الأكاديمية العربية الدولية

الأكاديمية العربية الدولية

المقررات الجامعية

www.aiacademy.info | care@aiacademy.info

جامعة سومر
UNIVERSITY OF SUMER
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

محاضرات في

الالكترونيات التماثلية

م.م. فؤاد نمر عجيل

جامعة سومر – كلية التربية الأساسية

2016 - 2015

جمهورية العراق – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سومر– كلية التربية الاساسية – قسم العلوم الطبيعية – فرع الفيزياء

محاضرات في الالكترونيات

Lectures in Electronics

المحاضرة الاولى :

الانبعاث الايوني الحراري & الصمامات المفرغة

Thermionic Emission & Vacuum Tubes

مدرس المادة : م.م. فؤاد نمر عجيل

المحتويات:

1. مقدمة في علم الالكترونيات Introduction to Electronics
2. الالكترونيات Electronics
3. الانبعاث الأيوني الحراري Thermionic Emission
4. الباعث الايوني الحراري Thermionic Emitter
5. الصمامات المفرغة Vacuum Tubes

1- مقدمة في علم الإلكترونيات

علم الإلكترونيات هو العلم والتقنية المختصان بدراسة انتقال الدقائق المشحونة في مادة شبه موصلة أو الغازات أو الفراغ . إن التقدم المذهل الذي تشهده البشرية اليوم في جميع المجالات التقنية والمعرفية لم يكن ليتحقق لولا ظهور علم الإلكترونيات في مطلع القرن العشرين حيث ان التقدم الهائل في التكنولوجيات والذي يشهده عصرنا والتطورات السريعة كماً ونوعاً المتوقعة خلال الفترة القادمة في جميع مجالات الحياة أصبحت مرتبطة بشكل وثيق بتقدم علم الإلكترونيات -وعلى سبيل المثال نجح فريق من العلماء الأمريكيين من "معامل بيل" في تطوير أصغر ترانزيستور في العالم يسمح تصميمه الجديد بالاستمرار في تصغير شرائح السيلكون وقد يتمكنون من مضاعفة سرعة العمليات لبعض الشرائح.

ويبلغ مقاس الترانزيستور الجديد 50 نانومتر ، أي ما يقل بألفي مرة عن سمك شعرة واحدة في رأس الإنسان. ويعرف القزم الجديد في عالم الإلكترونيات باسم الترانزيستور الرأسي لأن جميع مكوناته بنيت بدقة بعضها فوق بعض . أن الترانزيستور التقليدي اكتشفه ثلاثة علماء من نفس المعمل عام 1947 .

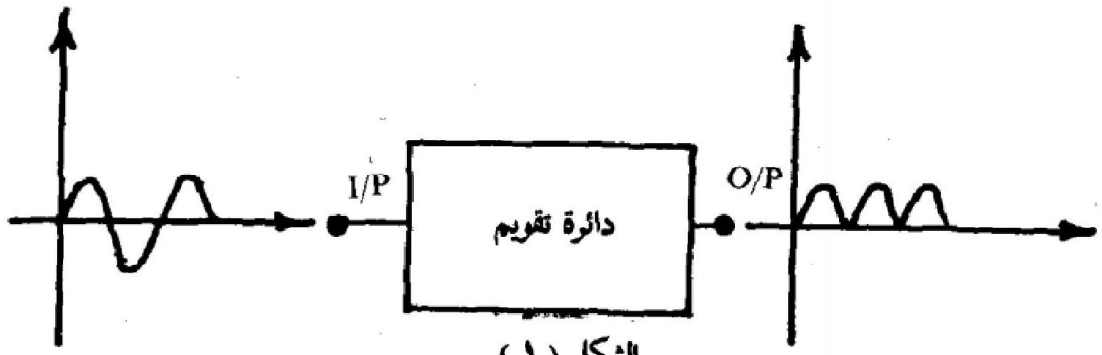
بني أول حاسب إلكتروني في العالم 1940 وبلغ وزنه 27 طناً وضم في جوفه عشرات الآلاف من الصمامات المفرغة وعدة كيلومترات من أسلاك النحاس وبلغت تكاليفه ملايين الدولارات بعد ذلك وباستخدام أنصاف النواقل(أشباه الموصلات) تم اختراع الترانزستور الأمر الذي أدى إلى ثورة في علم الإلكترونيات وتوالت الاختراعات فتم صنع أنواع مختلفة من الترانزستورات ثم ظهرت ثورة جديدة في علم الإلكترونيات وهي الدوائر المتكاملة حيث استطاع مجموعة من العلماء بترتيب مجموعة من العناصر الإلكترونية على شريحة صغيرة من أشباه الموصلات وفي عام 1961م تنبأ أحد العاملين في مجال تطوير الدوائر المتكاملة وهو المهندس(مور) مؤسس شركة إنتل التي تعتبر من أكبر شركات إنتاج الدوائر المتكاملة بأن عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة سيتضاعف كل ثمانية عشر شهرا. ولقد صدقت توقعاته إلى حد كبير حيث تضاعف عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة من عشرة ترانزستورات في بداية الستينات إلى ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور مع نهاية القرن العشرين وكانت هذه بداية التطور الهائل الذي نراه اليوم في كل الأجهزة الإلكترونية الأمر الذي أدى إلى إنتاج صناعات ضخمة جداً ، وتتوالى الاختراعات في علم الإلكترونيات وما زال علم الإلكترونيات يفاجئ العالم كل يوم بخبر هائل جديد.

2- الالكترونيات Electronic

يعني علم الالكترونيات بدراسة سريان الالكترونات في الاجهزة المفرغة وأجهزة انصاف الموصلات وتكمن أهمية الالكترونيات في مقدرة الاجهزة الالكترونية على القيام بالوظائف الاتية :

ا- التقويـــــم : rectification :

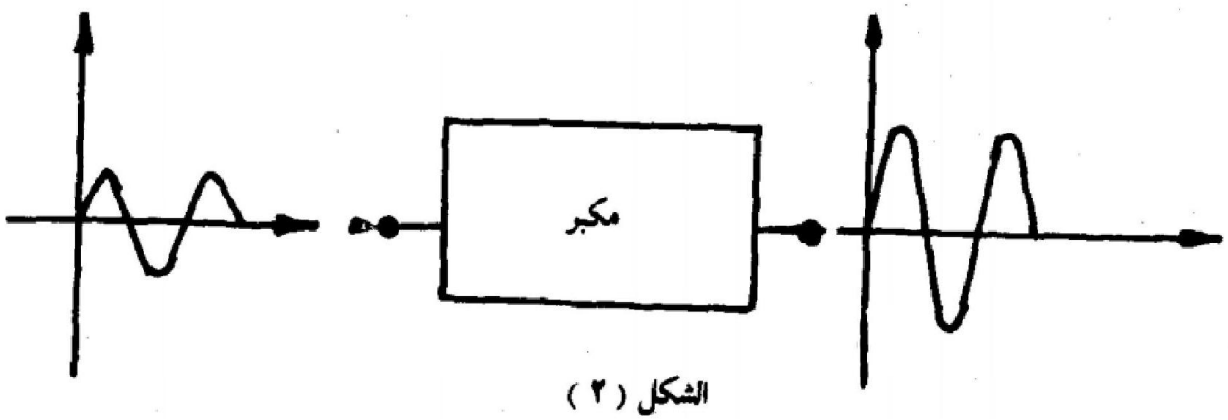
يعرف التقويم بأنه عملية تحويل التيار المتناوب (a - c) alterenating current الى تيار مستمر (d - c) direct current . وتسمى الدوائر الالكترونية التي تقوم بتحويل القدرة المتناوبة الى قدرة مستمرة وبكفاءة عالية – انظر الشكل (1) – بدوائـــر التقويـــــم .



