دراسة عرض منطقة العبور

تقديم : علي بسام محمد

تاريخ : 2015/11/15

ملخص

يقدم هذ البحث دراسة نظرية لحساب عرض منطقة النضوب في أنصاف النواقل الهجينة، وذلك انطلاقاً من المبادئ لنصل الى مرادنا من البحث

الفهرس

الموضوع	الصفحة
المقدمة وإشكالية البحث	3
الباب الأول: مدخل الى أنصاف النواقل	
الناقلية الكهربائية	4
أساسيات أنصاف النواقل	5
الباب الثاني: خاصيات التيار	
التيار الجر وتيار الانتشار	5
الناقلية والمقاومة النوعية	8
كثافة تيار الانتشار	11
الباب الثالث: المتصل الثنائي	
صناعة المتصل الثنائي	14
المتصل الثنائي في حالة التوازن	15
عرض منطقة النضوب	18
الباب الرابع: التجربة العملية	22
الخاتمة و التوصيات	26
المراجع وفهرس المصطلحات	27
المراجع	27
فهرس الاشكال	28
فهرس الجداول	29

المقدمة

لا يمكن صعود الدرج بأكمله دفعةً واحدة، وإنما درجة وراء درجة، وهذا ما دار في أدمغة العلماء منذ القديم، فقد درسوا كل مادة على حذا، ثم درسوا خواصها لتحقيق الاستفادة المثلى منها، والناقلية الكهربائية كانت لها الحصة الأكبر من تلك الدراسة، لأن تطويرها والتقدم بدراستها يعني بدايةَ ثورة تقنية وتكنولوجية كبيرة، فوضعوا هدف إيجاد الطريقة المثلى لنقل التيار الكهربائي نصب أعينهم.

أفضل النواقل الكهربائية هي المعادن، لكن الناقلية الجيدة ليست كل ما يلزمنا لنقل التيار بالشكل الأمثل، بل توجب إيجاد طريقة للتحكم بضخامة التيار الكهربائي، والتحكم بجهته بشكل كامل.

دخلت أنصاف النواقل الميدان، وحلت الكثير من المشاكل التي اعترضت العلماء، فكانت جهاز التحكم المنقذ لتجاربهم، وابتكروا أنصاف النواقل الهجينة لتحدث ثورة تقنية انطلقت لتحل الكثير من المشاكل، لكن –وبشكل عام– يجب دراسة تفاصيل ما تم صناعته للنهوض به أكثر، فتفاجأ العلماء بوجود منطقة في منتصف المتصل الثنائي، خالية من الشحنات الكهربائية وتقفز عبرها الشحنات الكهربائية، فسموها منطقة العبور(النضوب) وسنتعرف في هذا البحث على كيفية استنتاج عرض منطقة العبور كونها القاعدة الأقسى للنهوض بالبناء الأكبر، ألا وهو تطوير علم أنصاف النواقل.

إشكالية البحث:

- **كيف يمكن تصنيع متصل ثنائي**
- **ما هي منطقة العبور**
- **كيف يمكن استنتاج عرض منطقة العبور بالعلاقات الرياضية**

الباب الأول: مدخل الى أنصاف النواقل:

الناقلية الكهربائية[1]:

إن تصنيف المواد من حيث ناقليتها للتيار الكهربائي يعتمد على وفرة الالكترونات الحرة(أي الكثافة الحجمية للإلكترونات فيها) ،وهي تصنف بحسب مقاومتها النوعية ρ (وهو ما سنتحدث عنه لاحقاً بالتفصيل)إلى ثلاثة أصناف:

1-مواد جيدة الناقلية(نواقل):

مقاومتها النوعية صغيرة جداً(بالدرجة العادية من الحرارة) ،ويعود ذلك لاحتوائها على وفرة من الالكترونات الحرة فيها بكثافة حجمية للإلكترونات $10\ e/cm^{22}$ تقريباً ومن أمثلتها المعادن.

2-مواد ضعيفة الناقلية(عوازل):

مقاومتها النوعية كبيرة جداً(بالدرجة العادية من الحرارة) ويعود ذلك لندرة الالكترونات فيها بكثافة حجمية للالكترونات $10\ e/cm^3$ تقريباً ومن أمثلتها الكوارتز والبورسلان.

3- مواد نصف ناقلة:

تأخذ مقاومتها النوعية (بالدرجة العادية من الحرارة) ،قيماً تقع بين المقاومة النوعية لكل من المواد الجيدة الناقلية والمواد العازلة ،وتقل مقاومتها النوعية بازدياد درجة الحرارة، ومن أمثلتها الجرمانيوم والسيليسيوم.

لاحظ رتبة المقاومة النوعية في الدرجة العادية من الحرارة في الجدول أدناه:

مواد	عازلة	نصف ناقلة	ناقلة
ρ من رتبة	$10^6\ m.\Omega$	10^{-5}-$10^5\ m.\Omega$	$10^{-8}\ m.\Omega$
أمثلة	الكوارتز-الزجاج	الجرمانيوم-السيليسيوم	النحاس-الألمنيوم

الجدول(1): تصنيف المواد ومقاومتها النوعية

[1] السورية، و. ا. (2012-2013م). "الفيزياء." 213.

أساسيات أنصاف النواقل[2]

عناصر أنصاف النواقل مثل السيليكون Si ، الحرمانيوم Ge ، الزرنيخ GaAs ،لديها خواص كهربائية بعضها في المنتصف وبعضها بين النواقل والعوازل، أنصاف النواقل ليسوا نواقل جيدة ولا عوازل جيدة(لذلك سميت أنصاف النواقل).

في بنية نصف الناقل يوجد (الكترونات حرة) لأن ذراتها تقريباً تصطف معاً في بنية بلورية.

على كل حال، قابلية أنصاف النواقل على نقل الالكترونات يمكن أن يتم تطويرها بإضافة ذرات أخرى لبنيتها البلورية، تحتوي الكترونات أكثر من الثقوب والعكس صحيح، وهذا بإضافة نسبة صغيرة من عناصر أخرى للعنصر الأساسي في نصف الناقل، غير الجرمانيوم والسيليكون.

ظواهر انتقال الشحنة:

الباب الثاني: خاصيات التيار:

التيار الجر والتيار الانتشار(Drift Current and Diffusion Current):

يحصل التيار بفعل حركة الجسيمات المادية في الأوساط الصلبة، أو السائلة، أو الغازية.

فإذا كانت الجسيمات المتحركة مشحونة، قلنا أنه لدينا تياراً كهربائياً، ونسمي الوسط الذي تتحرك فيه الشحنة(الناقل)، أما كمية الشحنة الكهربائية التي تعبر مقطعاً عرضياً للناقل خلال واحدة الزمن(شدة التيار الكهربائي).

هناك آليتان رئيستان لانتقال حاملات الشحنة في الوسط الناقل.

