

titlepage

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Równania dryfu-dyspersji</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Model</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>WSZYSTKO CO NIŻEJ NIEISTOTNE</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Opis systemu materiałowego</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>4</b>
5.1	Prąd dryfu . . . . .	4
5.2	Prąd przesunięcia . . . . .	4
5.3	Ruchliwość ładunków . . . . .	5
5.4	Konduktywność . . . . .	5
5.5	Model MPM . . . . .	5
5.6	równania . . . . .	5
<b>6</b>	<b>równania</b>	<b>5</b>
6.1	Makroskopowe równanie ciągłości . . . . .	5
6.2	Gęstość prądu w półprzewodniku . . . . .	6
6.3	Równania ciągłości koncentracji nośników . . . . .	6
6.4	xxxxxxxx . . . . .	7
6.5	Równanie Poissona . . . . .	7
<b>7</b>	<b>asa</b>	<b>8</b>
7.1	asd . . . . .	8

## 1 Równania dryfu-dyspersji

W planarnej warstwie półprzewodnika występują głównie prądy powodowane obecnością zewnętrznego pola elektrycznego. Nierównomierna koncentracja ładunków generuje prądy które uwidaczniają się jedynie w słabych polach elektrycznych albo w przypadku ich całkowitego braku. Zakładając, że zewnętrzne pole elektryczne jest równoległe do kierunku wzrostu warstwy a przy tym izotropowe na pozostałych kierunkach oraz, że koncentracja ładunków jest analogicznie izotropowa, to wtedy gęstość prądu nośników w warstwie wynosi odpowiednio dla elektronów (n) i dziur(p) (z [2] s.26)

$$j_n(z) = c_n(z)q_n\mu_n E(z) + q_n D_n \frac{\partial}{\partial z} c_n \quad (1.1)$$

$$j_p(z) = c_p(z)q_p\mu_p E(z) + q_p D_p \frac{\partial}{\partial z} c_p \quad (1.2)$$

gdzie

$q_n, q_p$  - ładunki nośników  
 $\mu_n, \mu_p$  - ruchliwość nośników  
 $c_n, c_p$  - koncentracja nośników  
 $E(z)$  - pole elektryczne  
 $D_n, D_p$  - współczynnik dyfuzji  
tak, że

$$j(z) = j_n(z) + j_p(z) \quad (1.3)$$

Przy tym zachodzą relacje ([1](p.40))

$$D_n = \mu_n k_B T / q_n \quad (1.4)$$

$$D_p = \mu_p k_B T / q_p \quad (1.5)$$

gdzie

$k_B$  - stała Boltzmanna  
 $T$  - temperatura warstwy

## 2 Model

- rozpatruje się prostopadłościenną warstwę półprzewodnika której pole powierzchni przekroju wynosi  $S$
- warstwa znajduje się w obecności pola elektrycznego  $E(z)$
- warstwa jest temperaturowo izotropowa
- warstwa jest ruchliwościowo izotropowa

Dla prądu elektronowego  $j_n$

$$j_n(z) = c_n(z)q_n\mu_n E(z) + q_n D_n \frac{\partial}{\partial z} c_n$$

$$j_n(z) = c_n(z)q_n\mu_n E(z) + \mu_n k_b T \frac{\partial}{\partial z} c_n$$

wystarczy więc rozwiązać równanie

$$\frac{\partial}{\partial z} c_n + \frac{q_n \mu_n E(z)}{\mu_n k_b T} c_n(z) = \frac{j_n(z)}{\mu_n k_b T}$$

to jest równanie różniczkowe zwyczajne niejednorodne I-go rzędu

$$F(x, y, y') = 0$$

gdzie  $x$  - zmienna niezależna,  $y$  - zmienna zależna,  $y'$  - pochodna zmiennej niezależnej  $x$ . Można je przedstawić jako

$$y' + C_1(x)y = C_2(x) \quad (2.1)$$

Aby znaleźć rozwiązanie równanie, najpierw rozwiążę jego wersję jednorodną (tu postępowanie), tj.:

$$y' + C_1(x)y = 0 \quad (2.2)$$

rozdzielając zmienne ostaje się

$$\frac{dy}{y} = -C_1(x)dx \quad (2.3)$$

całkując

$$\int \frac{dy}{y} = - \int C_1(x)dx \quad (2.4)$$

stad

$$\ln|y| = - \int C_1(x)dx \quad (2.5)$$

$$y = C e^{-\int C_1(x)dx} \quad (2.6)$$

Teraz metodą uzmienniania stałej  $C$  znajdę rozwiązanie przypadku niejednorodnego. Niech