الشكل (١)

ب- التكبيـــــر amplification :

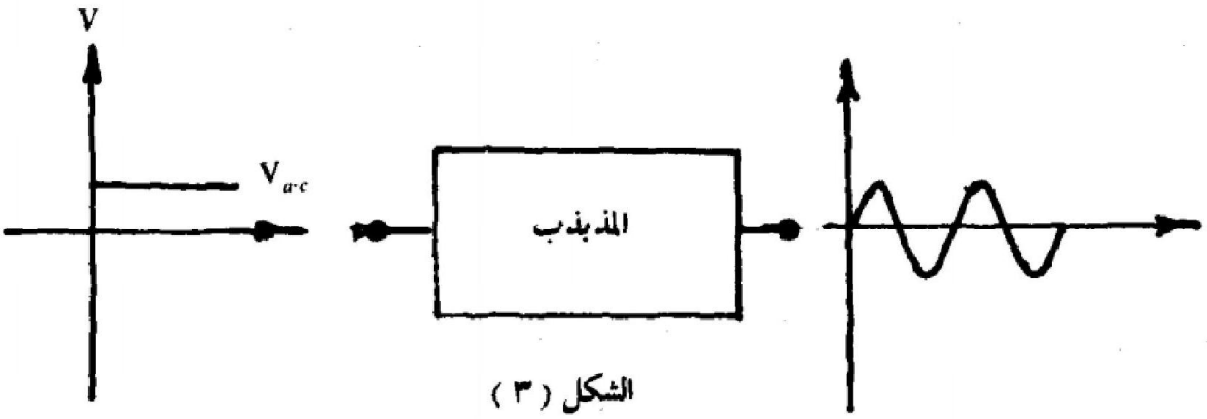
تعرف عملية التكبير بانها عملية تقوية الاشارات الكهربائية الضعيفة ، وتدعى الدوائر الالكترونية التي تقوم بعملية التكبير بالمكبرات amplifiers – انظر الشكل (2)



الشكل (٢)

حـ– التوليـــد generation :

تعرف عملية التوليد بأنها عملية تحويل القدرة المستمرة الى قدرة متناوبة وبأي تردد ، وتدعى الدوائر او الاجهزة الالكترونية التي تقوم بعملية توليد الاشارات – انظر الشكل (3) بالمذبذبات oscillators



الشكل (٣)

د– السيطـــرة control :

تستخدم الاجهزة الالكترونية بوفرة في القيام بعملية السيطـــرة الذاتيـــة automatic control على عمل كثير من الاجهزة ، فالسيطرة الذاتية على عمل غسالة ، تحريكها او ايقافها لفترة معينة او لطول الوقت وكذلك تنظيم درجة الحرارة في الثلاجة مثلا او في غيرها من الاجهزة لم يكن ليتم الا من خلال الأجهزة الالكترونية .

هـ– تحويـل الطاقـة الضوئيـة الى طاقـة كهربائيـــة :

تدعى عمليـة تحويـل الضـوء الى تيـار كهربائـي بالظاهـــرة الكهروضوئيـــة photoelectric effect ، انظر الفصل القادم . ونجد لهذه الظاهرة تطبيقـات كثيرة في اجهزة تحويل الطاقة الشمسية والحاسبات الالكترونية واجهزة التسجيل الصوتية والصور المتحركة .. الخ .

و– تحويـل الطاقـة الكهربائيـة الى طاقـة ضوئيـة :

تستطيع الاجهزة الالكترونية تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ضوئية ذات قيمة عالية كما هو الحال في التلفزيون والرادار .. الخ .

3- الانبعات الايوني الحراري للالكترونات Theremoiomc Emission

كان معروفا منذ زمن طويل بأن وجود جسم حار جداً يزيد من قابلية التوصيل الكهربائي للهواء الحار المجاور. وفي نهاية القرن التاسع عشر اكتشف بأن سبب هذه الظاهرة هو انبعاث الالكترونات من هذا الجسم الحار. ان ظاهرة الانبعاث الحراري للالكترونات هي أساس عمل أجهزة كثيرة كالصمام الثنائي المفرغ والثلاثي المفرغ وانبوبة الاشعة المهبطية في التلفزيون وغيرها .... ان الالكترونات المنبعثة تكتسب طاقتها من الطاقة الحرارية لجسيمات المعدن ولكن علينا ان نتوقع بأن الالكترونات يجب ان تمتلك طاقة اعلى من قيمة دنيا لكي تهرب من سطح المعدن . ان هذه القيمة الدنيا للطاقة قد تم قياسها لعدد من المعادن ووجد ان قيمتها قريبة دائما من دالة الشغل للمعدن الباعث . وبهذا فان عدد الالكترونات المنبعثة خلال عملية الانبعاث الحراري تعتمد على نوعية المادة التي صنع منها الباعث وكذلك على درجة حرارته .

على العموم فان عدد الالكترونات تزداد بزيادة درجة حرارة الباعث . وللحصول على كفاءة عالية في بعث الالكترونات فانه يكون من الضروري استخدام مادة ذات درجة انصهار عالية او استخدام مواد تبعث عدداً كبيراً من الالكترونات عند درجات حرارية واطئة نسبيا .

على اية حال ، ان شدة الالكترونات المنبعثة تزداد كثيراً عند رفع درجة حرارة الباعث وان كثافة التيار الناتج تكون بالصيغة الآتية :

$$J = AT^2 e^{-b/T} \quad amp/m^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (*)$$

تعرف المعادلة اعلاه بمعادلة ريشارد – دشمان حيث ان

$J =$ كثافة التيار المنبعث

$T =$ درجة حرارة الباعث المطلقة

$A = amp/m^2/k^{\circ 2}$ ثابت يعتمد على نوع الباعث ويقاس بـ

$b =$ ثابت الباعث $= \dfrac{\phi e}{k}$

حيث تمثل e شحنة الالكترون $(1{\cdot}602 \times 10^{-19}\ col)$ و K ثابت بولتزمان $(1{\cdot}38 \times 10^{-23}\ J/K^{\circ})$

$$b = \frac{\phi \times 1{\cdot}602 \times 10^{-19}}{1{\cdot}38 \times 10^{-23}} = 11\,600\,\phi\ k^{\circ}$$

وبالتعويض عن قيمة b في المعادلة (*) نحصل على

$$J = AT^2 e^{-11600\phi/T}$$

واضح من المعادلة اعلاه ان كثافة التيار (او الانبعاث الالكتروني) يتأثر بتغير درجة الحرارة . فبمضاعفة درجة حرارة الباعث فان شدة الالكترونات سوف تزيد بـ 10^7 مرة ، فعلى سبيل المثال ، يكون الانبعاث من التنكستن النقي حوالي 10^{-6} أمبير/ سم^2 عند درجة حرارة 2300° م ولكن عند رفع درجة حرارته الى 2900° م فان التيار يصبح 100 أمبير / سم^2 .

4- الباعث الايوني الحراري : Thermionic Emitter

تعرف المادة التي تبعث الألكترونات بالباعث او المهبط ويسخن المهبط عادة ، عند الاستعمال ، في محيط مفرغ ذلك لأن تسخينه في الهواء الى الدرجة المطلوبة سيؤدي الى احتراقه نظراً لوجود الاوكسجين في الهواء .

هناك عدد من الخواص المهمة التي يجب ان تتوافر في الباعث وهي :

أ – دالة شغل واطئة : وذلك لأنه سوف يحتاج الى طاقة قليلة لبعث الألكترونات .

ب– درجة انصهار عالية : بما ان انبعاث الالكترونات لا يحدث الا في درجات الحرارة العالية > 1500° م لذا فانه يفضل استخدام المعادن ذات درجة حرارة الانصهار العالية ولهذا السبب لا يستعمل النحاس لكون درجة انصهاره 810° م على الرغم من ان دالة الشغل لهذا المعدن هي صغيرة .

جـ– قوة تحمل عالية وذلك لغرض تحمل الصدمات والاهتزازات والصدمات أثناء العمل ، فمن المعروف انه لا يمكن بأي حال تفريغ الأجهزة المفرغة تفريغاً تاماً ذلك لأن سطوح البواعث ، لهذه الأجهزة ، تحتوي غازات ممتصة يمكنها الانفصال في أثناء التشغيل . ان اصطدام الألكترونات المنبعثة سوف يؤين هذه الغازات وبالتالي فان الأيونات المتبقية سوف تتجه الى الباعث لتصطدم به وعليه فانها سوف تؤدي أخيراً ، ومع مرور الزمن ، الى اضعاف الباعث .

يعد عنصر التنكستن من أحسن العناصر في بعث الألكترونات حراريا وذلك لعلو

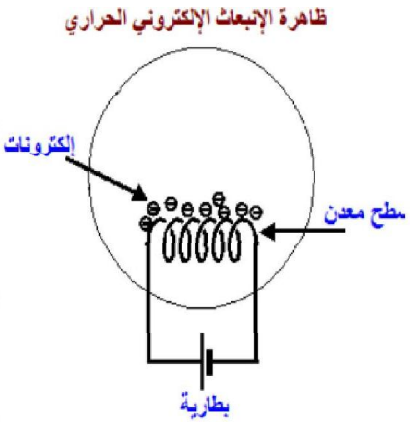
درجة حرارة انصهاره ومتانته الكهربائية مما جعله شائع الاستعمال في الصمامات والأجهزة ذات القدرات والجهود العالية التي تزيد عن 500 فولت .