الجر: هي الحركة الناتجة بتأثير الحقل الكهربائي E المطبق على الناقل.

الانتشار: هي الحركة الناتجة عن التدرج في كثافة الشحنة الكهربائية خلال الوسط الناقل.

[2] (2015). "Semiconductor Basics."

الحركة والسرعة الحرية:

لنفرض أن لدينا ناقل من النوع n في وضع التوازن الحراري، وأن تركيز الشوائب فيه منتظم، في هذه الحالة، تعطى الطاقة الحرارية لإلكترونات الناقلية وفق العلاقة $1/2\ m_n^* v_{th}^2 = 3/2\ KT$

حيث T درجة الحرارة المطلقة، K ثابت بولتزمان[3] ، v_{th} السرعة الحرارية للالكترون، m_n^* الكتلة الفعالة للالكترون.

يمثل الطرف الأيسر من العلاقة "$3/2\ KT$" الطاقة الحرارية للالكترون وفق ثلاث درجات حرية (الاتجاهات الثلاث)، كل درجة حرية تعادل $1/2\ KT$ عند درجة حرارة الغرفة تعادل السرعة الحرارية للالكترون وفق العلاقة السابقة $10^7\ cm/s$ لكل من Si و GaAs لذلك يتحرك الالكترون في وضع التوازن بسرعة كبيرة، وفي جميع الاتجاهات.

يمكن النظر الى الحركة الحرارية لالكترون الناقلية كسلسلة من التصادمات مع الشبكة البلورية وذرات الشائبة، إن تأثير الحركة العشوائية للالكترونات، لن تؤدي الى انزياح ملحوظ في اتجاه معين خلال فترة معتبرة من الزمن، أي أن التيار الإجمالي معدوم.

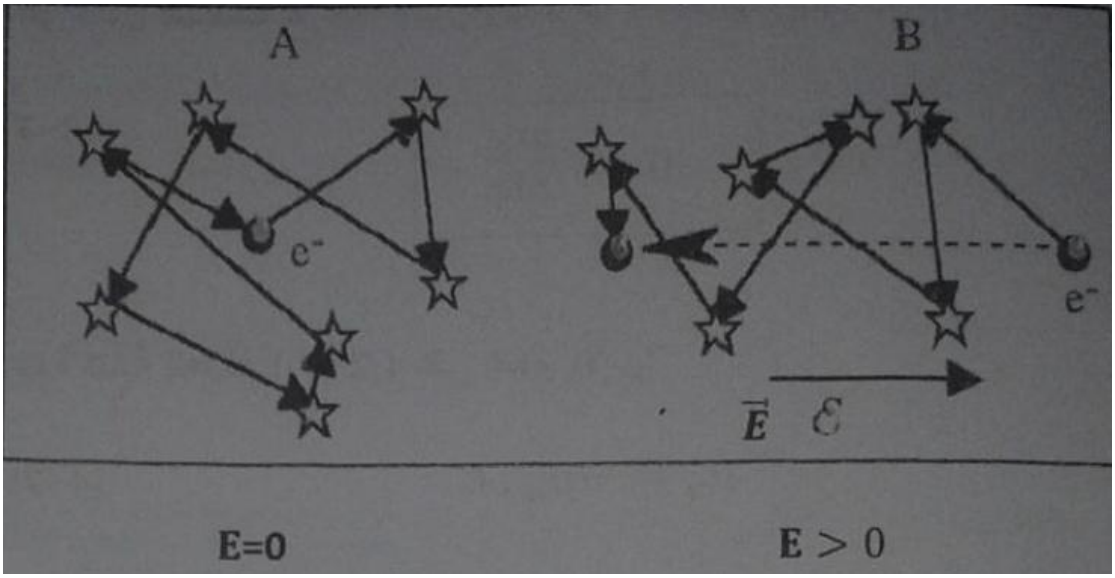
نسمي المسافة المقطوعة بين اصطدامين متتاليين المسار الحر الوسطي l ، كما نسمي الزمن الوسطي المستغرق بين اصطدامين الزمن الحر الوسطي T_c ، أو زمن الاسترخاء.

ولإيجاد الزمن الحر الوسطي نجد العلاقة:

$$T_c = l/v_{th}$$

عندما نطبق حقلاً صغيراً E على نصف ناقل، يخضع كل الكترون الى قوة كهربائية $F=q.E$ ، ويتحرك ما بين كل اصطدامين متتاليين حركة متغيرة بانتظام، وباتجاه مخالف لجهة الحقل الكهربائي، لذلك سوف تضاف سرعة جديدة للسرعة الحرارية للالكترون تسمى السرعة الجرية وهي سرعة ناتجة عن تطبيق الحقل الكهربائي على نصف الناقل بحيث نرى في الشكل الإزاحة المركبة للالكترون الناتجة عن الحركة العشوائية والحركة الجرية.

[3] $K = 1.3806505 \times 10\ ^{-23} J / K$ وهو ثابت في الترموديناميك



الشكل (1) : الحركة العشوائية للالكترون في نصف الناقل في حال غياب الحقل الكهربائي (A) حال تطبيق حقل كهربائي (B)

يمكننا الحصول على السرعة الجرية للالكترون بمساواة كمية الحركة (قوة * زمن) المطبقة على الالكترون خلال انتقاله الحر بين اصطدامين مع كمية حركته المكتسبة خلال نفس تلك الفترة (T_c) هذه المساواة ممكنة لأنه في حالة التوازن كل كميات الحركة التي تمتلكها الالكترونات في الفترات ما بين الاصطدامات، سوف تقدم الى الشبكة البلورية عن التصادم، بفرض أن السرعة الجرية للالكترون V_n والكتلة الفعالة له m_n^* يمكننا أن نكتب :

$$F.T_c=m_n^*v_n$$

$$-qE.T_c=m_n^*v_n$$

وبالتالي:

$$V_n= -(qT_c/m_n^*)E$$

هذه العلاقة تشير الى أن السرعة الجرية للالكترون، تتناسب طرداً مع الحقل الكهربائي المطبق، وعامل التناسب، يتعلق بالزمن الحر الوسطي، والكتلة الفعالة للالكترون، ندعو عامل التناسب حركية الالكترون ونرمز له بالرمز μ_n :

$$\mu_n=qT_c/m_n^*$$

فتصبح علاقة السرعة الجرية على النحو التالي:

$$V_n = -\mu_n . E$$

بمحاكمة مماثلة يمكننا وصف حركة الثقوب في نصف ناقل من النوع p والوصول الى علاقة مشابهة بالنسبة للثقوب

$$v_p = \mu_p . E$$

حيث v_p السرعة الجرية للثقوب، μ_p حركية الثقوب.

من الواضح أن إشارة (−) أزيحت من العلاقة لأن جهة حركة الثقوب (اتجاه v_p) من جهة الحقل الكهربائي E.

