

## Dodatek 9

### Klasyczna teoria przewodnictwa elektrycznego

Rozwój kwantowej teorii przewodnictwa poprzedził etap klasyczny. Twórcą modelu klasycznego był P. Drude (1902). Model odnosił znaczne sukcesy. Jego podstawowe założenia były następujące:

- (1) metal jest zbiorem jonów sieci przenikającym przez „morze” elektronów – gaz elektronowy
- (2) elektrony mogą się poruszać swobodnie, ale napotykają od czasu do czasu przeszkody z którymi zderzają się
- (3) w temperaturze  $T > 0$  elektrony są w ciągłym ruchu, podobnie jak cząsteczki gazu w naczyniu, między zderzeniami poruszają się po liniach prostych
- (4) jeżeli do kawałka metalu przyłożymy różnicę potencjałów, jego wnętrze przeniknie pole elektryczne, wprawiając elektrony w dodatkowy ruch o składowej wzdłuż przyłożonego pola

Przed przyłożeniem pola ruch elektronów jest całkowicie bezładny, tak jak cząsteczek gazu w powietrzu. Pomiędzy zderzeniami elektrony poruszają się ze średnią prędkością termiczną  $v_T$ . Średnia prędkość takiego ruchu w dowolnym wybranym kierunku jest równa zero. Dopiero po przyłożeniu pola elektrycznego nastąpi dryf elektronów w kierunku elektrody dodatniej. Prędkość dryfu  $v_D$  jest, jak się okazuje, znacznie mniejsza niż średnia prędkość termiczna  $v_T$  ruchu chaotycznego każdego z elektronów.

w polu elektrycznym na pojedynczy elektron działa siła  $F = -e E$ , stąd przyspieszenie

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{e}{m} E \quad (1)$$

jeżeli średni czas pomiędzy zdarzeniami oznaczmy przez  $2\tau$ , wówczas średnia prędkość ruchu wywołanego działaniem pola wynosi

$$\bar{v}_E = \frac{e}{m} E \tau \quad (2)$$

przy wyłączonym polu średnia prędkość dryfu  $v_D$  wynosiła zero, po włączeniu pola będzie ona równa  $v_E$ , stąd

$$\bar{v}_D = \frac{e}{m} E \tau \quad (3)$$

(prędkość  $v_D$  jest również nazywana prędkością unoszenia)

średnią prędkość termiczną można ocenić na podstawie teorii kinetycznej, ponieważ elektron ma 3 stopnie swobody ruchu stąd energia kinetyczna jednego elektronu jest równa

$$E_k = \frac{1}{2} m \bar{v}_T^2 = \frac{3}{2} kT \quad (4)$$

stąd

$$\bar{v}_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (5)$$

jeżeli średni czas pomiędzy zdarzeniami wynosi  $2\tau$ , średnia droga swobodna elektronu jest równa

$$\bar{l} = 2\tau\bar{v}_T \quad (6)$$

za przewodnictwo elektryczne metalu odpowiedzialny jest ruch elektronów z prędkością dryfu, stąd gęstość prądu jest równa

$$j = ne\bar{v}_D \quad (7)$$

podstawiając (3) widzimy, że

$$j = \frac{ne^2\tau}{m} E \quad (8)$$

ponieważ jest to prawo Ohma, stąd

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (9)$$

jest przewodnością właściwą metalu, a

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (10)$$

jego opornością właściwą

przewodność zapisuje się także w postaci formuły

$$\sigma = ne\mu \quad (11)$$

gdzie parametr

$$\mu = \frac{e\tau}{m} \quad (12)$$

nazywa się ruchliwością, z (8) i (11) wynika, że

$$j = ne\mu E \quad (13)$$

porównując (7) i (13) widzimy, że

$$\mu = \frac{\bar{v}_D}{E} \quad [\text{m}^2/\text{Vs}] \quad (14)$$

ruchliwość jest to prędkość dryfu przypadająca na jednostkę natężenia pola elektrycznego.

Teoria Drudego jest użyteczna, ponieważ wszystkie parametry występujące we wzorze (11) mogą być wyznaczone doświadczalnie. Jednak w miarę postępu metod doświadczalnych załamała się ona w następujących punktach:

- (1) zmierzone wartości średniej drogi swobodnej okazały się o kilka rzędów wielkości większe niż oczekiwane
- (2) teoria nie daje zależności temperaturowych
- (3) pomiary efektu Halla wykazały, że w ciałach stałych istnieją nośniki zarówno ujemne jak i dodatnie, czego teoria nie przewiduje
- (4) nie przewiduje istnienia półprzewodników i izolatorów