$$y = C(x)e^{-\int C_1(x)dx} \quad (2.7)$$

teraz więc

$$y' = C'(x)e^{-\int C_1(x)dx} + C(x)(-C_1(x))e^{-\int C_1(x)dx} \quad (2.8)$$

$$y' = C'(x)e^{-\int C_1(x)dx} - C(x)C_1(x)e^{-\int C_1(x)dx} \quad (2.9)$$

czyli równanie jednorodne przyjmuje postać

$$C'(x)e^{-\int C_1(x)dx} - C(x)C_1(x)e^{-\int C_1(x)dx} + C_1(x)C(x)e^{-\int C_1(x)dx} = C_2(x) \quad (2.10)$$

$$C'(x)e^{-\int C_1(x)dx} = C_2(x) \quad (2.11)$$

$$C'(x) = C_2(x)e^{\int C_1(x)dx} \quad (2.12)$$

$$C(x) = \int C_2(x)e^{\int C_1(x)dx} dx \quad (2.13)$$

ostatecznie, szukanym rozwiązaniem jest funkcja

$$y = e^{-\int C_1(x)dx} \int C_2(x)e^{\int C_1(x)dx} dx \quad (2.14)$$

### 3 WSZYSTKO CO NIŻEJ NIEISTOTNE

#### 4 Opis systemu materiałowego

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

#### 5 Wprowadzenie

W odpowiednich warunkach półprzewodniki zawierają w sobie swobodnie nośniki ładunków co pozwala wytwarzać przyrządy znajdujące zastosowania w wielu dziedzinach. Do wytworzenia dobrej jakości przyrządu spełniającego określone zadanie potrzebna jest precyzyjna technologia oraz znajomość wszelakich efektów mogących potencjalnie wystąpić w przyrządzie, podczas jego projektowania.

##### 5.1 Prąd dryfu

Przyłożone do półprzewodnika pole elektryczne generuje w nim standardowy prąd przewodzenia swobodnych nośników

$$I_{pw} = j_{pw}S \quad (5.1)$$

gdzie

$j_{pw}$  - gęstość prądu przewodzenia

$S$  - pole przekroju półprzewodnika prostopadłe do kierunku przepływu prądu

W przypadku obecności procesów związanych z rekombinacjami nośników, jak może się to zdarzyć podczas naświetlenia przyrządu, przepływ nie jest zachowany tzn. powstają lokalne wahania gęstości prądu nośników a to może skutkować nieprawidłowościami w działaniu.

##### 5.2 Prąd przesunięcia

Niestacjonarne pole elektryczne przyłożone do półprzewodnika generuje w nim m.in. prąd przesunięcia nośników

$$I_{ps} = j_{ps}S \quad (5.2)$$

tak, że

$$\vec{j}_{ps} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (5.3)$$

gdzie

$\varepsilon$  - przenikalność elektryczna półprzewodnika

### 5.3 Ruchliwość ładunków

Same nośniki oczywiście nie poruszają się ruchem jednostajnym a są przyspieszane w wyniku oddziaływania z polem elektrycznym. Do tego zderzają się one z atomami sieci krystalicznej przez co rozpędzają się one od nowa. Wszystko to działa tak, że takiemu nośnikowi można przypisać średnią szybkość  $\vec{v}$ , silnie skorelowaną z polem elektrycznym  $\vec{E}$  tak, że

$$\vec{v} = \frac{q}{|q|} u \vec{E} \quad (5.4)$$

gdzie

$u$  - ruchliwość nośników

$q$  - ładunki elektryczne nośników

Ta zależność jest zachowana jedynie dla słabych pól. Co więcej, ruchliwość jest mocno związana z rozpraszaniem a więc w miarę domieszkowania półprzewodnika, ta gwałtownie maleje. Niewielkie domieszkowanie nie wprowadza jednak istotnych różnic.

### 5.4 Konduktywność

Gęstość prądu można wyrazić poprzez koncentrację nośników  $c$ , jako

$$\vec{j} = cq\vec{v} \quad (5.5)$$

$$= cu|q|\vec{E} \quad (5.6)$$

$$(5.7)$$

Przy tym występuje związek z konduktancją  $\sigma$  taki, że

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (5.8)$$

Co prowadzi do równania

$$\hat{\sigma} = cu|q| \quad (5.9)$$

### 5.5 Model MPM

Gdy do półprzewodnika doczepione są dwa metalowe kontakty, stanowi to model MPM.