الناقلية والمقاومة النوعية (Conductivity and resistivity)[4]:

يمكننا القول إن قياس الناقلية الكهربائية أكثر القياسات شيوعاً لدى دراسة خصائص أنصاف النواقل، وعلى اعتبار أن التيار الكهربائي يتشكل من مساهمة كل من الالكترونات والثقوب، لذلك تعتمد الناقلية على تركيز حاملات الشحنة (الالكترونات، أو الثقوب، أو كلاهما)، وكذلك على توزع سرعاتها، إذا عدنا الى علاقة كثافة التيار ، واستبدلنا السرعة الجرية بقيمتها بدلالة الحركية في نصف ناقل من النوع n لوجدنا:

$$J = qnv_d$$

$$J_n = qn\mu_n E$$

أما في حالة نصف ناقل من النوع p، فإن كثافة التيار تصبح، بعد التعويض عن السرعة الجرية بقيمتها $v_p = \mu_p . E$ على الشكل التالي:

$$J_p = qp\ \mu_p E$$

[4] الدين، ص. ا. ن. (2011-2012م). "الفيزياء الالكترونية." 208.

عندما يطبق حقل كهربائي على نصف ناقل، فإن الثقوب ستندفع باتجاه الحقل، والالكترونات تندفع بالاتجاه المعاكس، وبالتالي يمكن كتابة كثافة التيار الكلي على النحو الآتي:

$$J=J_n+J_p$$

$$=qn\mu_nE+qp\mu_pE$$

$$=E(qn\mu_n+qp\mu_p)$$

أو

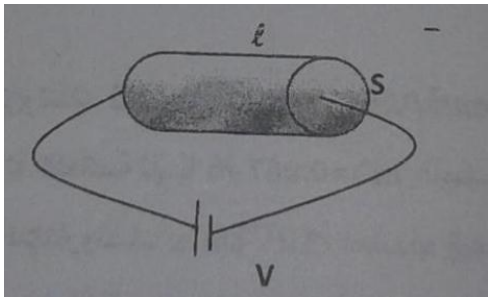
$$J= \sigma.E$$

طبعاً ليس من الضروري أن يكون التركيزان n,p متساويين، وإنما حسب نوع نصف الناقل حيث تكون n الأعلى في نصف الناقل من النوع n وتكون p هي الأكبر في نصف الناقل من النوع p ، أما في نصف الناقل الأصيل حيث $n=p=n_i$

تعطى الناقلية بالعلاقة:

$$\sigma=qn_i(\mu_n+ \mu_p)$$

من جهة ثانية إذا استبدلنا كثافة التيار بقيمتها في العلاقة $I=J.S$ لوجدنا



الشكل (2) : مقاومة ناقل بدلالة أبعاده ومقاومته النوعية

$$I= \sigma.E.S$$

لكن $E=V/l$ لأن الحقل الكهربائي منتظم خلال السلك، إذاً يمكن كتابة العلاقة السابقة على النحو التالي:

$$I= \sigma\ s\ V/\ \ell$$

علاقة المقاومة النوعية بدرجة الحرارة:

تعتمد مقاومة المواد المختلفة على درجة الحرارة بشكل كبير، عندما تزداد درجة حرارة المعادن، تكتسب الكترونات الناقلية طاقة حركية زائدة، فتزداد اصطدامها بالشبكة البلورية مما يعيق حركتها، وتنخفض بالتالي ناقليتها الكهربائية، أو يمكننا القول إن المقاومة النوعية للمعادن تزداد بزيادة درجة حرارته، ففي الدرجات المتوسطة ($0-200\ ^0C$) تعطى المقاومة النوعية وفق العلاقة التالية:

$$P= \rho_0(1+ \alpha t)$$

حيث $\alpha=1/273$ عامل المقاومة الحراري و ρ_0 المقاومة النوعية عند درجة الصفر المئوي.

علاقة المقاومة النوعية بتركيز الشوائب:

في المعادن الخالية من الشوائب تتحرك الكترونات الناقلية بحرية كبيرة بسبب ضعف ارتباطها بالنوى الموجبة الشحنة، وعند وجود شوائب غريبة في المعدن، يختل النظام المتناسق للشبكة البلورية، مما يعيق حركة الالكترونات، وبالتالي تنخفض ناقلية المعدن، بكلام آخر، تزداد المقاومة للمعادن بزيادة تركيز الشوائب فيه.

في نصف الناقل من النوع n، حيث الغالبية العظمى من حاملات الشحنة هي الكترونات، ويمكننا كتابة المقاومة النوعية على النحو التالي:

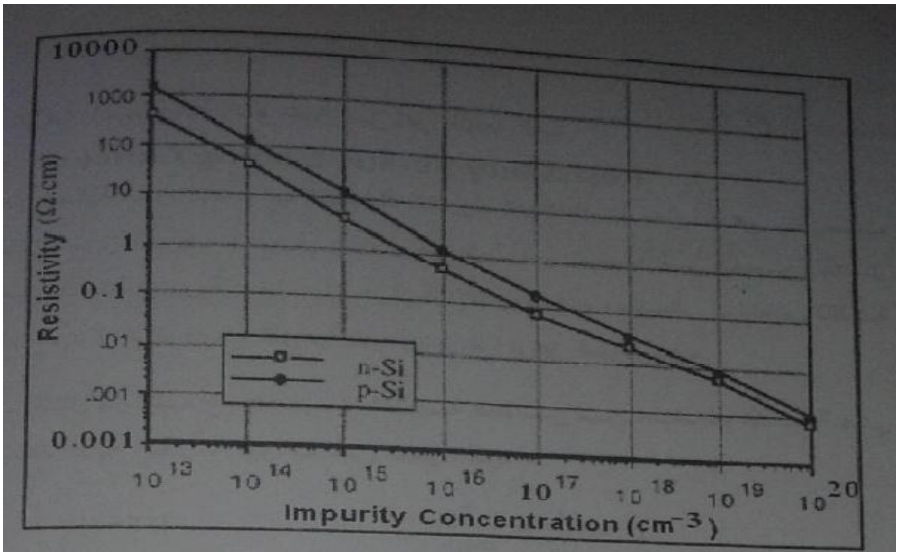
$$\rho=1/\ qn\mu_n$$

أما في نصف الناقل من النوع p فتعطى المقاومة النوعية كما يأتي:

$$\rho=1/\ qp\mu_p$$

وعلى اعتبار أن $N_d \approx n$ في نصف الناقل من النوع n و $N_p \approx p$ في نصف الناقل من النوع p ، لذلك يصبح من الواضح أن المقاومة النوعية تتناسب عكساً مع تركيز الشوائب في نصف الناقل.

يوضح المخطط البياني المقاومة النوعية لنصف الناقل مشاب النوع n وآخر من النوع p بتابعية تركيز الشوائب Nd و Na على التوالي وذلك عند درجة حرارة الغرفة.



