

Termodynamika półprzewodnikowego złącza p - n w stanie spolaryzowanym



A thermodynamic description of the potential distribution in a polarized p - n junction of semiconductors, depending on the pole of the applied voltage, was presented. In the case of reverse bias of the p - n junction, the height of the potential barrier at the junction increases in the junction region and the depletion layer expands, while the polarization of the p - n junction in the conduction direction lowers the height of the potential barrier at the junction and narrows the depletion layer. The changes in the width of the depletion layer on the donor and acceptor sides were also detd.

Keywords: thermodynamic equilibrium, electric charge carrier, space electric charge, donor, acceptor, energy bands

Polaryzacja półprzewodnikowego złącza p - n może przebiegać w dwóch kierunkach, czyli w kierunku zaporowym lub w kierunku przewodnictwa. Polaryzacja w kierunku zaporowym następuje wówczas, gdy źródło napięcia zewnętrznego podłączone jest ujemnym biegunem do półprzewodnika typu p , a dodatnim biegunem do półprzewodnika typu n , co przedstawiono na rys. 1. Przyjęto¹⁻³, że natężenie oraz napięcie prądu nośników ładunku elektrycznego płynącego z półprzewodnika p do półprzewodnika n jest dodatnie. Zatem zgodnie z ilustracją polaryzacji złącza p - n w kierunku zaporowym różnica między prądem dyfuzji I_d nośników ładunku elektrycznego a prądem generacji

Rozkład potencjału w spolaryzowanym złączu p - n uzależniony jest od biegunu napięcia przyłożonego do półprzewodników typu p oraz typu n . Przedstawiono termodynamikę dla dwóch możliwych przypadków. Pierwszy, gdy źródło napięcia zewnętrznego podłączone jest ujemnym biegunem do półprzewodnika typu p , a dodatnim do półprzewodnika typu n . Polaryzacja złącza p - n w tym kierunku nazwana jest polaryzacją zaporową dla przepływu prądu. Pokazano, że w przypadku polaryzacji zaporowej złącza p - n , w obszarze złącza wzrasta wysokość bariery potencjału na złączu oraz rozszerza się warstwa zubożona. W drugim przypadku źródło napięcia zewnętrznego podłączone jest biegunem dodatnim do półprzewodnika typu p , zaś ujemnym do półprzewodnika typ n . Polaryzacja złącza w tym kierunku nazwana jest polaryzacją złącza w kierunku przewodzenia. Pokazano, że polaryzacja złącza p - n w kierunku przewodzenia obniża wysokość bariery potencjału na złączu oraz zwęża warstwę zubożoną. Określone zostały również zmiany szerokości warstwy zubożonej od strony donorowej i akceptorowej.

Słowa kluczowe: równowaga termodynamiczna, nośnik ładunku elektrycznego, przestrzenny ładunek elektryczny, donor, akceptor, pasma energetyczne

termicznej I_0 nośników ładunku elektrycznego określa ujemną wartość prądu zaporowego I_{zap} nośników ładunków elektrycznych i stąd wynika ujemna wartość napięcia w kierunku zaporowym. Napięcie źródła zewnętrznego V jest równe różnicy potencjałów (1):

$$V = \varphi_- - \varphi_+ < 0 \quad (1)$$

i jest ujemne, ponieważ $\varphi_- < 0$ oraz $\varphi_+ > 0$.

W chwili przyłożenia napięcia źródła zewnętrznego V w kierunku zaporowym⁴⁻⁶ dochodzi do zmiany niespolaryzowanych potencjałów φ_p^0 oraz φ_n^0 w obszarach p - n (2) i (3):

$$\varphi_p' = \varphi_p^0 + \varphi_- < \varphi_p^0 \quad (2)$$

$$\varphi_n' = \varphi_n^0 + \varphi_+ > \varphi_n^0 \quad (3)$$

Napięcie w złączu spolaryzowanym zmienia się zgodnie z zależnością (4):

$$V' = \varphi_n' - \varphi_p' = \varphi_n^0 - \varphi_p^0 - (\varphi_- - \varphi_+) = V_0 + V \quad (4)$$

w której $V < 0$.