W takim modelu, po ustaleniu stanu równowagi, gdzie to wyrównują się poziomy Fermiego obydwu metali, w półprzewodniku generuje się pole elektryczne

$$E = \quad (5.10)$$

### 5.6 równania

## 6 równania

### 6.1 Makroskopowe równanie ciągłości

$$J_1 = av_0 n_1 (1 - p_2) \quad (6.1)$$

gdzie

$J$  - gęstość nośników  
 $a$  - stała sieciowa  
 $v_0$  - częstotliwość 'przeskoków'  
 $n$  - koncentracja nośników  
 $p$  - prawdopodobieństwo, że węzeł jest obsadzony

Przy tym

$$n = \frac{p}{N_v} \quad (6.2)$$

$N_v$  - liczba węzłów/miejsc na jednostkę objętości, stąd

$$J_n = -v_0 a^2 \frac{(n_2 - n_1)}{a} \quad (6.3)$$

czyli prawo Ficka

$$J_n = -D_n \frac{\partial}{\partial x} n \quad (6.4)$$

gdzie  $D_n$  to chemiczny współczynnik dyfuzji a współczynnik przeskoku termodynamicznego:

$$D_J = k_B T u_n / q \quad (6.5)$$

Relacja Einsteina

$$D_n = T_n k_B T u_n / q \quad (6.6)$$

współczynnik termodynamiczny:

$$T_n = \frac{n}{k_B T} \frac{\partial \mu_n}{\partial n} \quad (6.7)$$

## 6.2 Gęstość prądu w półprzewodniku

$$j = j_n + j_p \quad (6.8)$$

Z podejścia dryfu i dyfuzji

$$j_n = q n u_n E + q D_n \frac{\partial}{\partial x} n \quad (6.9)$$

$$j_p = q p u_p E - q D_p \frac{\partial}{\partial x} p \quad (6.10)$$

## 6.3 Równania ciągłości koncentracji nośników

$$\frac{\partial}{\partial t} n = + \frac{1}{q} \frac{\partial}{\partial x} J_n + G - U_{np} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p = + \frac{1}{q} \frac{\partial}{\partial x} J_p + G - U_{np} \quad (6.12)$$

gdzie

$G$  - współczynnik generacji ekscytonów  
 $U_{np}$  - współczynnik rekombiacji

#### 6.4 xxxxxxxx

Przy

$$p_0 - n_0 + N_{ionic} = 0 \quad (6.13)$$

zachodzi zależność

$$\frac{\partial}{\partial x} E = + \frac{q}{v} (\Delta p - \Delta n) \quad (6.14)$$

$$n = n_i e^{(E_{Fn} - E_i)/k_B T} \quad (6.15)$$

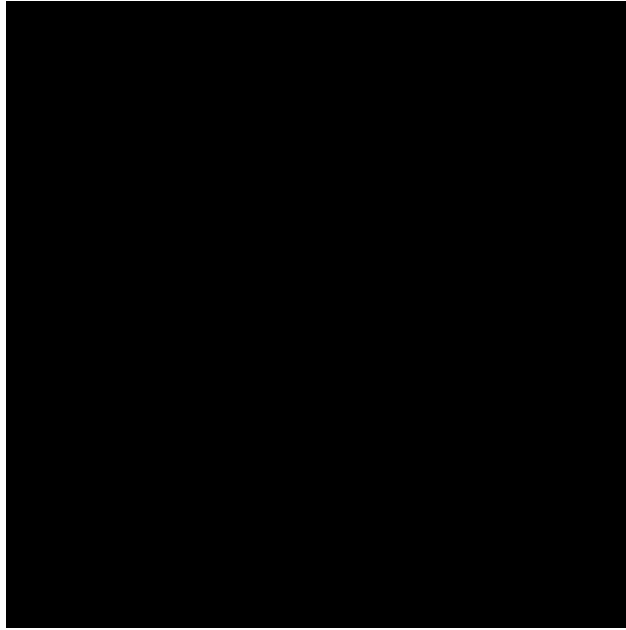
$$p = n_i e^{(E_{Fp} - E_i)/k_B T} \quad (6.16)$$

#### 6.5 Równanie Poissona

$$\frac{1}{q} \frac{\partial^2}{\partial x^2} E_i = + \frac{q}{v} (p - n + N_{ionic}) \quad (6.17)$$

$$E_i = -E_g - q\psi + k_B T \ln(N_v/N_c)/2 \quad (6.18)$$





Rysunek 6.1: Obraz

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Tabela 6.1: Caption

1	1
1	1

## 7 asa

### 7.1 asd

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus

tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Tabela 7.1: tabela

1	1
1	1

## Bibliografia

- [1] Juan Bisquert. *Nanostructured energy devices: foundations of carrier transport*. Taylor & Francis Group, 2017. ISBN: 9781466587991.
- [2] Shun Lien Chuang. *Physics of Optoelectronic Devices*. John Wiley & Sons, 1995. ISBN: 9780471109396.