

URČENIE KONCENTRÁCIE AKTÍVNYCH PRÍMESÍ V P-TYPE InSb METÓDOU NULOVÉHO TERMONAPÄTIA

PETER KORDOŠ, KAREL MĚŘÍNSKÝ, Bratislava

ÚVOD

Koncentrácia aktívnych prímiesí je základnou fyzikálnou veličinou charakterizujúcou vlastnosti polovodičového materiálu. S meraním koncentrácie sa stretávame pri určovaní vlastností homogénnych vzoriek i difúzných, resp. epitaxných vrstiev. Najčastejšie sa koncentrácia určuje z merania Hallovej konštanty, alebo špecifického odporu.

V tejto práci upozorňujeme na možnosť určenia koncentrácie aktívnych prímiesí v p -typoch polovodičov metódou nulového termonapätia. Metóda sa zakladá na meraní teploty, pri ktorej je termosila meraného materiálu nulová, tzv. teploty inverzie T_i , ktorá je funkciou koncentrácie prímiesí.

Závislosť koncentrácie aktívnych prímiesí od teploty inverzie možno získať teoreticky z podmienky pre nulovú termosilu, alebo experimentálne určeniu teploty inverzie takých vzoriek, ktorých koncentrácia je známa, napr. z merania Hallovej konštanty.

Metódu sme overili na vzorkách p -typu indiumantimoniidu, ktorých koncentrácie aktívnych prímiesí boli v rozsahu 10^{14} až 10^{18} cm^{-3} . Experimentálne získané hodnoty sme porovnali s hodnotami vypočítanými i s literárnymi údajmi. Prešetrili sme aj možnosť použiť túto metódu na meranie priebehu koncentrácie v difúznej vrstve $p\text{-InSb}$.

METÓDA MERANIA

Veľkosť termonapätia vznikajúceho v polovodiči je definovaná ako

$$u_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{\text{pol}} dT, \quad (1)$$

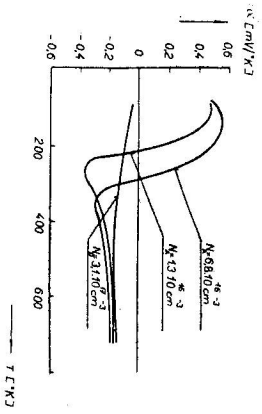
kde α_{pol} je absolútna termosila polovodičového materiálu. Pre termosilu nede-generovaného polovodiča platí [1]:

$$\alpha = \frac{k}{\sigma} \left[n\mu_n \left(\frac{5}{2} + r - \ln \frac{n}{n_0} - p\mu_p \left(\frac{5}{2} + r - \ln \frac{p}{p_0} \right) \right) \right], \quad (2)$$

$$p_0 = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} = C_1 T^{3/2}, \quad n_0 = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} = C_2 T^{3/2}, \quad (3)$$

Kde k — Boltzmannova konštanta, h — Planckova konštanta, σ — elektrická vodivosť, r — koeficient závislý od druhu rozptylu, n_0 , p_0 — koncentrácia volných elektrónov, resp. dier, μ_n , μ_p — pohyblivosť volných elektrónov, resp. dier, T — absolútna teplota.

Keďže pohyblivosť elektrónov je vždy väčšia ako pohyblivosť dier, z rovnice (2) vyplýva, že v polovodičoch n -typu sa s rastúcou teplotou znanienuko termomily nemeni, zatiaľ čo v polovodičoch typu p prechádza termosila nulou a mení svoje znamienko. Závislosť termosily od teploty pre n -typ a p -typ InSb [2] vidieť na obr. 1.



Obr. 1. Závislosť absolútnej termosily od teploty v InSb.