Z powyższego związku wynika, że napięcie V' w złączu spolaryzowanym jest źródłem napięcia zewnętrznego V i jest większe niż napięcie wbudowane V_0 (5):

$$V' > V_0 \quad (5)$$



Dr hab. inż. Zbigniew WRZESIŃSKI (ORCID) 0000-0003-1560-2971) w roku 1971 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej. W 1978 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2013 r. stopień doktora habilitowanego w zakresie mechaniki na tym samym wydziale, gdzie obecnie jest nauczycielem akademickim. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

*** Adres do korespondencji:**

Institut Mechaniki i Poligrafii, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, tel.: (22) 234-84-65, e-mail: zbigniew.wrzesinski@pw.edu.pl

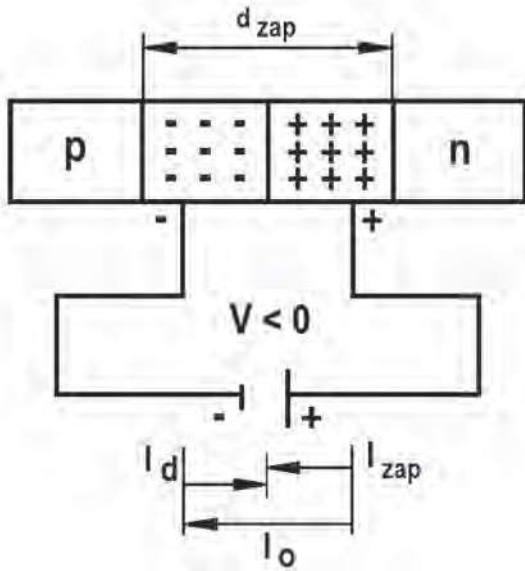


Fig. 1. Reverse bias of p-n junction

Rys. 1. Polaryzacja złącza p-n w kierunku zaporowym

Na rys. 2 przedstawiono spolaryzowanie złącza p-n w kierunku zaporowym. Po przyłożeniu napięcia w kierunku zaporowym wzrasta wysokość bariery potencjału na złączu i rozszerza się warstwa zaporowa.

Polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia⁷⁻⁹⁾ ma miejsce, gdy źródło napięcia zewnętrznego V podłączone jest dodatnim biegunem do półprzewodnika p, a ujemnym biegunem do półprzewodnika typu n. Napięcie źródła zewnętrznego V jest wówczas dodatnie i równe różnicy potencjałów (6):

$$V = \varphi_+ - \varphi_- > 0 \quad (6)$$

W chwili przyłożenia napięcia źródła zewnętrznego V w kierunku przewodzenia dochodzi do zmiany niespolaryzowanych potencjałów φ_p^0 oraz φ_n^0 w obszarach złącza p-n (7) i (8):

$$\varphi_p' = \varphi_p^0 + \varphi_+ > \varphi_p^0, \quad (7)$$

$$\varphi_n' = \varphi_n^0 + \varphi_- < \varphi_n^0 \quad (8)$$

Na rys. 3 przedstawiono polaryzację złącza p-n w kierunku przewodzenia.

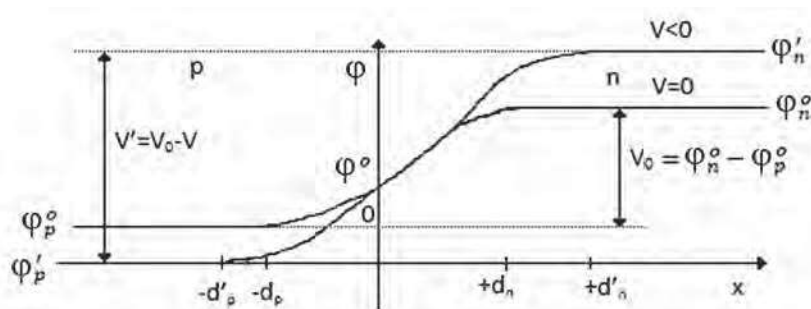


Fig. 2. Potential profile in the reverse biased p-n junction region

Rys. 2. Profil potencjału w obszarze złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym

Zmiana potencjałów w obszarach złącza p-n prowadzi do zmiany napięcia na złączu (9):

$$V' = \varphi_n' - \varphi_p' = \varphi_n^0 - \varphi_p^0 + \varphi_- - \varphi_+ = V_0 + (-V) = V_0 - V \quad (9)$$

Przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia napięcie wypadkowe $V' < V_0$.