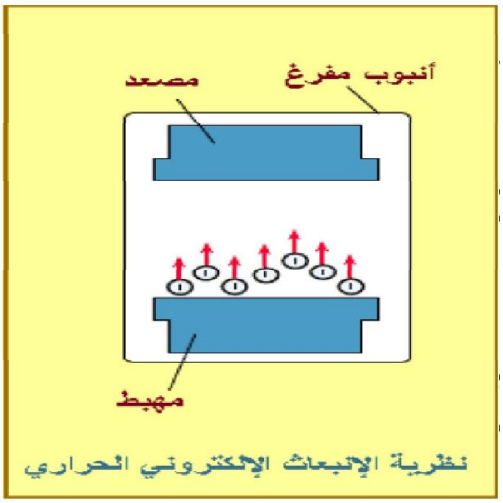
نوع الباعث	ϕ (ev)	حرارة التشغيل (K)	درجة الانصهار	فولتية العمل (V)
التنكستن	4· 52	2500°	3650°	5000
التنكستن المطعم	2· 63	1873		500 – 5000
التنكستن المطلي*	1· 1	1073		1000

* يطلى عادة بأوكسيد الباريوم او السترتيوم .

ومع ان درجة انصهار التنكسن هي 3643°k ، الا ان درجة الحرارة التي يمكن استعمالها لاستخدامات الانبعاث الحراري هي 2500°k تقريباً وعندها يكون معدل عمر فتيلة التنكستن تحت التسخين حوالي 2000 ساعة ويقصر عمرها بصورة ملحوظة اذا ازدادت درجة الحرارة عن 2600°K .

من الأفضل عدم استخدام عنصر التنكستن النقي كباعث للالكترونات في الصمامات التي لا تتطلب جهداً عالياً وذلك لقلة كفاءة الانبعاث التي تعرف بمقدار التيار المنبعث لكل واط من القدرة المسخنة ، ذلك ان تطعيم التنكستن بمادة الثوديوم ينتج باعثاً جيداً ذا دالة شغل واطئة وكفاءة عالية كما ان هناك نوعاً ثالثاً من البواعث يعرف الباعث المطلي بالأوكسيد* ويمتاز بكفاءته العالية وعمره الطويل ويكثر استعماله في الصمامات التجارية ، كصمامات أجهزة الاستقبال (الراديو) مثلا .





الصمامات الإلكترونية (الأنابيب المفرغة)

لم يعد استخدام الصمامات شائعا ألا في حالات خاصة التي تتطلب قدرات عالية مثل اجهزة الارسال ، بسبب حجمها الكبير وزيادة تكاليف صناعته واحتياجه الى مصدر تسخين .وكانت الصمامات تستخدم في الراديو والهاتف والحاسبات وغيرها .الا ان معرفة تركيبها وطبيعة عملها يساعد في فهم تركيب وعمل الثنائي البلوري والترانسستور . وعلى الرغم من أن الترانزستورات قد حلت محل الصمامات في كثير من التطبيقات إلا أن الصمامات العالية القدرة لا زالت مستخدمة في التطبيقات التي يلزمها قدرة عالية كمحطات البث الإذاعي والرادارات.

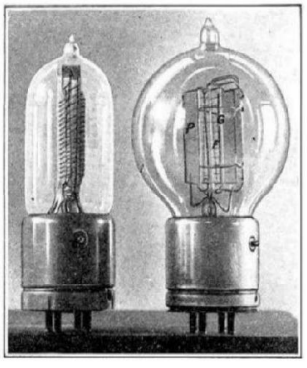
تنقسم الصمامات المفرغة الى عدة أنواع تبعاً لعدد الإلكترودات Electrodes (الأقطاب) الموجودة بها وكذلك لدرجة التفريغ . ومن أكثر هذه الأنواع إستخداماً الصمامات الثنائية والثلاثية والرباعية والخماسية . وترجع هذه الأسماء لعدد الإلكترودات في كل منها . وهناك أنواع من الصمامات الثنائية والثلاثية تعمل في وجود ضغط منخفض لغاز خامل مثل النيون أو الأرجون ويطلق عليها إسم الصمامات الغازية وهي تختلف في خواصها إختلافاً كبيراً عن الصمامات المفرغة تفريغاً جيدا . يقوم المهبط . عند تسخينه . بدور القطب الباعث للالكترونات في الصمام المفرغ وتتم عملية تسخينه كهربائيا بطريقتين :

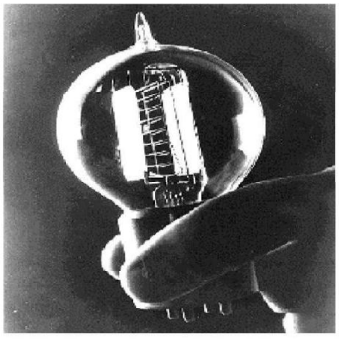
أ— كاثود التسخين المباشر : وفيه يتم تسخين الكاثود بواسطة تيار كهربي يمر في مادة الكاثود ذاتها وتصنع معظم كاثودات التسخين المباشر على شكل سلك رفيع من مادة التنجستن .

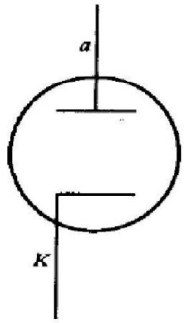
ب — كاثود التسخين الغير مباشر : ويسمى أحياناً بالكاثود المتساوي الجهد ويعتبر أكثر إنتشاراً من سابقه . وفيه يتم تسخين الكاثود بواسطة سخان منفصل يعرف باسم الفتيل Filament . ويكون كاثود التسخين الغير مباشر على شكل إسطوانة يوضع بداخلها الفتيل وبذلك يتم تسخينه وتنبعث منه الإلكترونات اللازمة .

وتتميز الصمامات المفرغة بدرجة تفريغ تصل إلى حوالي 10^{-6} مم زئبق وأقل وذلك لكي تنتقل الإلكترونات داخل تجويف الصمام دون أن تعوقها جزيئات الغاز المتبقي ولكي لا يحترق سلك الفتيل المتوهج . فإذا كان التفريغ رديئاً تصطدم الإلكترونات أثناء إنتقالها بجزيئات الغاز المتبقية وتحولها إلى أيونات موجبة تتجه إلى الكاثود . ويعوق هذا لتأيين العمل العادي للصمام .

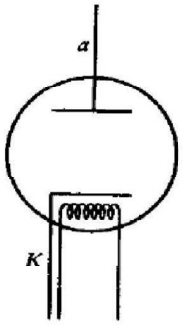
لذلك فإنه لتحسين درجة التفريغ توضع في الصمام عند تصنيعه قطعة من الماغنسيوم أو الباريوم تسمى بالماصة . وعند تسخين الصمام تنصهر هذه الماصة وتتبخر . ثم تتكثف عند إنتهاء التسخين مغطية زجاج الصمام بطبقة فضية فيكون كالمرآة في حالة الماغنسيوم أو بطبقة من اللون الأسود المائل للبني في حالة الباريوم . وتمتص هذه الطبقة بقايا الهواء أو الغازات التي يمكن أن تخرج من الإلكترودات أثناء تشغيل الصمام .







تسخين مباشر

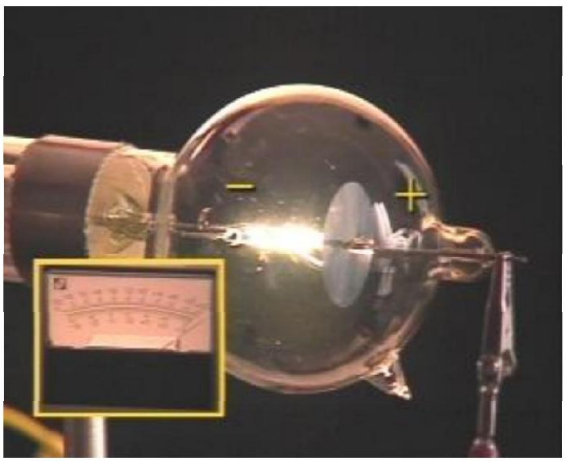


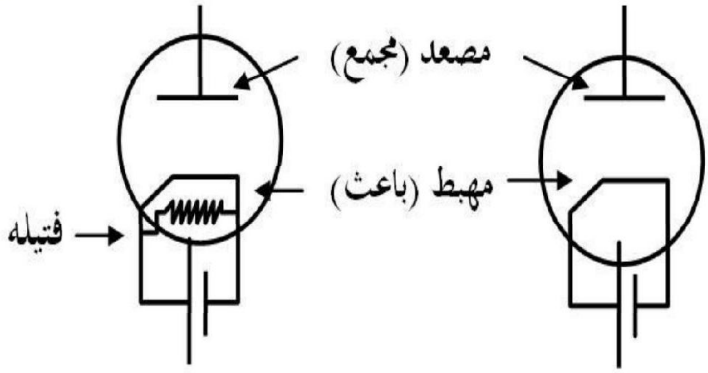
تسخين غير مباشر

a : الصمام الثنائي المفرغ Vacuum Diode

لقد تم اختراع أول عنصر فعال في عالم الإلكترونيات وهو الصمام الثنائي (diode) على يد عالم الفيزياء الإنجليزي جون فليمنغ (John Ambrose Fleming) وذلك في عام 1904م. ويتكون الصمام من أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء يوجد في داخله عند طرفيه قطبين كهربائيين يسمى أحدهما المهبط (cathode) والآخر المصعد (anode) ويوجد تحت المهبط دائرة تسخين كهربائية تعمل على تسخين المادة المعدنية التي يصنع منها المهبط والتي تطلق سيل من الإلكترونات الحرة عند تسخينها.

