1.1 مقدمة :

تعتبر أنصاف النواقل من أهم المواد المستعملة في التكنولوجيا الحديثة إن لم نقل أنها أساسها. و مركبات أنصاف النواقل هي القلب النابض و شريان الحياة للإلكترونيات العصرية و التي أضحت عمود الحياة الحديثة السريعة. تجد تطبيقاتها في جميع مجال الحياة فنجدها في طرق التواصل و الإتصالات ، وسائل النقل ، الميادين الطبية و العلمية و ما إلى غير ذلك. و يعود الفضل في ذلك إلى عبقرية البشرية و توفر مواد رائعة هي أنصاف النواقل. في هذا الفصل نتعرف على المعادلات الأساسية المستعملة في فيزياء مركبات أنصاف النواقل و التي تمكننا من تحديد التيار الكهربائي الذي تولده.

2.1 التيار الكهربائي :

هناك نوعين أساسيين من التيار الكهربائي، تيار الإنتشار (Diffusion) و تيار الجر (Drift) كما أنه يوجد نوع ثالث يكون مهما في بعض الأحيان (خاص بأنصاف النواقل) هو تيار التوليد–الإلتحام (Generation–Recombination).

1.2.1 تيار الإنتشار :

هو تيار ناتج عن عدم إنتظام توزيعة الشحنات (حاملات الشحنة) ، الإلكترونات و الثقوب. نعبر عن تيار إنتشار الإلكترونات بالعلاقة التالية :

$$I_{DN} = SJ_{DN} \qquad (1.1)$$

J_{DN} كثافة التيار و S المقطع الذي يمر من خلاله التيار. n تركيز الإلكترونات.

نعبر عن كثافة تيار الإنتشار للإلكترونات بالعلاقة :

$$\boldsymbol{J}_{DN} = qD_n\overrightarrow{grad}\, n \qquad (1.2)$$

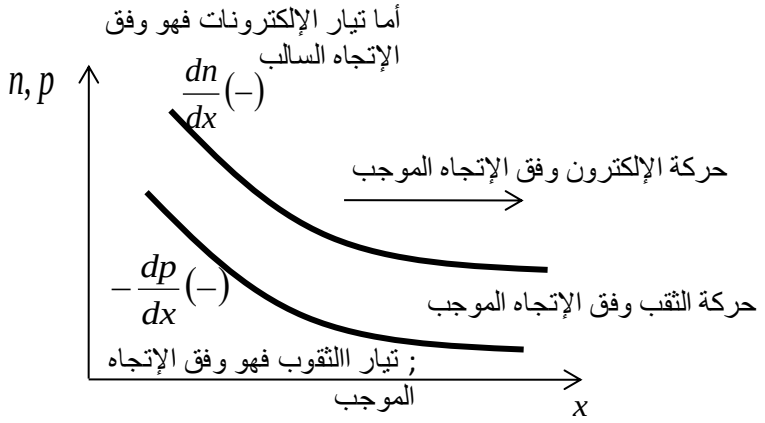
D_n معامل الإنتشار. و في الحالة البسيطة التي يكون فيها تدرج توزيعة الإلكترونات وفق بعد واحد (x مثلا) ، تصبح العلاقة :

$$J_{DN} = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad (1.3)$$

علاقة مشابهة للثقوب و لكن مع إشارة سالبة:

$$J_{DP} = -qD_p \frac{dp}{dx} \qquad (1.4)$$

الإلكترونات (الثقوب) دوما تنتشر من المنطقة ذات أعلى تركيز إلى المنطقة الأقل تركيزا. و عليه يكون التدرج $\frac{dn}{dx}$ و $\frac{dp}{dx}$ سالبا . إذن تيار إنتشار الإلكترونات عكس حركة الإلكترونات ، أما تيار إنتشار الثقوب فهو مع حركة الثقوب.(أنظر الشكل -1.1-.



الشكل-1.1-

2.2.1 تيار الجر:

و هو تيار ناتج عن فرق في الجهد أي بسبب وجود حقل كهربائي. تعطى عبارة تيار الجر بالنسبة للإلكترونات و الثقوب على الترتيب كما يلي:

$$\boldsymbol{J_{EN}} = qn\mu_n \boldsymbol{E} \qquad (1.5.a)$$

$$\boldsymbol{J_{EP}} = qp\mu_p \boldsymbol{E} \qquad (1.5.b)$$

حيث μ_n و μ_p حركية كل من الإلكترونات و الثقوب. و $\boldsymbol{E}$ الحقل الكهربائي $\boldsymbol{E} = -\overrightarrow{grad}V$ ، حيث V الكمون الكهربائي.

الحد $qn\mu_n$ يمثل الناقلية الناتجة عن الإلكترونات و الحد $qp\mu_p$ يمثل الناقلية الناتجة عن الثقوب :

$$\boldsymbol{J_{EN}} = \sigma_n \boldsymbol{E} \qquad (1.6.a)$$

$$\boldsymbol{J_{EP}} = \sigma_p \boldsymbol{E} \qquad (1.6.b)$$

و هو قانون أوم $(V = RI)$. و عليه بالنسبة لحالة البعد الواحد :

$$J_{EN} = -qn\mu_n \frac{dV}{dx} \quad (1.7.a)$$

$$J_{EP} = -qp\mu_p \frac{dV}{dx} \quad (1.7.b)$$

و التيار الكلي هو مجموع تيار الإنتشار و تيار الجر لكل من الإلكترونات و الثقوب.

$$J = J_D + J_E = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} - qn\mu_n \frac{dV}{dx} - qp\mu_p \frac{dV}{dx} \quad (1.8)$$

3.2.1 تيار التوليد–الإلتحام :