Po przyłożeniu napięcia w kierunku przewodzenia zachodzą następujące zmiany zilustrowane na rys. 4: (i) obniża się wysokość bariery potencjału na złączu i (ii) zwęża się warstwa zaporowa.

Zmianę szerokości warstwy zaporowej¹⁰⁾ można wyznaczyć w sposób ilościowy. Symbolami d_p' oraz d_n' oznaczono szerokości warstwy zaporowej w obszarach odpowiednio p i n po przyłożeniu zewnętrznego napięcia V . W warunkach brzegowych dla równania Poissona uwzględniono zmienione wartości potencjałów φ_p' oraz φ_n' , otrzymując trzy związki (10)–(12):

$$\varphi(x) = \frac{eN_A}{2\epsilon_0\epsilon_s}(x + d_p')^2 + \varphi_p' \quad \text{dla} \quad d_p' \leq x \leq 0 \quad (10)$$

$$\varphi(x) = -\frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon_s}(x - d_n')^2 + \varphi_n' \quad \text{dla} \quad 0 \leq x \leq d_n' \quad (11)$$

$$\frac{eN_A}{2\epsilon_0\epsilon_s}d_p'^2 + \varphi_p' = -\frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon_s}d_n'^2 + \varphi_n' \quad (12)$$

w których e , C , oznacza elementarny ładunek elektryczny elektronu, zaś N_A , $1/m^3$, i N_D , $1/m^3$, odpowiednio objętościowe gęstości zasobu akceptorów i donorów. Związek (12) wynika z faktu, że dla $x = 0$ równania (10) i (11) muszą być równe sobie.

Warunek neutralności ładunkowej warstwy zubożonej ma postać (13):

$$N_A d_p' = N_D d_n' \quad (13)$$

W wyniku tego granica warstwy zubożonej od strony donorowej jest równa (14):

$$d_n' = \frac{N_A}{N_D} d_p' \quad (14)$$

Biorąc pod uwagę związki (12) i (14), otrzymano (15):

$$d_p' = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{eN_A} \frac{N_D}{N_A + N_D} (\varphi_n' - \varphi_p') \right]^{1/2} \quad (15)$$

Uwzględniając w zależności (15) związek określający różnicę potencjałów na złączu spolaryzowanym (16):

$$\varphi_n' - \varphi_p' = V' = V_0 - V \quad (16)$$

określono granicę warstwy zubożonej od strony akceptorowej za pomocą równania (17):

$$d_p' = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_s N_D}{eN_A(N_A + N_D)} (V_0 - V) \right]^{1/2} \quad (17)$$

Zmiany szerokości warstwy zubożonej określone są zależnościami (14) i (17). Określają one

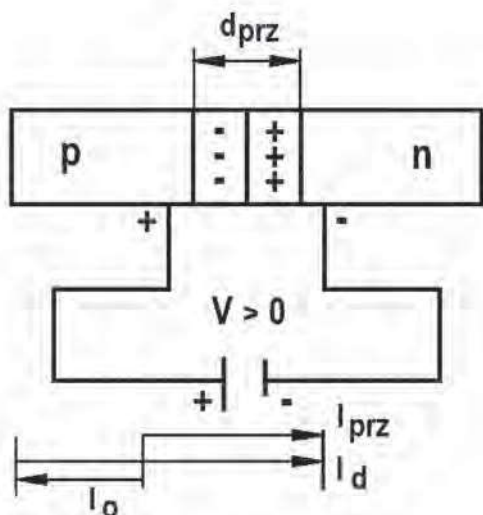


Fig. 3. Forward polarization of the p-n connector

Rys. 3 Polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia

zmiany głębokości wnikania warstwy zubożonej w obszarze typu p i n . Głębokości te rosną przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym dla $V < 0$, a maleją przy polaryzacji w kierunku przewodzenia dla $V > 0$.

