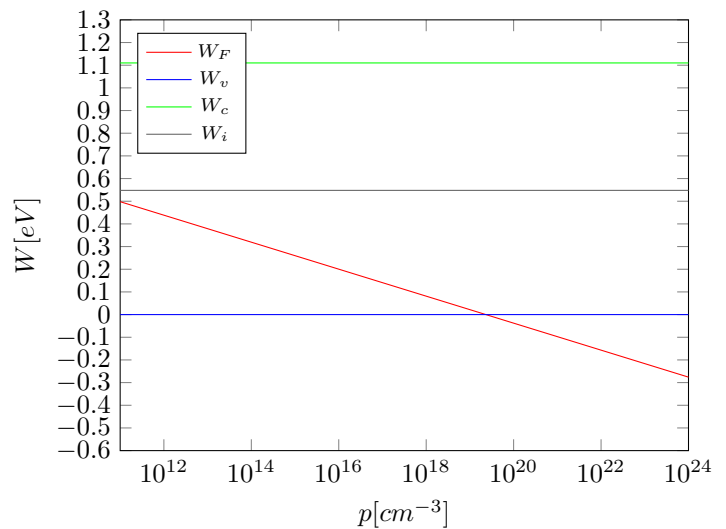
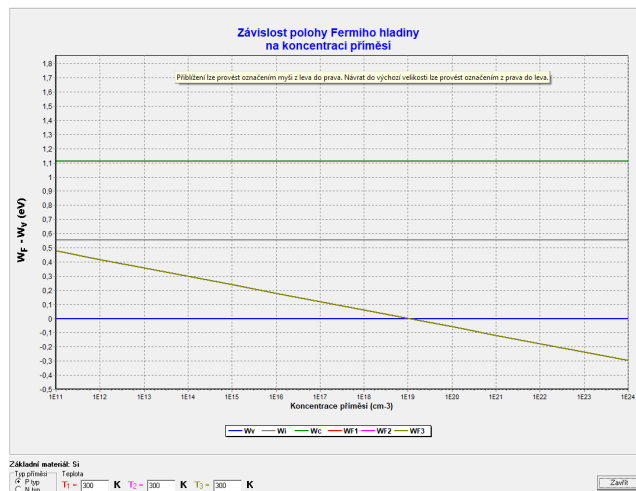
Závislost polohy Fermiho hladiny na množství příměsí pro Ge

$$N_i = 1.40 \cdot 10^{13} [cm^{-3}]; \quad W_F = 0.67 [eV]; \quad T = 300 [K]; \quad W_i = 0.32789 [eV]$$



Závislost polohy Fermiho hladiny na množství příměsí pro Si

$$N_i = 1.45 \cdot 10^{10} [cm^{-3}]; \quad W_F = 1.11 [eV]; \quad T = 300 [K]; \quad W_i = 0.54789 [eV]$$



Závěr

Teoretické vztahy velmi dobře odpovídají simulaci. Pro výpočet Fermiho hladiny u příměsového polovodiče však uvedený vztah platí jen pro velké koncentrace příměsí. Ze vztahu částečně i z grafů je vidět, že při dosazení koncentrace nižší než je hodnota n_i , by příměs ovlivňovala Fermiho hladinu opačným směrem a při dosazení nulové koncentrace by měla být dokonce nekonečně velká resp. malá.