عند تسليط جهد موجب على المصعد يقوم بجذب الإلكترونات المنبعثة من المهبط مما يؤدي إلى سريان تيار كهربائي في الدائرة الكهربائية الخارجية للصمام أما عند تسليط جهد سالب على المصعد فإن سريان التيار يتوقف على الفور أي أن هذا العنصر الإلكتروني يسمح بمرور التيار باتجاه واحد فقط ويمنع مروره في الاتجاه المعاكس. ولذلك فقد كان أول استخدام عملي لهذا العنصر البسيط في دوائر التقويم ودوائر الكشف.





مبداء عمل الصمام الثنائي المفرغ

عند وجود جهد موجب على الانود يتكون مجال كهربائي في الفراغ بين الانود والكاثود .فاذا كان اكاثود لايبعث الكترونات (او قليلة) يكون المجال متجانس ،وعند التشغيل العادي يصدر الكاثود الاكترونات التي تملئ الفراغ وتتركز الاغلبية من الالكترونات قرب الكاثود والتي تسمى بالسحابة الالكترونية space charge والتي تولد بدورها مجالا غير متجانس الذي يسبب ابطاء حركة الالكترونات.

وبذلك يكون المجال الكلي في الفراغ بين الكاثود والأنود عبارة عن محصلة هذين المجالين وتبعاً لطبيعة هذا المجال الكلي يوجد نطاقان لعمل الصمام الثنائي . فإذا كان المجال بطول المسافة بين الكاثود والأنود معجلاً فإن أي إلكترون صادر من الكاثود سيتحرك متسارعاً نحو الأنود بتأثير هذا المجال الكلي وفي هذه الحالة يكون التيار الأنودي I_a أكبر ما يمكن إذ يساوي تيار الإصدار I_e من الكاثود أي

$$I_e=I_a$$

في هذه الحالة تكون كثافة الشحنة الفراغية صغيرة وليست كافية لإحداث مجال مبطئ عند الكاثود ، ويسمى نظام عمل الصمام في هذه الحالة بنظام التشبع ويسمى التيار الأنودي في هذه الحالة بتيار التشبع I_s . كذلك تسمى قيمة الجهد الأنودي الذي يتحقق عنده تيار التشبع بجهد التشبع V_s .

وبالتالي نجد أنه في نظام الشحنة الفراغية يعود جزء من الإلكترونات المنبعثة إلى الكاثود فيكون التيار الأنودي الناتج أقل من تيار الإنبعاث من الكاثود أي $I_a < I_e$. وتعتمد قيمة التيار الأنودي إعتماداً كبيراً على قيمة جهد الأنود .

وعندما يكون جهد الأنود مساوياً للصفر $V_a=0$ تكون كثافة الشحنة الفراغية عالية جداً ويتكون حاجز جهدي عال لا يمكن إجتيازه إلا للقليل من الإلكترونات ذات السرعات الإبتدائية العالية التي يمكنها أن تصل إلى الأنود . وهكذا نجد أنه عندما تكون $V_a=0$ يمكن أن يمر تيار أنودي صغير جداً يسمى عادة بالتيار الإبتدائي I_0 .

طرق توصيل الصمام الثنائي

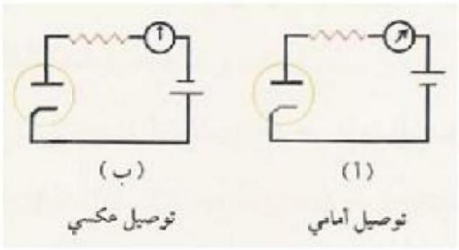
1 - التوصيل الأمامي (يمر التيار)

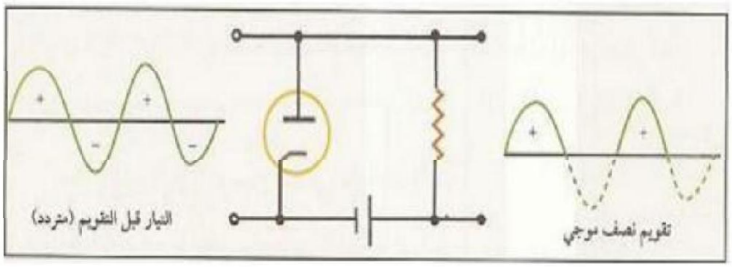
يوصل الكاثود مع القطب السالب والانود مع القطب الموجب .

2 – ا لتوصيل العكسي (لا يمر التيار)

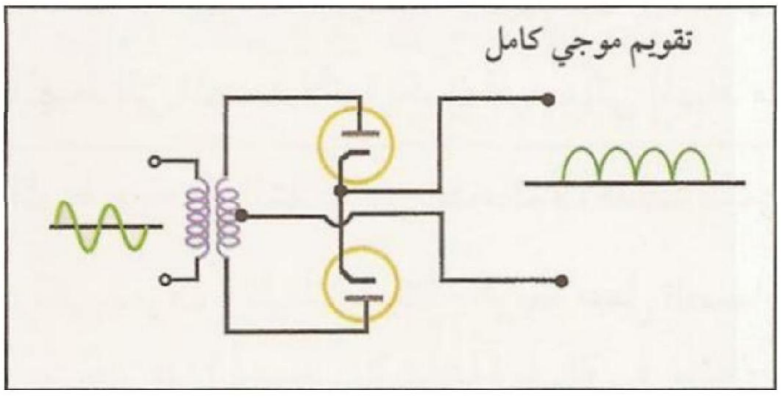
يوصل المهبط مع القطب الموجب والمصعد مع القطب السالب

أي ان ظاهرة الانبعاث تحدث في حالة الانحياز الامامي ،بمعنى يتولد تيار الانود من خلال انطلاق الالكترونات من الكاثود الى الانود. اذن الصمام الثنائي يعمل على تمرير التيار الكهربائي إذا كان جهد المصعد موجب أي عند التوصيل الأمامي وهذا هو السبب في تسميته بالصمام وبالتالي عندما يمر به التيار المتردد، يسمح الصمام للتيار بالمرور في الاتجاه الأمامي فقط ولا يسمح بمروره في الاتجاه العكسي ، أي أنه تمر أنصاف ذبذبات التيار في الاتجاه الأمامي ولا تمر أنصاف الذبذبات في الاتجاه العكسي . ويسمى التقويم في هذه الحالة بالتقويم نصف الموجة .





ولكي يتم تقويم التيار تقويم موجي كامل يستخدم صمامين أحدهما يسمح بمرور التيار في نصف الدورة الأولى للموجة والصمام الثاني يسمح بمروره في النصف الثاني من الموجة .



b: الصمام الثلاثي المفرغ Vacum Tube Triode

الاختراع الأكثر أهمية في عالم الإلكترونيات فقد تحقق على يد المهندس الكهربائي والمخترع الأمريكي لي دي فورست (**Lee De Forest**) وذلك في عام 1906م عندما تمكن من إضافة شبكة معدنية تقع بين الكاثود (المهبط) والانود (المصعد) ليحول بذلك الصمام الثنائي إلى صمام بثلاثة أقطاب (**triode**) وقد أطلق اسم الشبكة (**Grid**) على هذا القطب الثالث. وتكمن أهمية الشبكة بقدرتها على التحكم بقيمة التيار العالي نسبيا الذي يسري بين المهبط والمصعد وذلك من خلال تسليط قيم صغيرة من الجهد الكهربائي عليها.