Podsumowanie

Zaproponowana interpretacja sposobu wyjaśnienia zjawisk elektrycznych zachodzących w spolaryzowanym półprzewodnikowym złączu p - n metodami termodynamiki fenomenologicznej oraz metodami teorii bilansów wielkości ekstensywnych, pozwala znacznie łatwiej zrozumieć procesy elektryczne zachodzące w świecie mikro a dotyczące cząstek elementarnych poprzez analogię do procesów zachodzących w świecie makro a odnoszących się do cząsteczek gazu doskonałego. Jest to możliwe, bowiem kinetyczna teoria gazów doskonałych opisująca zjawiska transportu gazu w procesie dyfuzji oraz transportu energii cieplnej cząsteczek gazu, może być z powodzeniem stosowana w odniesieniu do nośników ładunków elek-

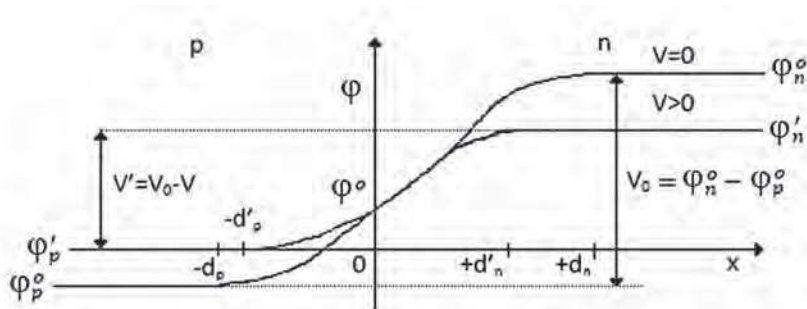


Fig. 4. Potential profile at a forward-biased p-n junction

Rys. 4. Profil potencjału na złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia

trycznych traktowanych tak jak cząstki elementarne przy uwzględnieniu ograniczeń kwantowych dla fermionów, wynikających z rozkładu Fermiego. Można zatem, tak jak dla gazów doskonałych w świecie makro, tworzyć dla nośników ładunków elektrycznych w świecie mikro ich zasoby, gęstości zasobów, strumienie i gęstości strumieni, których stosowanie znakomicie ułatwia zrozumienie skomplikowanych procesów elektrycznych zachodzących w spolaryzowanym półprzewodnikowym złączu p - n .

Otrzymano: 08-10-2024

Zrecenzowano: 25-11-2024

Zaakceptowano: 02-12-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] W. Syczew, *Termodynamika układów złożonych*, PWN, Warszawa 1973.
- [2] Z. Wrześniński, *Termodynamika*, OWPW, Warszawa 2016.
- [3] K. Zalewski, *Wykłady z termodynamiki fenomenologicznej i statystycznej*, PWN, Warszawa 1973.
- [4] E. Fermi, *Thermodynamics*, Dover Publications, New York 1956.
- [5] K. Gumiński, *Termodynamika procesów nieodwracalnych*, PWN, Warszawa 1983.
- [6] K. Gumiński, *Termodynamika*, PWN, Warszawa 1986.
- [7] E.A. Guggenheim, *Applications of statistical mechanics*, Clarendon Press, Oxford 1966.
- [8] J. Rutkowski, *Podstawy bilansowania masy pędu energii i entropii*, WPW, Warszawa 1975.
- [9] Z. Wrześniński, *Termodynamika odnawialnych źródeł energii*, OWPW, Warszawa 2017.
- [10] A. Zagórski, *Fizyka statystyczna*, OWPW, Warszawa 1994.