الشكل (3): المقاومة النوعية لنصف ناقل بدلالة تركيز الشوائب عند درجة حرارة الغرفة، من الواضح أن المقاومة النوعية لنصف الناقل تتغير بشكل كبير عند تعديل تركيز الشوائب فيه

كثافة تيار الانتشار(Diffusion Current Density)[5]:

الانتشار هو عملية تدفق الجسيمات من منطقة ذات تركيز عالٍ الى منطقة ذات تركيز منخفض، وإذا كانت الجسيمات مشحونة قلنا ان لدينا تيار انتشار، لحساب الانتشار علينا أن نحسب تدفق الالكترونات المحصل في واحدة المساحة خلال واحدة الزمن، وهو يتناسب طرداً مع تركيز الالكترونات وسرعتها.

توليد حاملات الشحنة وإعادة الإتحاد (حالة التوازن):

في حالة التوازن، عند وجود مصف الناقل في معزل عن التأثيرات الخارجية، يكون تركيز الالكترونات والثقوب مستقل عن الزمن، لكن هذا الأمر لا يمنع من انتقال الالكترونات عشوائياً، وباستمرار من

[5] الدين، ص. ا. ن. (2011-2012م). "الفيزياء الالكترونية." 214.

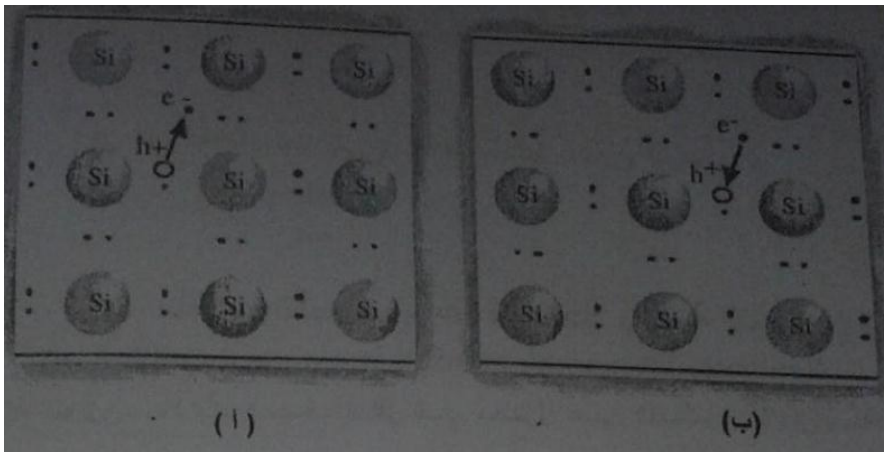
قطاع التكافؤ الى قطاع الناقلية بفعل الحركة الحرارية، وأثناء حركة الالكترون خلال الشبكة البلورية، قد يصادف رابطة مكسورة فيعيد بنائها(يقابل فراغاً في قطاع التكافؤ فيملأه) ، تدعى هذه العملية إعادة الإتحاد وفيها يفني زوج من الالكترونات والثقوب بعضهما البعض.

إن التركيز المحصل لحاملات الشحنة في حالة التوازن مستقل عن الزمن، كما ذكرنا، لذلك يكون معدل توليد الحاملات، ومعدل العودة للاتحاد متساويين، يمكننا التعبير عن هذه الحالة بالعلاقة الآتية:

$$G_{no}=G_{po}= R_{no}=R_{po}$$

حيث G_{po} و G_{no} معدل توليد الثقوب والالكترونات التوازنية على التسلسل.

R_{po} و R_{no} معدل إعادة الثقوب والالكترونات التوازنية على التسلسل.



الشكل (4): توليد (أ) وإعادة اتحاد (ب) الكترون e^- ثقب h^+

توليد وإعادة اتحاد الحاملات الزائدة (حالة عدم التوازن):

في نصف ناقل موضوع في وسط حراري معين، تتوالد أزواج الكترونات وثقوب بشكل دائم، وكذلك يمكن لهذه الأزواج، أن تختفي بسبب ارتباط الالكترونات والثقوب من جديد، وحيث أن الأمر هكذا يمكن القول أن الالكترون يبقى حراً مدة قدرها t_n وكذلك الفراغ يبقى فارغاً فترة زمنية قدرها.

نطلق اسم الحاملات الزائدة على مجموعة حاملات الشحنة المتوالدة إضافة الى الحاملات المتكونة في حالة التوازن الحراري، يحصل خروج عن التوازن الحراري، مثلاً، في حال زيادة في درجة حرارة نصف الناقل، أو عندما ترد حزمة أشعة ذات طاقة كافية عليه، عند ذلك تتوالد الالكترونات في قطاع الناقلية،

وثقوب في قطاع التكافؤ إضافة لتلك الموجودة في حالة عدم التوازن، وبالتالي يمكننا كتابة التركيز الجديد للالكترونات والثقوب وفق العلاقتين الآتيتين:

$$n=n_0+\Delta n$$

$$p=p_0+\Delta p$$

حيث n_n و p_0 تركيزا الالكترونات والثقوب في حالة التوازن و Δn و Δp تركيزا الالكترونات والثقوب الزائدة، من الواضح أن في حالة عدم التوازن يكون :

$$n.p\neq n_0p_0=n_i^2$$

إن التغير في تركيز الالكترونات والثقوب في حالة عدم التوازن، كما هو الحال في حالة التوازن، لن يستمر باتجاه واحد، وإنما تحصل إعادة اتحاد بين قطاعي الناقلية والتكافؤ.

يعطى معدل العودة لإتحاد حاملات الشحنة الأقلية الزائدة في حالة نصف ناقل من النوع p وفق العلاقة:

$$R_n=\Delta n/t_n$$

وفي حالة نصف ناقل من النوع n:

$$R_p=\Delta p/t_p$$

حيث t_n و t_p عمر الالكترونات والثقوب على التوالي.

الباب الثالث: المتصل الثنائي:

صناعة المتصل الثنائي[6](The pn Junction Diode):

المتصل الثنائي هو التحام نصف ناقل من نوعين مختلفين n و p ، ولكن صناعة المتصل الثنائي، لن تتم بالتأكيد كما يشير الاسم بإجراء التحام مباشر بين قطعة من النوع p وقطعة من النوع n ، لأن مثل هذا الإجراء لن يسمح باستمرارية الشبكة البلورية، والحفاظ على الاتجاهات البلورية عند سطح التماس.