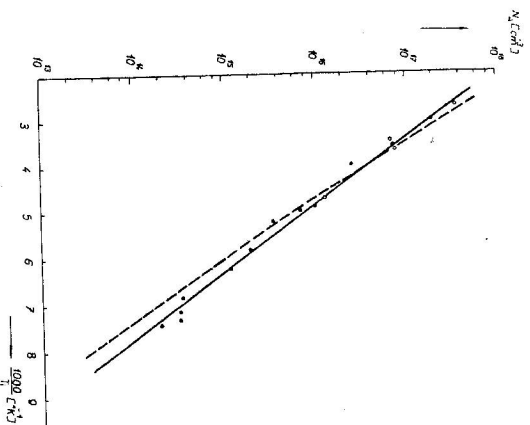
Pre prímesový polovodič p -typu platí, že koncentrácia volných dier sa približne rovná koncentrácii aktívnych prímiesí, t. j. $p \approx N_A$ a $n = \frac{n_i^2}{N_A}$. Z rovnice (2) potom získame pre podmienku $\alpha_{poi} = 0$ rovnicu

$$N_A^2 \left[\frac{5}{2} + r + \ln \left(\frac{C_1}{N_A} T^{3/2} \right) \right] = b n_i^2 \left[\frac{5}{2} + r + \ln \left(\frac{N_A C_2}{n_i^2} T^{3/2} \right) \right], \quad (4)$$

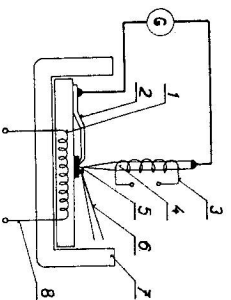
kde b — podiel pohyblivosti elektrónov a dier, n_i intrinzičná koncentrácia a C_1 , C_2 — hodnoty vyplývajúce z rovnice (3).

Z rovnice (4) je zrejmé, že koncentrácia aktívnych prímiesí polovodiča typu p je funkciou teploty inverzie T_i , t. j. teploty, pri ktorej je termosila nulová. Za určitých zjednodušených predpokladov možno z tejto rovnice vypočítať koncentrácie aktívnych prímiesí N_A , odpovedajúce rôznym teplotám inverzie T_i .

Výpočet sme urobili pre p -typ InSb v rozsahu teplôt 100 — 350 °K. Pri-



Obr. 3. Schématický náčrt pripravku na meranie teploty inverzie.



Obr. 2. Závislosť koncentrácie aktívnych prímiesí od teploty inverzie v p -type InSb. ● — namerané hodnoty, ○ — hodnoty podľa literárnych údajov, — — — — teoretická závislosť, — — — — experimentálna závislosť

beh získanej závislosti $N_A = f(1/T_i)$ znázorňuje prerušovaná čiara na obr. 2. Pri výpočte sme použili predpoklady, že C_1 a C_2 sú koeficienty nezávislé od teploty, t. j. že efektívne hmoty elektrónov a dier sa s teplotou nemeni, podiel pohyblivosti elektrónov a dier $b = 50$ a nezávisí od teploty ani od koncentrácie prímiesí a pre intrinzičnú koncentráciu v InSb platí podľa [3] zjednodušený vzťah

$$n_i = 6 \cdot 10^{14} T^{3/2} e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

kde ΔE je šírka zakázaného pásma, pre ktorú v InSb platí: $\Delta E = 0,27$ — 3. $10^{-4} T$ (eV).

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Závislosť koncentrácie aktívnych prímiesí od teploty inverzie sme získali aj experimentálne. Merali sme teplotu inverzie vzoriek, ktorých koncentrácia bola známa z merania Hallovej konštanty.

Na meranie spomenutej teploty sme použili pripravok znázornený na obr. 3. Meranú vzorku 1 sme prichytili k podložke 2 kovovým perom 3. Na povrchu vzorky sme uložili termočlánok Cu-konštantan 4, ktorým sme merali jej teplotu. Termopáätie sme merali medzi perom 3 a posuvným vyhrievaným hroto-

5. Teplotu hrotu sme regulovali elektrickým vyhrievaním 6 tak, aby sme dosiahli gradient teploty medzi perom 3 a hrotom 5. Potom podľa vzťahu (1) vznikajúce termonapätie môže byť nulové len vtedy, keď je termosita vzorky nulová. Podložku s polovodičovou vzorkou sme uložili v polystyrénovej nádobe 7, do ktorej sme nalievali tekutý dusík. Pomocou elektrického vyhrievania 8 sme mohli plynule meniť teplotu vzorky. Absolútnu hodnotu termonapätia sme merali impulzmi v priebehu otepľovania vzorky krátkodobým priložením hrotu 5. V okamihu nulového termonapätia sme určili termočíslikom 4 teplotu vzorky, a tak sme zistili teplotu inverzie T_i .