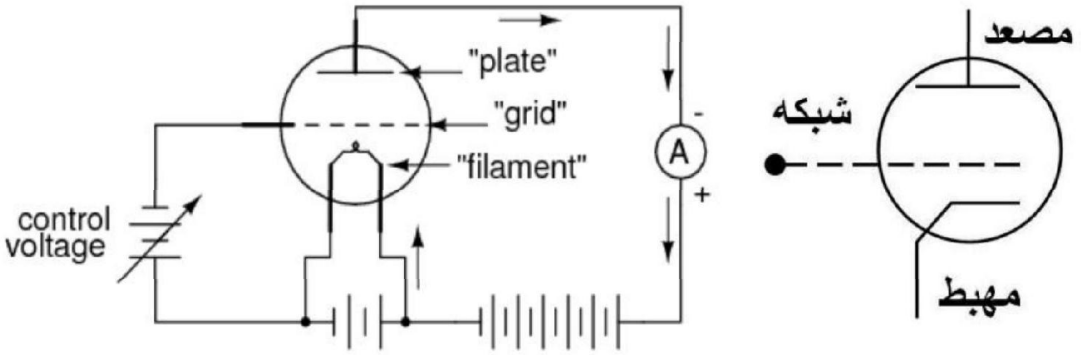
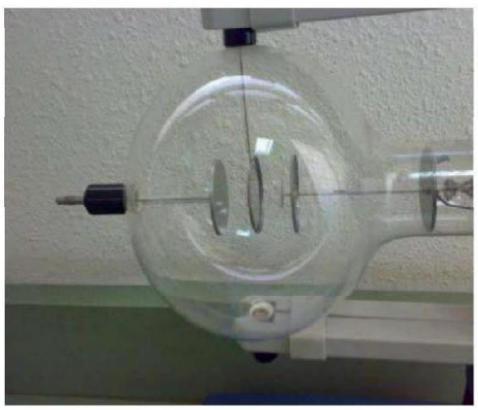


plate current can be controlled by the application of a small control voltage between the grid and filament!

اما تأثير الشبكة في الصمام الثلاثي فيشبه تأثير المصعد في الصمام الثنائي ، فاذا تغير جهد الشبكة تتغير شدة المجال الناتج عن جهد الشبكة ولذلك يتغير ارتفاع الحاجز الجهدي الموجود بالقرب من المهبط وبذا تتغير كمية الالكترونات التي تجتاز هذا الحاجز اي يتغير مقدار تيار المصعد . او بعبارة اخرى : عندما يتغير جهد الشبكة في الاتجاه الموجب ، ينخفض ارتفاع الحاجز الجهدي وتجتاز كمية اكبر من الالكترونات المنبعثة وتقل الكمية التي تعود الى المهبط وينمو التيار المصعدي . اما عندما يتغير جهد الشبكة في الاتجاه السالب فان ارتفاع الحاجز الجهدي القريب من المهبط يزداد وعندئذ تستطيع كمية اقل من الالكترونات ان تجتازه ويزداد عدد الالكترونات العائدة الى المهبط فيقل تيار المصعد .



جمهورية العراق – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سومر– كلية التربية الاساسية – قسم العلوم الطبيعية – فرع الفيزياء

محاضرات في الالكترونيات

Lectures in Electronics

المحاضرة الثانية :

مقدمة في اشباه الموصلات

Introduction to Semiconductors

مدرس المادة : م.م. فؤاد نمر عجيل

المحتويات:

1. ماهي اشباه الموصلات What Semiconductor
2. مخطط الطاقة لأشباه الموصلات Energy scheme for semiconductor
3. اشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductor
4. اشباه الموصلات الشائبة Extrinsic Semiconductor
5. كثافة الشحنات في اشباه الموصلات الشائبة Charge Density in Extrinsic Semiconductor
6. سريان التيار في اشباه الموصلات الشائبة Drift of The Current in Extrinsic Semiconductor
7. اسئلة ومسائل حول المحاضرة Questions about the lecture

1- اشباه الموصلات Semiconductor

شبه الموصل أو نصف الناقل (Semiconductor) هو مادة صلبة يتم التحكم بموصليتها الكهربائية بإضافة عناصر أخرى .شبه الموصل تكون مقاومته الكهربائية ما بين الموصلات والعوازل، كما يمكن لمجال كهربائي خارجي تغيير درجة مقاومة شبه الموصل. فالأجهزة والمعدات التي يدخل في تصنيعها مواد شبه موصلة هي أساس الإلكترونيات الحديثة. والأجزاء الإلكترونية التي تعمل بأشباه الموصلات تشمل الترانستور، والخلايا الشمسية، الصمامات الثنائية، والثنائيات باعثة الضوء، وموحدات التيار التي تعمل بالسيليكون، والدوائر المتكاملة التماثلية والرقمية.

ومن المواد التي تشكل أشباه الموصلات عناصر رباعية التكافؤ، أي أن لكل ذرة 4 إلكترونات تشترك في الروابط مع جيرانها من الذرات. ومن تلك المواد السيليكون النقي والجرمانيوم النقي.

2- مخطط الطاقة لاشباه الموصلات The Band - Energy of Semiconductors

لايختلف مخطط الطاقة لاشباه الموصلات (انظر الشكل -1-) عن نظيره في العوازل الا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في اشباه الموصلات في حدود 1.1 eV او اقل . وتتميز هذه الموادبكونها عازلة insulutor عند درجة حرارة الصفر المطلق (حيث تكون حزمة التوصيل فارغة اي لاتوجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل الى حزمة التوصيل) وموصلة conductors عند الدرجات الحرارية العالية . من جهة أخرى عند درجة حرارة الغرفة (27°C = 300°K) يكتسب عدد من الالكترونات الطاقة الكافية لكي ينتقل الى حزمة التوصيل الا ان التيار الناتج يكون صغيراً بحيث لايمكن الاستفادة منه في معظم التطبيقات وعند هذه الدرجة لاتكون المادة شبه الموصلة عازلا جيدا كما لاتكون موصلا جيداً ولهذا تدعى شبه موصل semiconductor

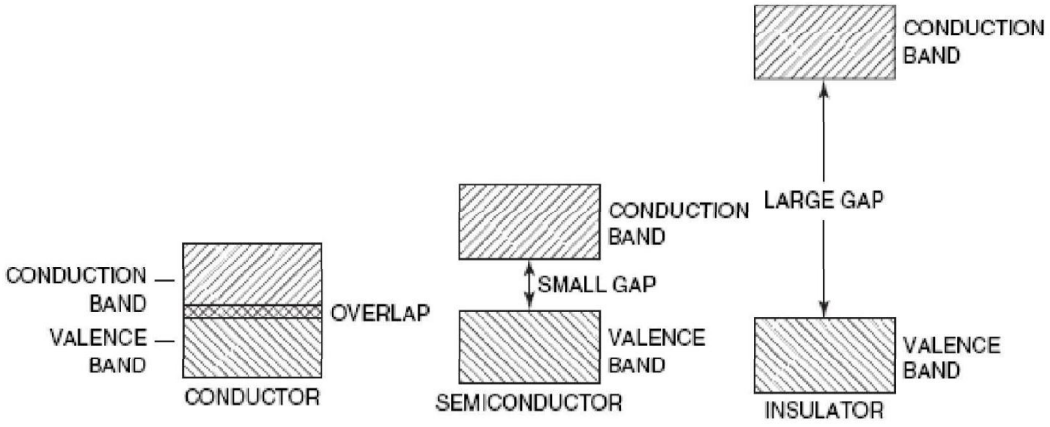
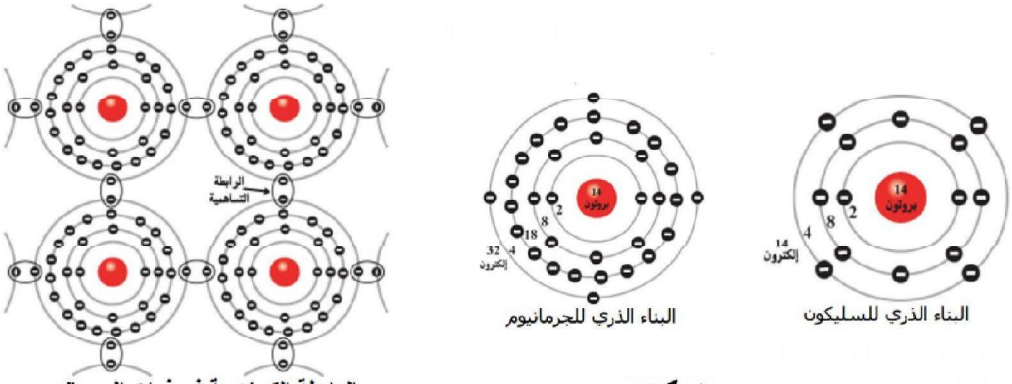


Figure -1- Valence and conduction bands in conductor, semiconductor, and insulator.

3- اشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductor

رأينا فيما مضى أن حزمة التكافؤ في الموصلات تتداخل مع حزمة التوصيل وعليه فان عدد الالكترونات الحرة يكون محدوداً في حزمة التوصيل وان رفع درجة الحرارة لن يؤدي الا الى زيادة اهتزاز الذرات في مواقعها مما يعمل على زيادة مقاومة الموصل بسبب من زيادة عدد الاصطدامات التي تعملها الالكترونات مع هذه الذرات اما في اشباه الموصلات فان زيادة درجة الحرارة سوف يؤدي الى زيادة طاقة الالكترونات التكافؤية ومن ثم فان عدد الالكترونات التي تصل الى حزمة التوصيل سوف يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة وبالتالي فان التوصلية σ لهذه المواد سوف تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة – – انظر الشكل -3- مما يعني امتلاكها لمعامل مقاومة سالب .



الرابطة التساهمية في ذرات الجرمانيوم

الشكل -2-

الشكل -3- تغير التوصلية مع درجة الحرارة

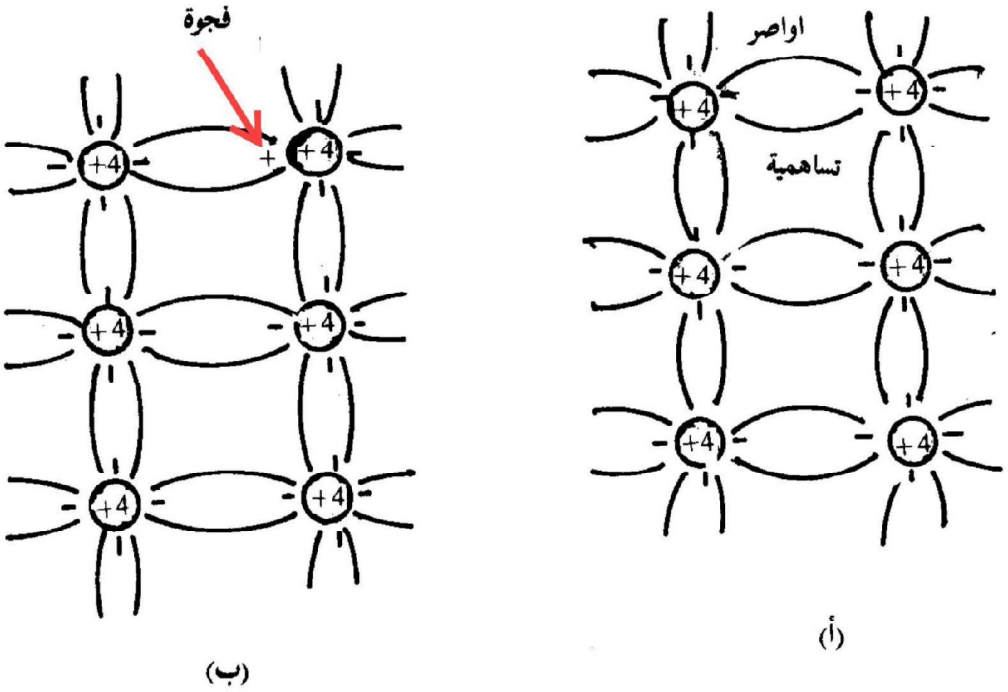
على أية حال فان كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل يمكن حسابها بوساطة دالة Function تخضع لاحصاء فيرمي – ديراك Fermi-Dirac statistic وتسمى بدالة التوزيع للطاقة Energy Distribution Function التي تعبر عن الاحتمالية f(E) لاي الكترون لاحتلال مستوى من الطاقة (E) عند درجة حرارة T وتعطى بوساطة دالة فيرمي

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

في هذه المعادلة اذا كان $E = E_f$ فان $f(E) = \frac{1}{2}$ ومن ثم فان تعريف منسوب فيرمي للطاقة بانه المنسوب الذي تكون احتمالية اشغاله من قبل الكترون مساوية لـ 50 % اما بالنسبة لمستويات الطاقة التي تزيد عن E_f بحيث تقترب نتيجة الفرق $(E - E_f)$ من اللانهاية عندئذ يقترب احتمال اشغال ذلك المستوى من الطاقة من الصفر وبمعنى اخر ان مستويات الطاقة العالية جدا تكون خالية من الالكترونات بينما يصل الاحتمال الى 100 % في مستويات الطاقة الواطئة جداً .

تمتلك عناصر المجموعة الرابعة group IV من الجدول الدوري ، اربعة الكترونات تكافؤية وتدعى البلورات التي تكون من ضمنها مواد البلورات التساهمية وتنشأ قوى التماسك في البلورات التساهمية من وجود الكترونات مشتركة بين الذرات المتجاورة فكل ذرة مشتركة باصرة تساهمية مع جارتها تساهم بالكترون واحد في الاصرة ويكون الالكترونان مشتركين بين الذرتين بدلا من ان يكون كل منهما ملكية خاصة لاحد الذرتين كما في حالة الاواصر الايونية ويبين الشكل -4- تركيب احد هذه البلورات في درجة الصفر المطلق وقد رسمت ذراتها في بعدين وبصورة رمزية حسب انموذج بور Bohr المبسط للذرة (وذلك برسم الكترونات التكافؤ فقط وما يعادلها من الشحنة الموجبة)

الان اذا ما تم تسليط جهد كهربائي على هذه البلورة او تعرضت لأشعاع بطاقة كافية او تم اكسابها طاقة حرارية فان الطاقة المكتسبة هذه سوف تعمل على كسر الروابط التساهمية ونقل الالكترون الى حزمة التوصيل ليشارك في عملية التوصيل الكهربائي .



الشكل -4- بلورة تساهمية قبل وبعد تعرضها لجهد خارجي

ان الطاقة اللازمة والكافية لفك الروابط التساهمية يجب ان تكون مساوية لفجوة الطاقة E_g او اكبر . تكون E_g مساوية لـ 0.72 اليكترون فولت بالنسبة لبلورة الجرمانيوم (Ge) و 1.1 اليكترون فولت بالنسبة لبلورة السيلكون (Si) . هذا وبعد هذان العنصران من اهم عناصر المجموعة الرابعة المستعملة في الصناعات الالكترونية ولعنصر السيلكون (14) الكترونا في تركيبه الذري تتوزع على الصورة 2 و 8 و4 الكترونات بينما يمتلك عنصر الجرمانيوم (32) الكترونا تكون موزعة على الصورة 2 و 8 و18 و 4 الكترونات

على اية حال ، ان انتقال الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل سوف يخلف وراءه مكانا خاليا في الاصرة التساهمية – انظر الشكل -5- اوما يدعى بالفجوة hole . الذرة الان اصبحت ايونا ion وتظهر الفجوة كشحنة موجبة ثابتة (e +) مع كتلة فعالة m_h ولا تكون مساوية لكتلة الالكترون . هذا الفرق في الكتلتين يظهر على شكل حركة بطيئة لحاملات الشحنة الموجبة هذه استجابة للمجالات الكهربائية المسلطة مقارنة مع حركة الالكترونات تحت نفس الظروف .

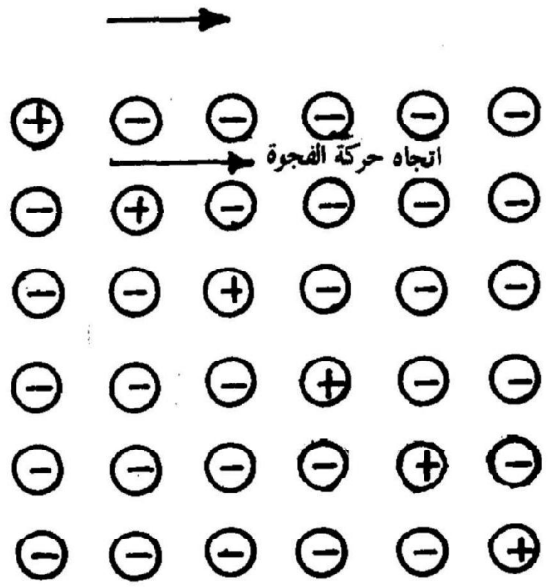
تعرف الفجوة بانها مكان مستعد لاستقبال الكترون وبهذا فانها سرعان ماتملأ بالالكترون المجاور الذي يعمل بفعل وجود مجال كهربائي ، على كسر الاواصر التي تربطه بالذرة مولداً بذلك فجوة ثانية يتم ملأها ايضا بالكترون آخر وهكذا تستمر العملية مؤدية

32 Ge germanium								
$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10}$	$4s^2$	$4p^2$	
2	8		18			4		

14 Si silicon					
$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^2$	
2	8		4		

بذلك الى حركة الشحنات – انظر الشكل -5- ومولدة بذلك تياراً يدعى بتيـــار الفجـــوات hole current

ان عملية توليد هذه الازواج من الالكترون – فجوة electron-hole pairs سوف تستمر وعند التوازن الحراري thermal equilibrium يكون عدد الفجوات المتخلفة مساويا لعدد الالكترونات المنتقلة وتعد الطاقة الحرارية اكثر المصادر توليداً لهذه الازواج وتدعى عملية التوصيل الناتجة عن حركة حاملات الشحنة هذه (الفجـــوات والالكترونات) بعملية التوصيل الذاتي intrinsic conduction



الشكل -5- حركة الفجوة في شبه الموصل

عند تسليط مجال كهربائي خارجي فان الطاقة المكتسبة من قبل هذه الحاملات سوف تضاف الى طاقتها الحرارية ، وبذلك تعمل على تعجيلها واكسابها سرعة تصل بعد فترة معينة ، كما ذكرنا ، الى قيمة ثابتة تدعى بسرعة الانسياق velocitydrift بحيث ان

$$v_h = \mu_h E$$
$$v_e = \mu_e E \qquad \text{..... (2)}$$

حيث تشير h الى الفجوات hole و e الى الالكترونات وتكون v_e معاكسة لاتجاه v_h واكبر منها الا ان التيار الناتج عنهما يكون في نفس الاتجاه .