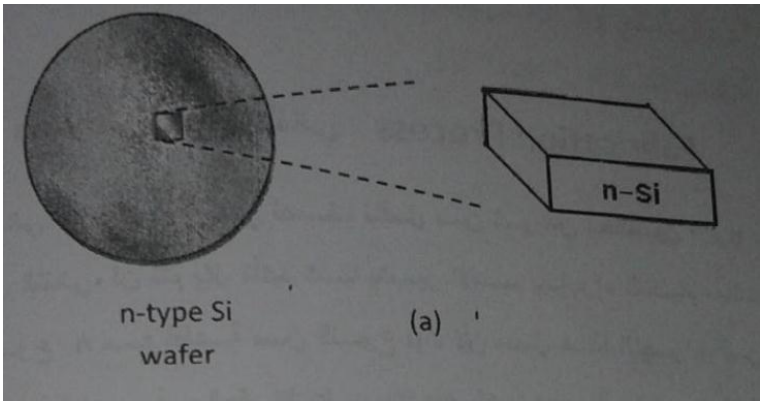
والحقيقة أن انجاز الوصلة بين نوعين مختلفين من أنصاف النواقل، يتم في الغالب خلال تقنية تسمى التكنولوجيا السطحية، وهي الطريقة المستخدمة منذ أكثر من ثلاثة عقود في صناعة الدارات التكاملية.

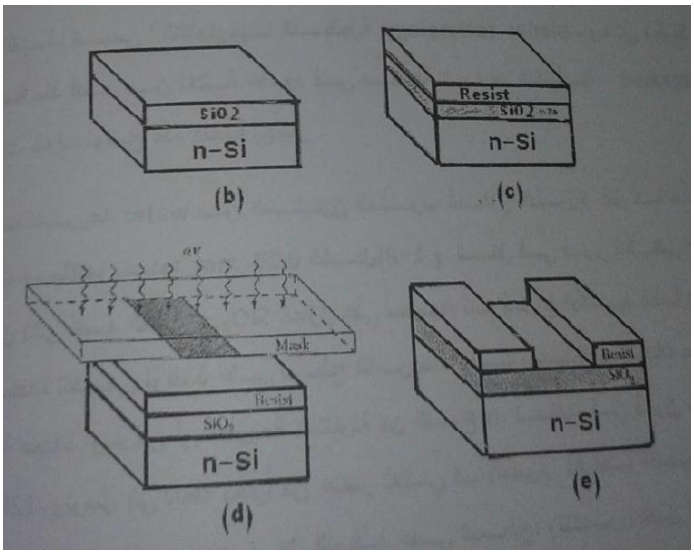
تؤخذ شريحة wafer من السيليكون المشوب أحادي البلورة قطرها حوالي 10 cm وسماكتها بحدود 0.25 mm تدخل في فرن لتشكيل طبقة رقيقة من ثاني أكسيد السيليكون SiO_2 العازل على سطحها، ثم يزاح الأكسيد العازل من مناطق محددة لتشكيل نوافذ على سطح الشريحة، وذلك باستخدام تقنيات ضوئية وكيميائية محددة.

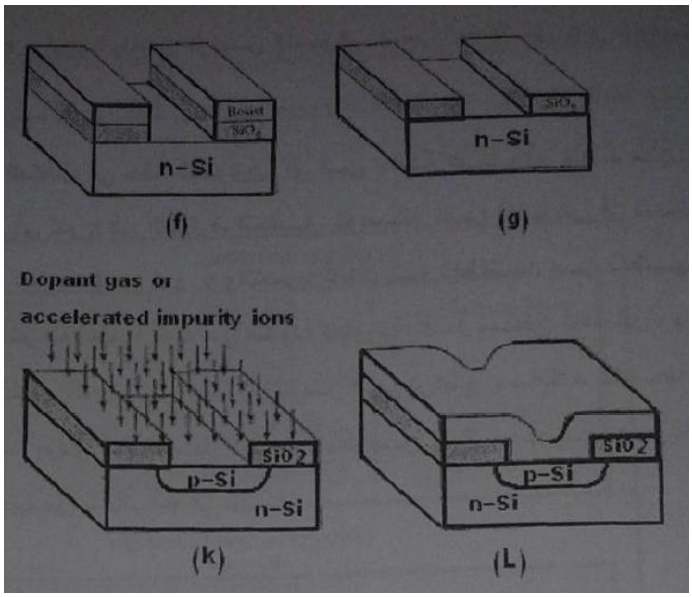
وبفرض أن الشريحة المتناولة من النوع n ، ندخلها في فرن حرارته $1200\ C^0$، ونرسل الى داخله بخاراً من عنصر ثلاثي كالألمنيوم Al لفترة محددة من الزمن، فتدخل ذرات الألمنيوم من خلال النوافذ على السطح، وتنتشر داخل الشريحة لتشكيل طبقة رقيقة من النوع p ، سماكتها بضعة مكرونات، يؤكسد سطح الشريحة ثانية ثم تفتح نوافذ في طبقة الأكسيد ، لتحقيق تماس معدني بالطبقة p ، ويجرى أيضاً تماس معدني مع الطبقة n من الجهة الأخرى.

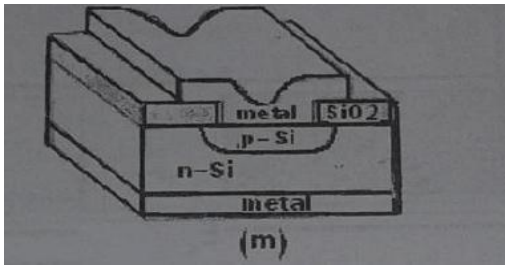
بهذه الطريقة يتم صناعة أكثر من 1000 وصلة على شريحة واحدة، تقطع الشريحة الى أجزاء صغيرة، يتضمن كل جزء متصل ثنائي، وتستخدم عادة خيوط رفيعة من الألمنيوم أو الذهب لتحقيق تماس مع الوسط الخارجي. ونوضح من خلال الصور مراحل صناعة المتصل الثنائي.

[6] الدين، ص. ا. ن. (2011-2012م). "الفيزياء الالكترونية". 232.


n-Si
n-type Si
wafer
(a)


SiO2
n-Si
(b)
Resist
SiO2
n-Si
(c)
Mask
Resist
SiO2
n-Si
(d)
Resist
SiO2
n-Si
(e)


Resist
SiO2
n-Si
(f)
SiO2
n-Si
(g)
Dopant gas or
accelerated impurity ions
SiO2
p-Si
n-Si
(k)
SiO2
p-Si
n-Si
(L)



الشكل (5): مراحل تصنيع المتصل الثنائي

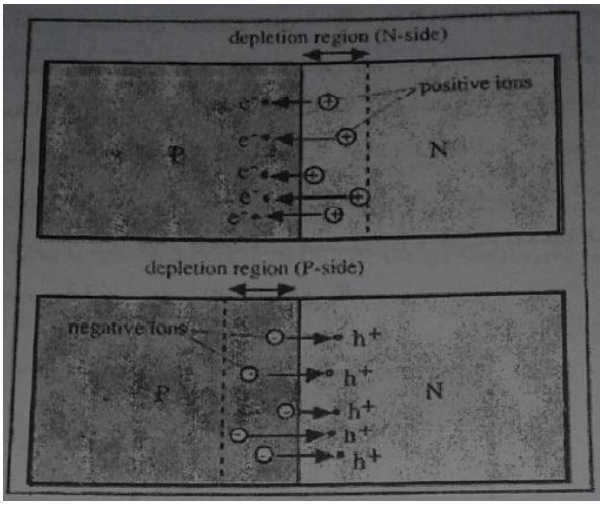
المتصل الثنائي في حالة التوازن (كمون التماس):

سندرس فيما يلي متصلاً ثنائياً مشوباً بشكل منتظم في كلا الجانبين n و p أي أن N_d ثابتة في كل نقاط الجانب n و N_a ثابتة في كل نقاط الجانب p ، تسمى الوصلة من هذا القبيل وصلة حادة، أو وصلة خطوية، وفيها يتغير تركيز الشوائب بين المنطقتين n و p بشكل حاد.

