

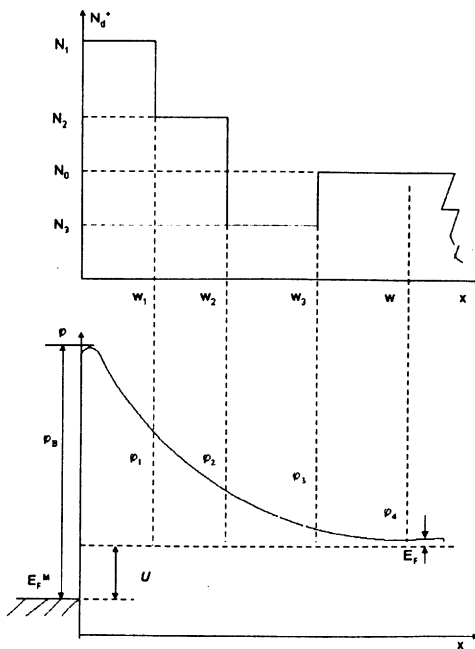
Nehomogeniškų Šotkio diodų voltamperinių charakteristikų skaitmeninis modeliavimas

Albertas PINCEVIČIUS, Rimantas-Jonas RAKAUSKAS (KA)

el. paštas: *pincev@takas.lt*, *rimantas.rakauskas@tmk.lka.lt*

1. Uždavinio formulavimas

Augant puslaidininkiniam kristalui, atsitiktinai patekę ar specialiai įterpti kitos rūšies atomai, sukuria puslaidininkio draudžiamoje juostoje donorinius arba akceptorinius priemaišinius lygmenis, kurie keičia jo laidumą. Formuojant ant puslaidininkio metalo kontaktą, t.y., gaminant Šotkio diodą, atliekama daug technologinių operacijų. Jų metu susidaro sudėtingas pereinamasis sluoksnis su skirtingomis priemaišų koncentracijomis, o dėl puslaidininkio ir metalo elektrono išlaisvinimo darbų skirtumo susiformuoja potencinis barjeras (1 pav.).



1 pav. Potencinis barjeras tarp metalo ir puslaidininkio esant skirtingai legiruotoms priemaišomis puslaidininkio srityse. N_1, N_2, N_3, N_0 – donorų koncentracijos, E_F^M – Fermi lygis metalo, E_F – Fermi lygis puslaidininkyje, φ_B – barjeras tarp metalo ir puslaidininkio, U – išorinė įtampa.

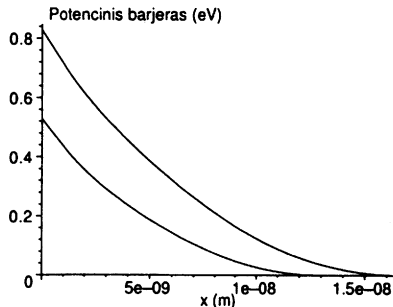
Elektrinio potencialo pasiskirstymas puslaidininkiniame kristale apsprendžia prietaiso voltamperinę charakteristiką (srovės priklausomybę nuo prijungtos įtamos) tiesiogine ir užtveriamąja kryptimi, jo elektrinį talpumą, kuris apriboja prietaiso charakteristikas esant aukštiems dažniams. Jei kiekviename skerspiūvyje puslaidininkio parametrai nesikeičia, potencialo kitimą tūryje aprašo vienmatė Puasono lygtis:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e}{2\epsilon\epsilon_0} \left(p - n - \sum_{i=1}^n m_i \right), \quad (1)$$