Meranie sme prevádzkali na monokryštálikom p -type InSb pripravenom v Elektrotechnickom ústave SAV metódou Czochralského, alebo horizontálnou metódou. Použili sme aj vzorky p -type InSb pripravené metódou termospracovania [4] z čistého n -typu [5]. Koncentrácie použitých vzoriek, určené z merania Hallovej konštanty pri 77 °K, boli v rozsahu 10^{14} až 10^{18} cm⁻³. Opísaným spôsobom sme zmerali ich teplotu inverzie, a tak sme získali priebeh $N_A = f(1/T_i)$, ktorý znázorňuje spojité čiara na obr. 2.

Na doplnenie sme porovnali nami získané hodnoty s hodnotami určenými z prác, [2], [6], [7]. V uvedených prácach sú znázornené závislosti termosily od teploty pre p -typ InSb, z ktorých sme určili teplotu inverzie a priradili sme ju koncentracii aktívnych prímiesí. Hodnoty získané týmto spôsobom znázorňuje obr. 2.

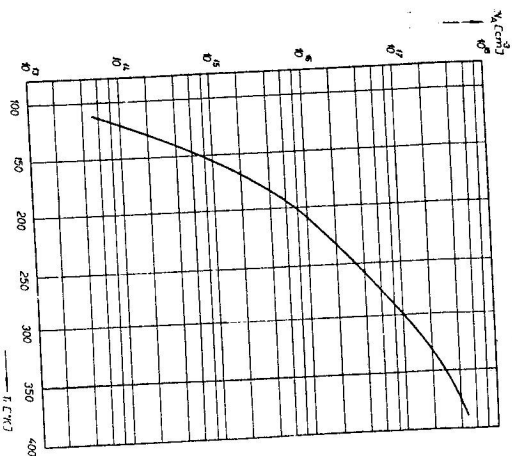
DISKUSIA

Z porovnaní experimentálne a výpočtom získaných závislostí koncentrácie aktívnych prímiesí od teploty inverzie vidieť, že medzi nimi existuje pomerne dobrá zhoda. Kvôli presnejšiemu vyjadreniu výpočtanej závislosti by bolo potrebné poznať závislosť efektívnych hmôt elektrónov a dier od teploty, zmenu podielu pohyblivosti elektrónov a dier s teplotou a koncentraciou, ako aj druh rozptylu prevládajúci v určitom rozsahu teplot. Pre praktické určenie koncentrácie aktívnych prímiesí v p -type InSb znázornili sme priebeh $N_A = f(T_i)$ na obr. 4, ktorý odpovedá experimentálnemu priebehu na obr. 2. Zmeraniu teploty inverzie možno veľmi jednoducho z neho určiť koncentráciu aktívnych prímiesí. Z obr. 4 však vidieť, že pri určovaní koncentrácie aktívnych prímiesí menšej než 10^{15} cm⁻³ rastie požiadavka na presnosť merania teploty inverzie.