يكون هذا التيار مهما إذا كان نصف الناقل غير مثالي (وجود عيوب) و يحدد من معادلة الإستمرارية. تعبر معادلة الإستمرارية عن عودة نصف الناقل إلى حالة الإتزان بسبب إثارة خارجية (ضوئية، حرارية،....) و التي قد تتصاحب بوجود العيوب . في معادلة الإستمرارية نعبر عن الفائض في الحاملات الحرة في الحجم العنصري بالفرق بين التدفق الداخل و التدفق الخارج ، والفرق بين المتولد و الملتحم . تكتب معادلة الإستمرارية للإلكترونات كما يلي:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} div\boldsymbol{J_n} + G_n - R_n \quad (1.9 .a)$$

و بالنسبة للثقوب كما يلي :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} div\boldsymbol{J_p} + G_p - R_p \quad (1.9 .b)$$

حيث تمثل G_n, G_p ، معدل التوالد لكل من الإلكترونات و الثقوب ، و R_n, R_p معدل الإلتحام لكل من الإلكترونات و الثقوب.

في حالة الإستقرار : $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ، و بإعتبار التغيرات وفق ox نجد :

$$0 = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n \Longrightarrow J_n = -q\int (G_n - R_n)\, dx \quad (1.10.a)$$

$$0 = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p \Longrightarrow J_p = q\int \left(G_p - R_p\right) dx \quad (1.10.b)$$

في حالة عدم وجود إثارة خارجية ، يقتصر التيار على تيار الإلتحام :

$$J_n = q\int R_n\, dx \quad (1.10.a)$$

$$J_p = -q\int R_p\, dx \quad (1.10.b)$$

3.1 أنواع الإلتحامات :

1.3.1 الإلتحام المباشر :

هذا النوع من الإلتحام يحدث مباشرة بين إلكترون في نطاق التوصيل و ثقب في نطاق التكافؤ ، و إذا كان نصف الناقل ذو نطاق مباشر فإن هذا الإلتحام يكون مشعا و طاقة الفوتون المنبعث تكون بنفس قيمة النطاق الممنوع.

يعطى معدل الإلتحام لكل من الإلكترونات و الثقوب بالعلاقتين التاليتين:

$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{n - n_0}{\tau_n} \qquad (1.11.a)$$

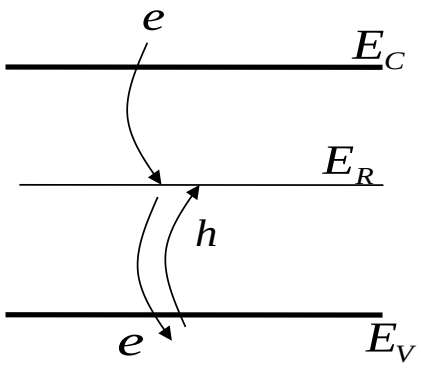
$$R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{p - p_0}{\tau_p} \qquad (1.11.b)$$

حيث n, p ، تركيزي الإلكترونات و الثقوب بعد الإثارة ، و n_0, p_0 التراكيز في حالة الإتزان. $\tau_{n,p}$ تمثل مدة حياة الحاملات الحرة.

عادة يكون التيار الناتج عن هذا النوع من الإلتحام مهملا لأن تركيز الحاملات المثارة يكون أقل بكثير من تركيزها في حالة الإتزان. $\Delta n \ll n_0, \Delta p \ll p_0$.

2.3.1 الإلتحام غير المباشر :

يتم الإلتحام عن طريق مستويات طاقية تقع في النطاق الممنوع E_g . هذه المستويات ناتجة عن الشوائب الكيماوية (عناصر بعيدة عن العمود الرابع بالنسبة للسيليكون) و العيوب الفيزيائية.



الشكل -1.2-

في هذه الحالة يكون تيار الإلتحام-التوليد معتبرا إذا كان تركيز هذه العيوب أو الشوائب معتبرا (قريب من تركيز التطعيم) و يعطى معدل الإلتحام للإلكترونات و الثقوب:

$$R_n = R_p = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_n (p+p_1) + \tau_p (n+n_1)} \quad (1.12)$$

حيث n_i التركيز الجوهري ، p_1 إسكان الثقوب في المستوى E_R ، n_1 إسكان الإلكترونات في المستوي E_R .

$$p_1 = n_i e^{-\frac{E_R - E_i}{KT}} \quad (1.13.a)$$

$$n_1 = n_i e^{\frac{E_R - E_i}{KT}} \quad (1.13.b)$$

τ_n و τ_p هي مدة حياة الإلكترونات و الثقوب الملتحمة عبر مركز الإلتحام E_R . في هذه الحالة τ_n و τ_p لها علاقة بتركيز مركز الإلتحام N_R :

$$\tau_n = \frac{1}{C_n N_R} \, , \, \tau_p = \frac{1}{C_p N_R} \quad (1.14)$$

حيث C_n ، C_p معاملات الإقتناص للإلكترونات و الثقوب من طرف مركز الإلتحام.

يكون تيار الإلتحام (التوليد) أعظميا عندما يكون :

في حالة وجود نوعين قبل الإلتحام $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_D} + \frac{1}{\tau_{ind}}$

في حالة وجود مجموعة من مراكز الإلتحام $\frac{1}{\tau} = \sum \frac{1}{\tau_{Ri}}$

4.1 معادلة بواسون :

تمثل العلاقة بين الكمون و الشحنة المحلية في نصف الناقل و تعطى في البعد ox :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = -\frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}\left(p(x) - n(x) + N_D(x) - N_A(x) \pm N_R(x)\right) \quad (1.15)$$

$N_{D,A}(x)$ تمثل تركيز التطعيم.