čia n , m_i – nepusiausvyrinių elektronų koncentracija laidumo zonoje ir priemaišiniuose lygmenyse, p – skilusių koncentracija valentinėje zonoje, ϵ_0 , ϵ – vakumo ir medžiagos dielektrinės konstantos, E – elektrinio lauko stiprumas. Darbuose [1, 2] parodyta, kad atvejais, kai aktyviųjų donorų koncentracijos pasiskirstymas tūryje atitinka stačiakampius laiptus (1 pav.), kuri praktikoje galima realizuoti molekulinės epitaksijos metodu, potencialo eiga užrašoma taip:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} \left[(N_1 - N_2)(w_1 - x)^2 + (N_2 - N_3)(w_2 - x)^2 \right. \\ &\quad \left. + (N_3 - N_0)(w_3 - x)^2 + N_0(w - x)^2 \right], \quad \text{kai } 0 \leq x \leq w_1; \\ \varphi_2(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} \left[(N_2 - N_3)(w_2 - x)^2 + (N_3 - N_0)(w_3 - x)^2 + N_0(w - x)^2 \right], \quad (2) \\ &\quad \text{kai } w_1 \leq x \leq w_2; \\ \varphi_3(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} \left[(N_3 - N_0)(w_3 - x)^2 + N_0(w - x)^2 \right], \quad \text{kai } w_2 \leq x \leq w_3; \\ \varphi_4(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} N_0(w - x)^2, \quad \text{kai } w_3 \leq x. \end{aligned}$$

Tada, pereinant nuo vieno intervalo prie kito, yra sulyginamos potencialų ir jų išvestinių reikšmės. Formulės kokybiškai nekinta, jei intervalų skaičius didėja ar mažėja, gaunama analizinė potencialo eigos išraiška. Elektrinio potencialo pasiskirstymo tūryje pavyzdys parodytas 2 pav.



2 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas tūryje $\varphi_B = 0,94 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$, viršutinė kreivė – $U = 0,1 \text{ V}$, apatinė – $U = 0,4 \text{ V}$.

Skaičiavimuose naudotos tokios parenkamų parametrų reikšmės:

$$\begin{aligned} N_1 &= 3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}, & N_2 &= 6 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}, \\ N_3 &= 5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}, & N_0 &= 3 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}, \\ w_1 &= 5 \cdot 10^{-9} \text{ m}, & w_2 &= 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}, & w_3 &= 8 \cdot 10^{-8} \text{ m}. \end{aligned}$$

Sprendinys (2) buvo atspėtas, surastos laipsninės eilutės gerai aproksimuojančios sprendinį plačiame intervale. Priešingu atveju būtų integruojama intervalais truki funkcija ir gaunamas sudėtingesnis rezultatas. Srovė, tekanti per prietaisą, užrašoma formule:

$$I = \frac{en_0v_tS}{4kT} \int_0^\infty D(E_x)f(E_x)dE_x, \quad (3)$$

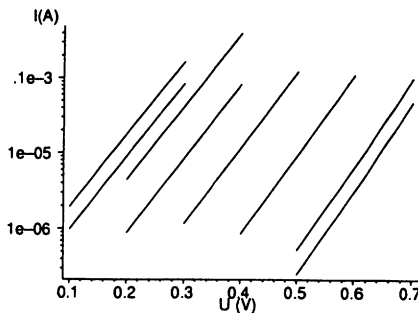
čia v_t – elektronų šiluminis greitis, S – prietaiso skerspjūvio plotas, k – Bolcmano konstanta, T – temperatūra pagal Kelvino skalę, $f(E_x)$ – Fermio pasiskirstymo funkcija, $D(E_x)$ – elektrono tuneliavimo per potencialinį barjerą tikimybė, kuri VKB artinio atveju užrašoma formule:

$$D(E_x) = \exp\left\{-2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} |E_x - \varphi(x)|} dx\right\}, \quad (4)$$

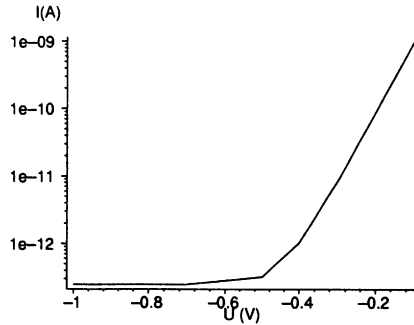
\hbar – Planko konstanta, m^* – elektrono efektinė masė, t.y., jo masė tinkanti aprašant judėjimą puslaidininkio laidumo zonoje, E_x – elektrono energija taške x .

Dydžiai formulėse (3) ir (4) vieni labai dideli, kiti labai maži (skiriasi iki 30 eilių), todėl integralų (4) ir (3) paskaičiavimas yra pakankamai specifinis. Paprastai rezultatai su eksperimentu derinami plačiame temperatūrų intervale. Voltamperinių charakteristikų paskaičiavimo pavyzdys pateiktas 3 pav.