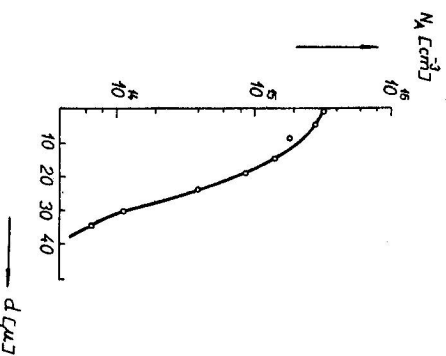
Najdôležitejšou výhodou opísanej metódy, je, že koncentrácia sa určuje na vzorkách ľubovoľnej geometrie. Minimálne rozmery vzorky (približne 1×1 mm) sú dané schopnosťou vytvorenia meracieho prípravku čo najmenších

rozmerov. Meracia metóda je pritom veľmi jednoduchá, nevyžaduje zložité meracie zariadenia, jej hlavnou požiadavkou je len správne merat' teplotu vzorky. Keďže nepotrebuje poznat' absolútnu hodnotu termonapätia, ale ide tu o metódu nulovú, zvyšuje sa tým presnosť metódy. Ďalšou výhodou opísanej metódy je, že môžeme ňou určovať homogénnosť používaných vzoriek, lebo meranie je prakticky bodové. Pri vytváraní zliatinových p - n -priechodov možno touto metódou určovať koncentráciu vzniknutej p -vrstvy [8]. Podobne sa dá určovať priebeh koncentrácie aktívnych p - n -priechodoch v InSb nej vrstve typu p . Toto sme si overili na difúzných p - n -priechodoch v InSb pripravovaných termospracovaním [9]. Postupným odleptávaním difúznej vrstvy a meraním teploty inverzie na povrchu sme určili priebeh koncentrácie aktívnych prímiesí v difúznej vrstve v závislosti od jej hrúbky. Takto získaný priebeh znázorňuje obr. 5. Nehomogénne vzorky je potrebné merať v nestacionárnom stave a na jndikáciu znamienka termonapätia treba použiť galvanometer s malou časovou konštantou.

Vo všeobecnosti by bolo možné použiť túto metódu aj pri iných polovodičových materiáloch typu p , napr. InAs, Ge, Si, GaAs. S rastúcou šírkou zakázaného pásma polovodičového materiálu sa však posúva oblasť teplot inverzie k vyšším hodnotám. Teplota inverzie by bolo potrebné merať v ochrannej



Obr. 4. Závislosť koncentrácie aktívnych prímiesí od teploty inverzie v p -type InSb.



Obr. 5. Priebeh koncentrácie aktívnych prímiesí v difúznej vrstve p -typu InSb, pripravenej metódou termospracovania.

atmosfére a pri vyšších teplotách by sa mohol prejavíť vplyv ohnevu (tzv. termospracovania) na elektrické parametre materiálu.

ZÁVER

Opísali sme metódu určenia koncentrácie aktívnych prímesí v p -type indiumantimonidu metódou nulového termonapätia. Závislosť koncentrácie aktívnych prímesí od teploty inverzie sme získali jednak výpočtom z podmienky nulovej termosily, jednak experimentálne zmeraním teploty inverzie vzoriek, ktorých koncentrácia bola určená z Hallovej konštanty. Uvedenou metódou sme zmerali aj priebeh koncentrácie aktívnych prímesí v difúznej vrstve p -InSb.*

LITERATÚRA

- [1] Madelung O., *Physics of III-V Compounds*, New York 1964, 192.
- [2] Tane J., Matyáš M., *Čs. čas. fyz.* 5 (1955), 297.
- [3] Hrostowski H. J., a ďalší, *Phys. Rev.* 100 (1955), 1672.
- [4] Mšijnský K., Kordoš P., *p-n-priechoďy v InSb*, zpráva EÚ-SAV 1965.
- [5] Benč V., Morvie M., *Eltechn. čas.* 17 (1966), 458.
- [6] Ginter J., Szymanska W., *Phys. Stat. Solidi* 3 (1963), 1398.
- [7] Frederikse H. P., Mielczarek E. V., *Phys. Rev.* 99 (1955), 1889.
- [8] Бонков А. С, и др., *Защотр. Мат.* 10 (1965), 1230.
- [9] Kordoš P., *Eltechn. čas.* 17 (1966), 275.

Došlo 7. 12. 1966

*Elektrotechnický ústav SAV,
Bratislava*

* Je našou povinnosťou podakovať sa V. Benčovi a M. Morvicovi za prípravu p -typu InSb.