معروف لدينا ان

$$\Delta I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \text{..... (3)}$$

كذلك هو معروف ان

$$\Delta Q = \rho \, \Delta V \qquad \text{..... (4)}$$

حيث تمثل ρ الكثافة الحجمية للشحنة و ΔV عنصراً حجمياً . عندالتعويض عن ΔQ اعلاه في المعادلة نحصل على

$$\Delta I = \rho \, \Delta s \, \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad \text{..... (5)}$$

او ان

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta s} = \rho \, v \qquad \text{..... (6)}$$

حيث تمثل J كثافة التيار السطحية
بالنسبة لانصاف الموصلات لدينا

$$J_e = \rho_e \, v_e = ne \, v_e \qquad \text{..... (7)}$$

وكذلك

$$J_h = \rho_h \, v_h = pe \, v_h \qquad \text{..... (8)}$$

حيث تمثل n و p كثافة الالكترونات والفجوات المتولدة وعلى التوالي

$$J = J_e + J_h = ne \, v_e + pe \, v_h \qquad \text{..... (9)}$$

وعند التعويض عن قيمة v_e و v_h من المعادلة (2) في المعادلة (9) نحصل على

$$J = + ne\,\mu_e E + pe\,\mu_h E \qquad \text{..... (10)}$$

في انصاف الموصلات النقية تكون كثافة الالكترونات n في حزمة التوصيل مساوية لكثافة الثقوب p التي خلفتها تلك الالكترونات في حزمة التكافؤ ، اي ان $n_i = p = n$ حيث يشير الحرف (i) الى شبه الموصل النقي intrinsic . وعليه فأن

$$J = n_i (\mu_e + \mu_h) e E \qquad \text{..... (11)}$$

العلاقة بين E و J يمكن ايضا تحديدها بوساطة التوصلية σ من خلال

$$J = \sigma E \qquad \text{..... (12)}$$

وعليه فان

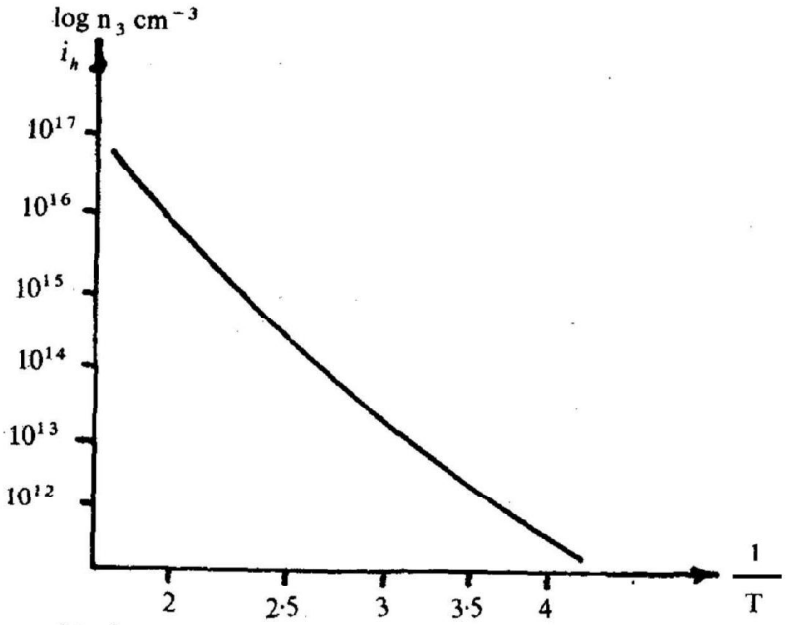
$$\sigma = (\mu_e + \mu_h) n_i e \qquad \text{..... (13)}$$

بالنسبة للجرمانيوم النقي او الذاتي ، فان حركتي الالكترون والفجوة هما 0.36 و 0.17 بالترتيب بينما للسيلكون فالحركتيين هما بالترتيب 0.12 و 0.025 . وهذه القيم معطاة بالمتر المربع لكل فولت – ثانية وتتراوح بين 10 الى 100 مرة أكبر من تلك للالمنيوم والنحاس والفضة والموصلات المعدنية الاخرى عند نفس الدرجة الحرارية 300°k . من جهة اخرى ، في المعادن هنالك في المتوسط الكترون حر مقابل كل ذرة وبما ان كثافة الذرات في المعادن هي 10^{28} بالمتر المكعب الواحد لذا فانه يوجد في المتوسط 10^{28} الكترون حر في المتر المكعب الواحد . في اشباه الموصلات مثل الجرمانيوم والسيلكون هناك الكترون حر مقابل 10^{8} ذرة وعليه فاننا نتوقع ان تكون التوصلية للسيلكون 10^{8} مرة اقل من النحاس الا ان كون الحركية في السيلكون ، انظر اعلاه ، هي اكبر مائة مرة مما هي في النحاس لذا فاننا نتوقع ان التوصلية في اشباه الموصلات تكون حوالي مليون مرة اقل من المعادن عند درجات الحرارة الاعتيادية وهذا ما هو حاصل فعلا .

ومن الجدير بالذكر ان n_i تتغير مع درجة الحرارة بصورة اسية حيث ان

$$n_i^2 \propto T^3 e^{-E_g/KT} \qquad \text{..... (14)}$$

وعليه فان n_i تزداد بشكل كبير وسريع مع الازدياد في درجة الحرارة ويبين الشكل -6- تغير n مع $\frac{1}{T}$



الشكل -6- تغير كثافة الالكترونات الحرة في اشباه الموصلات مع درجة الحرارة

هذا وقد وجد ان التوصلية تزداد في الجرمانيوم بنسبة 6 بالمائة تقريبا كلما ازدادت درجة الحرارة درجة واحدة اما في السيلكون فتبلغ الزيادة 8 بالمائة تقريباً وعليه فان الحرارة الزائدة قد تعرقل عمل اشباه الموصلات في بعض الدوائر الالكترونية .

4- اشباه الموصلات الشائبة Extrinsic Semiconductor

ذكرنا فيما سبق ان عدد الالكترونات الواصلة الى حزمة التوصيل وكذلك الفجوات المتخلفة في حزمة التكافؤ في المواد شبة الموصلة ، يكون صغيرا جدا في درجات الحرارة الاعتيادية بحيث ان التيار الناتج عنها لايصلح لكثير من التطبيقات العملية . كذلك وجدنا ان رفع درجة حرارة اشباه الموصلات ، يؤدي الى زيادة الموصلية لهذه المواد اي زيادة عدد الالكترونات المنتقلة الى حزمة التوصيل وبالتالي زيادة التيار الناتج .

على الرغم مما جاء اعلاه الا ان زيادة الموصلية للمواد النصف موصلة عن طريق

رفع درجة حرارتها لايعد مرغوبا فيه من الناحية العملية وذلك لما تتطلبه هذه الطريقة من اجهزة تسخين وما يلزم ذلك من زيادة في التكاليف وكذلك زيادة في استهلاك القدرة والاهم من ذلك صعوبة التحكم او السيطرة على الخواص الكهربائية لاشباه الموصلات من خلال هذه الطريقة .