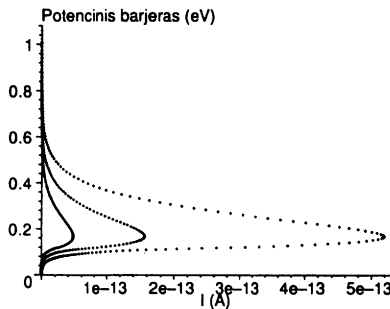
Galima surasti prietaiso voltamperinę charakteristiką (VACH) užtveriamąja kryptimi (4 pav.). Tirti elektronų tuneliavimą per potencialinį barjerą. Tunelinės srovės dedamosios parodytos 5 pav. Toks tyrimas labai reikalingas projektuojant aukštadažnius prietaisus.



3 pav. Šotkio diodo voltamperinės charakteristikos $I = I(U)$ plačiame temperatūrų intervale (iš kairės): 1 – 350 K, 2 – 325 K, 3 – 300 K, 4 – 250 K, 5 – 200 K, 6 – 150 K, 7 – 100 K, 8 – 77 K.



4 pav. Šotkio diodo voltamperinė charakteristika atbuline kryptimi. Barjero aukštis $\varphi_B = 0,94 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$.



5 pav. Tunelinės srovės dedamosios (voltamperinė charakteristika atbuline kryptimi kaip ir 4 pav.). Kreivės (iš kairės) atitinkamai: $U = -0,05 \text{ V}$, $U = -0,1 \text{ V}$, $U = -0,15 \text{ V}$. $T = 300 \text{ K}$, $\varphi_B = 0,94 \text{ eV}$.

2. Rezultatų aptarimas

Darbe pateikiama metodika, leidžianti, pasinaudojant skaitmeninio modeliavimo rezultatais, įvertinti Šotkio diodo ir jo sąlyčio srities parametrus: aktyviųjų priemaišų pasiskirstymą sąlyčio srityje, šių priemaišų pasiskirstymą sąlyčio plokštumoje, patikslinti diodo barjero aukštį, tirti tuneliavimo per barjerą mechanizmus ir t.t. Šie uždaviniai aktualūs projektuojant ir tobulinant puslaidininkinius prietaisus ir padeda sumažinti brangiai kainuojančių eksperimentų skaičių [1, 2, 3, 4]. Galima spręsti kitą uždavinį – projektuoti prietaisus su norimomis charakteristikomis. Molekulinės epitaksijos metodu galima keisti priemaišinių atomų koncentracija labai siauruose sluoksniuose ir gauti norimų prietaisų parametrus.

Literatūra

- [1] A. Pincevičius, L. Papirytė, T. Pėstininkas, J. Matukas, Priemaišų pasiskirstymo kontakto srityje įtaka galio arsenido Šotkio diodų voltamperinėms charakteristikoms, *Lietuvos Fizikos Rinkinys*, T. XXVIII, 6, 737–743 (1988) (rusų k.).

- [2] J. Matukas, V. Palenskis, A. Pincevičius, S. Smetona, The influence of low energy radiation in gallium arsenid surface on the current-voltage, capacitance-voltage and noise characteristics of Schottky-barrier diodes. *10-th International Conference "Noise in Physical Systems"*, abstract, Budapest, 135–137 (1989).
- [3] J. Osvald, Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, **85**(3), 1935–1942 (1999).
- [4] T.W. Crowe, J.L. Hesler, R.M. Weikle, S.H. Jones, GaAs devices and circuits for terahertz applications, *Infrared Physics & Technology*, **40**, 175–189 (1999).

Numerical simulation of the current-voltage characteristics of the inhomogeneous Schottky diodes

A. Pincevičius, R.-J. Rakauskas

In this paper we offer methods for estimation parameters of diodes of the Schottky by comparing outcomes of calculations and experiment. Definite some parameters of contact area: allocation of a active impurity in this area, to define more precisely a potential barrier in the area, to study tunnel mechanisms of electrons through this potential barrier. Such tasks are important from the practical point of view at improvement of performances of devices. One more problem the procedure helps to decide-to design devices with the established volt-ampere characteristic. In this case we can offer the corresponding allocation of an impurity in contact area, to select a technology for engineering of contact of the Schottky.