سنفترض أن المتصل في حالة التوازن، أي في حالة غياب أي جهد مطبق، أو أي حقل كهربائي، أو أي تدرج في الحرارة، لتحقيق الوصلة هذه نفترض أن لدينا قطعتي نصف ناقل من نوعين مختلفين n و p ولنتصور أننا قربنا القطعتين من بعضهما بحيث يحصل تلامس مباشر، واستمرار متناسق للشبكة البلورية عند سطح التماس، وفي كلا الجانبين.

إن الفرق الكبير في تركيز حاملات الشحنة الأكثرية بين الجانبين، سوف يؤدي لانتشار الالكترونات من الجانب n الى p ، وعلى نحو مشابه انتشار الثقوب من الجانب p الى n .

وبينما تغادر حاملات الشحنة الأكثرية (الالكترونات) الجانب n ، سوف تترك وراءها الأيونات المانحة غير المعوضة N_d^+ قرب الوصلة، وفي المقابل سوف تترك الثقوب وراءها قرب الوصلة في الجانب p أيونات الآخذة غير المعوضة N_a^- ، وبالتالي يتشكل حقل كهربائي E_0 عند سطح التماس، يتجه من الأيونات المانحة الموجبة في الجانب n من الوصلة الأيونات الآخذة السالبة في الجانب الآخر.



الشكل (6): قطعنا نصف ناقل من النوع n و p بعد الالتحام وتشكل منطقة النضوب على طرفي الوصلة

عند الوصول الى حالة التوازن تتوقف حاملات الشحنة الأكثرية عن الانتشار من طرق لآخر بسبب نشوء الحقل E_0 ، الذي من جهة ثانية، يسهل مرور حاملات الشحنة الأقلية (الناتجة عن ذرات السيليكون) من طرف الى آخر، في هذه المرحلة يتساوى تيارا الانتشار والجر، ويصب التيار الإجمالي معدوماً.

بما أن الحقل الكهربائي مشتق من كمون سلمي أي $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\, V$ نستنتج أن وجود الشحنات الموجبة الثبتة في منطقة التماس من جهة n ووجود الشحنات السالبة الثابتة من جهةp يؤدي لتوليد فرق في الكمون بين طرفي الوصلة وتشكل حاجز الكمون (أو كمون التماس)، الجدير بالذكر أن كمون التماس V_b هو مقدار توازني داخلي، أي أنه لا يقود الى تيار محصل، فهو لا يسمح لحاملات الشحنة الأكثرية بالعبور بينما يسمح لحاملات الشحنة الأقلية بعبور الحاجز.

من جهة أخرى، بسبب فرق الكمون بين النقطتين n و p يتغير منحى قطاعات الطاقة بحيث يصبح قطاعا الناقلية والتكافؤ في الجانب p أعلى من نظيريهما في الجانب n بمقدار qV_b أما سوية فرمي فتحافظ على وضعها في الجانبين طالما أن الوصلة في حالة توازن، لذلك فإن انخفاض قطاعات الطاقة في الجانب n عن الوضع السابق قبل تشكيل الوصلة يبقى في الحد الذي لا يسمح لسوية فرمي أن تدخل قطاع الناقلية في الجانب n أو قطاع التكافؤ في الجانب p بل يبقى خط سوية فرمي مجاوراً لكل من E_v و E_c .

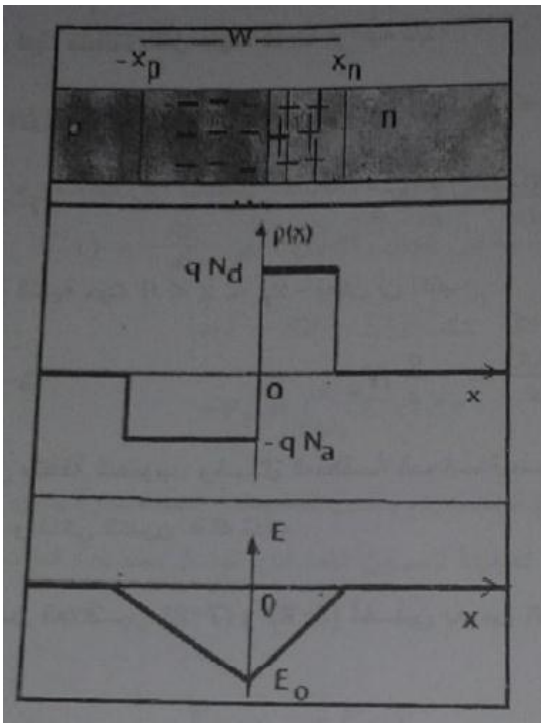
عرض منطقة النضوب(**Width of Depletion Region**):

سوف نفترض أن منطقة النضوب (أو ما يسمى منطقة الشحنة الفراغية) تحتوي على أيونات الشائبة المانحة في الطرق n وأيونات الآخذة في الطرف p فقط، أي بإهمال وجود أو عبور حاملات الشحنة في تلك المنطقة، وبالتالي سيكون الانتقال في تركيز الأيونات الشائبة على طرفي هذه المنطقة حاداً.

ليكن x_n عرض منطقة النضوب في الجانب n و x_p عرض منطقة النضوب في الجانب p عندئذٍ يمكننا أن نكتب:

$$W=x_n+x_p$$

حيث W العرض الكلي لمنطقة النضوب.



الشكل (7): الحقل الكهربائي وتركيز الأيونات الشائبة في المتصل الثنائي في حالة التوازن

كخطوة أولى، نحسب الحقل الكهربائي E(x) في منطقة النضوب باستخدام قانون غوص

$$\frac{dE(x)}{dx}=\frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$=q/\varepsilon(p-n+N_d^+-N_a^-)$$

وباعتبار أن المنطقة مجردة من الالكترونات والثقوب، والتأين كامل كما افترضنا، لذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة على النحو التالي:

$$\frac{dE(x)}{dx}= q/ \varepsilon(N_d-N_a)$$

وهكذا تكون لدينا منطقتان لكل منهما شحنة فراغية ثابتة:

في المنطقة الأولى حيث $0<x<x_n$ يمكن *أن نكتب:*

$$\frac{dE(x)}{dx}=q/ \varepsilon.N_d$$

وفي المنطقة الثانية حيث $-x_p<x<0$ يمكن أن نكتب:

$$\frac{dE(x)}{dx}=- q/ \varepsilon.N_a$$

أما عند طرفي منطقة النضوب وخلال المنطقة المحايدة من الطرفين فإن الحقل الكهربائي معدوم، وبالتالي الكمون هناك ثابت.

بمكاملة العلاقتين السابقتين آخذين بعين الاعتبار الشروط الحدية السابقة نجد:

$0 \leq x\leq x_n$ لما $E= q/ \varepsilon.N_dx+E_0$

$-x_p\leq x\leq 0$ لما $E=- q/ \varepsilon.N_ax+E_0$

يتضح من العلاقتين السابقتين، أن الحقل الكهربائي، يتغير خطياً مع المسافة، بحيث أن ميل المستقيم الأول موجب(الحقل متزايد) وميل الثاني سالباً (الحقل متناقص مع المسافة). يمكن الحصول على القيمة العظمى للحقل E_0 من إحدى العلاقتين السابقتين مع ملاحظة أن $E=0$ لما $x=x_n$ في العلاقة الأولى، و$x=-x_p$ في العلاقة الثانية.

$$E_0= -qN_d/ \varepsilon. X_n$$

$$E_0= -qN_a/ \varepsilon. X_p$$

من الواضح أن القيمة العظمى للحقل الكهربائي سالبة.

بعد حساب الحقل الكهربائي بدلالة المسافة يمكننا الآن حساب كمون التماس V_b انطلاقاً من العلاقة الأساسية بين الحقل والكمون، أي $E(x)=-\frac{dV}{dx}$

بمكاملة الطرفين في العلاقة $-dV=E(x).dx$ نجد:

$$-V_b=\int_{-xp}^{xn} E(x)dx$$

وباعتبار أن التكامل الحدود، يمثل المساحة المحصورة بين الخط البياني والمحور x لذلك فإن القيمة المطلقة لكمون التماس، تمثل مساحة المثلث المبين في الشكل السابق، أي أن:

$$V_b=-1/2\ .\ E_0.\ W$$

بتعويض E_0 بقيمتها في العلاقة السابقة نجد:

$$V_b=\frac{q\ Nd}{2\varepsilon}\ xn.W$$

$$V_b=\frac{q\ Na}{2\varepsilon}\ xp.W$$

وبمساواة قيمتي E_0 في العلاقتين:

$$-\frac{qNd}{\varepsilon}xn=-\frac{qNa}{\varepsilon}xp$$

وبالتالي:

$$N_dx_n=N_ax_p$$

تشير هذه العلاقة، من جهة الى أن عرض منطقة النضوب في كل جانب يتناسب عكساً مع تركيز الشوائب فيها (الأعلى تركيزاً تكون أضيق) وتعبر من جهة ثانية عن حيادية الشحنة، أي أن الشحنة الموجبة الكلية في منطقة النضوب من الجانب n، تساوي بالقيمة المطلقة الشحنة السالبة الكلية في منطقة النضوب من الجانب P .

الآن لإيجاد W نحل المعادلتين الآتيتين:

$$W=x_n+x_p$$

$$N_d x_n=N_a x_p$$

بالنسبة لـ x_p و x_n

فنجد:

$$X_p=\frac{Nd\,W}{Na+Nd}$$

$$X_n=\frac{Na\,W}{Na+Nd}$$

وبالتعويض بعلاقة V_b السابقة، نجد:

$$V_b=\frac{W^2 N_d N_a q}{2\varepsilon(N_d+N_a)}$$

وبالتالي:

$$W=\sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q}\cdot\frac{N_d+N_a}{N_d.N_a}}$$

وهو العرض الكامل لمنطقة النضوب، وللحصول على عرض منطقة النضوب في كل جانب نعوض W بقيم كل متها في العلاقتين x_p و x_n السابقتين:

$$x_n=\frac{N_a W}{N_d+N_a}=\sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q}\cdot\frac{N_a}{(N_d+N_a)N_d}}$$

$$x_p=\frac{N_d W}{N_d+N_a}=\sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q}\cdot\frac{N_d}{(N_d+N_a)N_a}}$$

ملاحظة:

عند تطبيق جهد خارجي V_a على المتصل، علينا استبدال كمون التماس V_b بالكمون الكلي لنصف الناقل (أي $V_b - V_a$) ، وبالتالي يعطى الحقل الأعظمي في هذه الحالة وفق العلاقة:

$$E_0 = -\frac{2(V_b - V_a)}{W}$$

أما عرض منطقة النضوب فيصبح:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{N_a + N_d}{N_d N_a} (V_b - V_a)}$$

الباب الرابع: التجربة العملية:

بعد القيام بالدراسة النظرية لحساب عرض منطقة العبور، قمنا بتجربة عملية على متصل ثنائي لحساب منطقة العبور فيه، وذلك بتطبيق العلاقة الآتية:

$$I = I_s \left(e^{\frac{eW}{KT}} - 1\right)$$

حيث e العدد النبري ،e القيمة المطلقة لشحنة الالكترون، W عرض منطقة العبور ، I_s تيار الإشباع، K ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة، وبعد أن نضرب تيار الإشباع بالعدد 1 تهمل قيمة الناتج بسبب صغره ، فتصبح المعادلة:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{eW}{KT}}$$

نأخذ ln الطرفين:

$$\ln I = \ln I_s + \frac{eW}{KT}$$

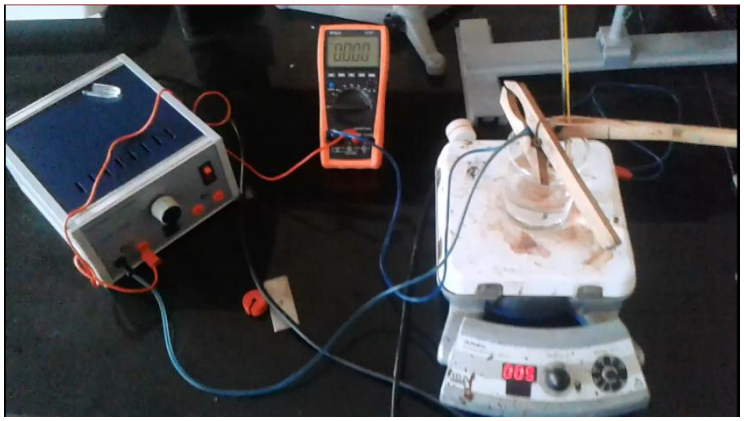
وتكون التجربة كالتالي:

معدات التجربة:

1- مقياس أمبير
2- أسلاك توصيل
3- ميزان حرارة
4- مولد كهربائي
5- سخان كهربائي
6- متصل ثنائي
7- وعاء زجاجي

خطوات التجربة:

نقوم بوصل المتصل الثنائي مع أسلاك التوصيل بحيث يكون جزء المتصل الثنائي n متصلاً بالقطب السالب، وجزء المتصل الثنائي من النوع p متصلاً بالقطب الموجب للمولد، ونوصل مقياس أمبير بالدارة، ثم نملأ الوعاء الزجاجي بماء مقطر، ونضعه على السخان ونضع ميزان حرارة في الماء، ونضع المتصل الثنائي بعد الوصل في الماء، ونشغل السخان ونطبق فرق كمون قدره 3V ، فنلاحظ مرور تيار



الشكل(8): التجربة العملية

كهربائي، ونسجل قيم ذلك التيار، ونلاحظ تغيرات شدة التيار بتغير درجة الحرارة التي تظهر واضحة على ميزان الحرارة.

(A)I	5.2	4.8	4.5	4	3.85	3.8	3.76	3.7
(K)T	292	293	295	297	300	302	305	310

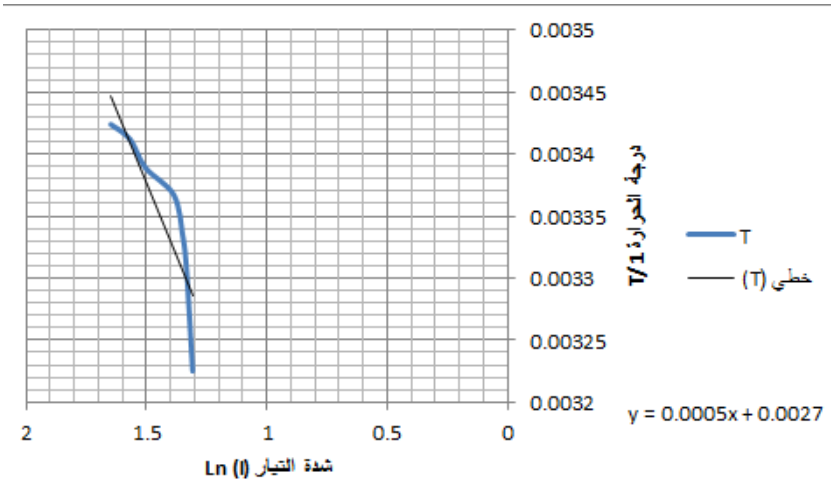
الجدول (2): قيم التجربة العملية من درجة الحرارة وشدة التيار

وبعد أخذ قيم اللوغاريتم لشدة التيار، وأخذ قيم $\frac{1}{T}$ لكل قيمة من درجة الحرارة تظهر لنا النتائج التالية:

Ln(I)	1.648	1.568	1.504	1.386	1.348	1.335	1.324	1.308
$\frac{1}{T}$	0.003424	0.003412	0.003389	0.00367	0.003333	0.003311	0.003278	0.003225

الجدول (3): تنظيم القيم الى لوغارتمات شدة التيار ومقاليب درجة الحرارة

وبرسم خط بياني للقيم التي ظهرت معنا نجد الرسم التالي



الشكل (9): الخط البياني بدلالة لوغاريتم شدة التيار ومقلوب درجة الحرارة

فنجد من الرسم أن ميل المستقيم الذي ظهر معنا يساوي 0.0005

وهو يساوي بحسب المعادلة

$$\ln I = \ln I_s + \frac{eW}{KT}$$

ومنه :

$$\frac{eW}{K}=0.0005$$

ونحسب W بعد تعويض ثابت بولتزمان والقيمة المطلقة لشحنة الالكترون:

$$0.0005=\frac{10^{-19}.1.6.W}{1.38.10^{-23}}$$

$$W=0.04312\ \mu m$$

الخاتمة

ختاماً، سنؤكد على أن البداية الصحيحة هي التي تصنع الفارق بين البحث المتناسق والبحث غير المتناسق، والقاعدة المتينة يمكن النهوض منها، وكانت دراستنا هذه هي قاعدة متينة لكل من يفكر أن يدرس علم أنصاف النواقل ونيته التطوير، فقد انطلقنا من الأساسيات، وصعدنا شيئاً فشيئاً، وكان لنا أن نصل الى نتيجة ترضي العقل وتنهض بالعلم، فعلم أنصاف النواقل صنع نهضة وقفزة كبيرة باتجاه التطوير الذي نتحدث عنه وهو علم نامٍ مع الأيام، فبعد دراسة نظرية وعملية كان لنا ما أردنا من بحثنا، ووصلنا بكل الطرق للإجابة عن الأسئلة التي تواردت الى أذهاننا حول ماهية بحثنا والغرض منه، وهذا كان الهدف الرئيس مما بدأنا.

التوصيات والمقترحات

1- أن نسعى لتطوير علم أنصاف النواقل نظرياً
2- أن نطبق عملياً التجارب التي من شأنها النهوض بعلم أنصاف النواقل
3- جعل الفكر الإبداعي منطلقاً لكل خطوة نخطوها
4- الوقوف الى جانب أي فكرة تدعم المشروع وتستكمل بنائه

المراجع

المراجع الورقية:

الفيزياء الالكترونية- الدكتور صلاح نور الدين(جامعة تشرين)-2011-2012م

كتاب الفيزياء العام للصف الثالث الثانوي - 2012-2013م

المراجع الالكترونية:

http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_1.html

المصطلحات

عربي	انكليزي
تيار الجر	Drift Current
تيار الانتشار	Diffusion Current
الناقلية	Conductivity
الناقلية النوعية	Resistivity
كثافة تيار الانتشار	Diffusion Current Density
المتصل الثنائي	The pn Junction Diode

فهرس الأشكال

الشكل	الصفحة
الشكل (1): الحركة العشوائية لالكترون	7
الشكل (2): مقاومة ناقل بدلالة أبعاده ومقاومته النوعية	9
الشكل (3): المقاومة النوعية لنصف ناقل بدلالة تركيز الشوائب عند درجة حرارة الغرفة	11
الشكل (4): توليد (أ) وإعادة اتحاد (ب) الكترون e^- ثقب h^+	12
الشكل(5): مراحل تصنيع المتصل الثنائي	15,16
الشكل (6): قطعنا نصف ناقل من النوع n و p بعد الالتحام وتشكل منطقة النضوب على طرفي الوصلة	17
الشكل (7): الحقل الكهربائي وتركيز الأيونات الشائبة في المتصل الثنائي في حالة التوازن	18
الشكل (8): التجربة العملية	23
الشكل(9): الخط البياني بدلالة لوغاريتم شدة التيار ومقلوب درجة الحرارة	24

.

فهرس الجداول

الجدول	الصفحة
الجدول (1): تصنيف المواد ومقاومتها النوعية	4
الجدول (2): قيم التجربة العملية من درجة الحرارة وشدة التيار	24
الجدول (3): تنظيم القيم الى لوغارتمات شدة التيار ومقاليب درجة الحرارة	24