على اية حال ، يتم في الوقت الراهن السيطرة على الصفات الكهربائية لشبه الموصل عن طريق اضافة نسب قليل ومحدود من مواد شائبة impurities الى بلورة شبه الموصل وتدعى هذه العملية بالتطعيم doping وتعرف كمية الشوائب المضافة بمنسوب التطعيم doping leuel

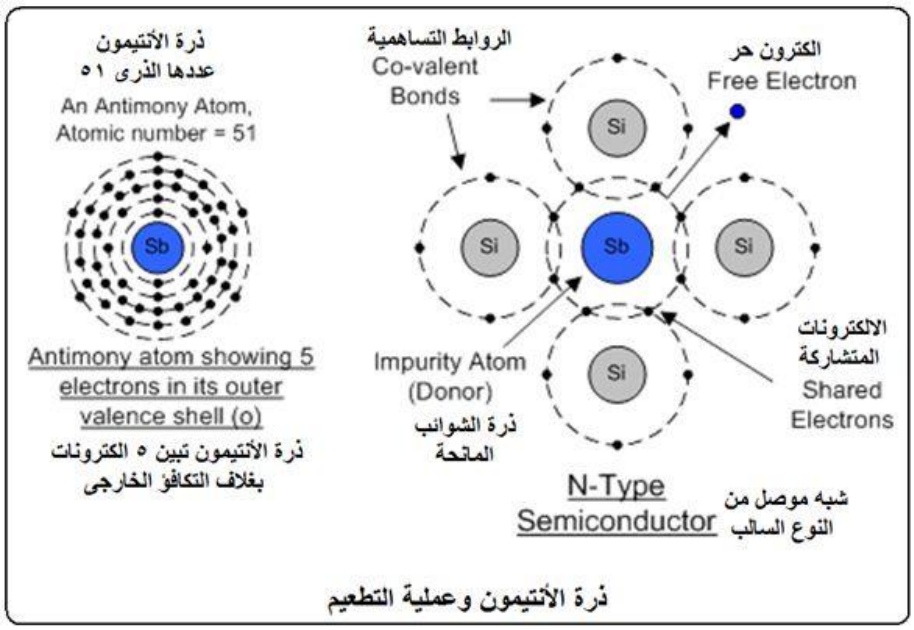
ان اضافة ذرات شائبة الى اشباه الموصلات النقية ، بنسب قليلة تعمل على زيادة الموصلية لهذه المواد فمثلا اذا اضيفت الشوائب بنسبة ذرة واحدة من الشوائب الى 10^8 ذرة جرمانيوم فان ذلك يكفي لزيادة الموصلية بمقدار من 10 الى 15 مرة . كذلك فان اضافة الذرات الشائبة الى اشباه الموصلات النقية تعطينا امكانية التحكم في كثافة الالكترونات الحرة الموجودة في شبه الموصل اوكثافة الفجوات فيه وبصورة مستقلة وتضاف الشوائب عادة بنسبة ذرة عنصر شائب واحد الى مليون ذرة سيلكون اوجرمانيوم

يوجد نوعان من الشوائب : تلك التي تعمل على زيادة الموصلية بزيادة عدد الالكترونات وتكون من عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري (خماسية التكافؤ) وتلك التي تزيد الموصلية بزيادة عدد الثقوب وتكون من ضمن عناصر المجموعة الثالثة (ثلاثية التكافؤ) ولهذا فان شبه الموصل المطعم يصنف الى نوعين رئيسين وذلك حسب نوع الشوائب المضافة اليه .

4 - a : اشباه الموصلات السالبة N - type semiconductor

رأينا فيما سبق ان حاملات التيار في اشباه الموصلات ، هي الالكترونات والفجوات اما في هذا النوع من اشباه الموصلات فان الحاملات الاغلبية للتيار majority carriers هي الالكترونات الناتجة من ادخال مادة شائبة خماسية التكافؤ كذرة الزرنيخ arsenic مثلا يوجد في هذه الذرة خمسة الكترونات في مدارها الخارجي على حين تحوي ذرة السيلكون اربعة الكترونات خارجية وعندما تحل ذرة زرنيخ محل ذرة سيلكون في بلورة السيلكون فان اربعة الكترونات خارجية من ذرة الزرنيخ تساهم باربعة اواصر تساهمية

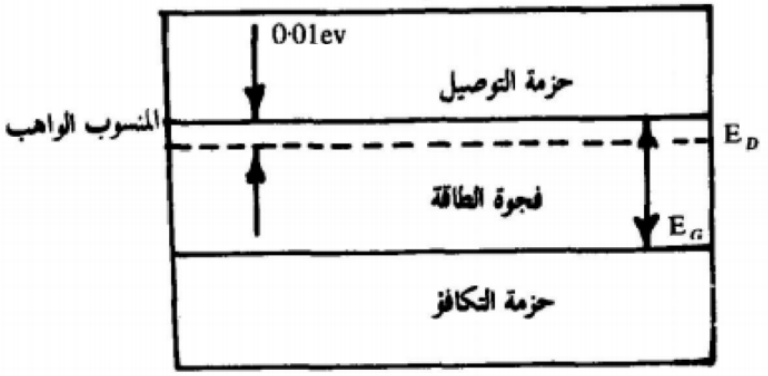
مع ذرات السيلكون المجاورة ويبقى الالكترون الخامس لذرة الالكترون معلقا بالذرة الام دون ان يدخل ضمن الاواصر التي تربط الذرات – انظر الشكل -7-



الشكل -7- شبه موصل نوع N

ان هذا الالكترون الخامس يكون شبه سائب وتكفي طاقة صغيرة لاتتعدى عن 0.04 اليكترون فولت للجرمانيوم و 0.01 اليكترون فولت للسيلكون لنقله الى حزمة التوصيل .وبهذا فان وجود الذرات الشائبة يزيد من عدد الالكترونات الطليقة في حزمة التوصيل مع قليل من الطاقة ليس غير وقد يتضاعف هذا العدد ، من الالكترونات الطليقة الى الف مرة عما هو عليه في حالة السيلكون النقي .

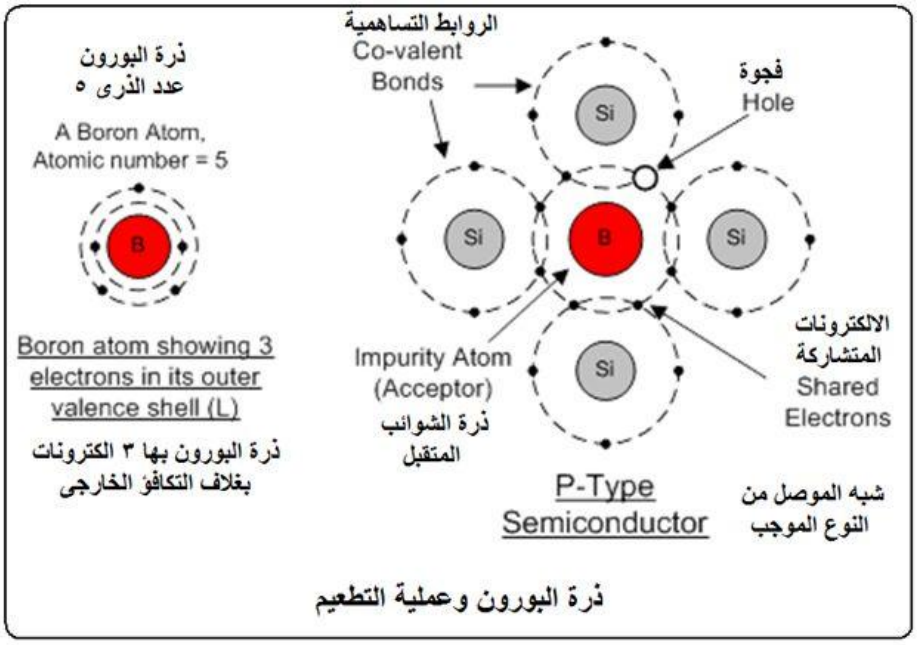
ومن الجدير بالذكر ان ظهور الالكترونات الفائضة في حزمة التوصيل نتيجة لوجود الشوائب لايقابله ظهور الثقوب في حزمة التكافؤ. فهذه الالكترونات لاتنتقل من حزمة التكافؤ كما يحدث ذلك في المادة النقية بل انها تنتقل من مستويات طاقة واقعة تحت حافة حزمة التوصيل (ضمن فجوة الطاقة) وعلى عمق قليل جدا من الطاقة (0.01 eV او 0.04eV) انظر الشكل -8- . ويسمى هذا المستوى الجديد للطاقة بالمستوى الواهب donor level وهو يمثل مستوى الطاقة للذرات الشائبة ولهذا تسمى الذرات الداخلة بالذرات الواهبة donors . وعليه فان غالبية التيار يكون نتيجة شحنات الالكترونات (السالبة) ومن هنا جاءت تسمية هذا النوع من البلورات بالسالبة N – type. اما كثافة الثقوب فتحددها الالكترونات التي تترك حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل ويكون تأثيرها على التوصيل مهملا ولهذا فانها تدعى بالحاملات الاقلية minority carriers



الشكل -8- مخطط الطاقة لشبه موصل من نوع N

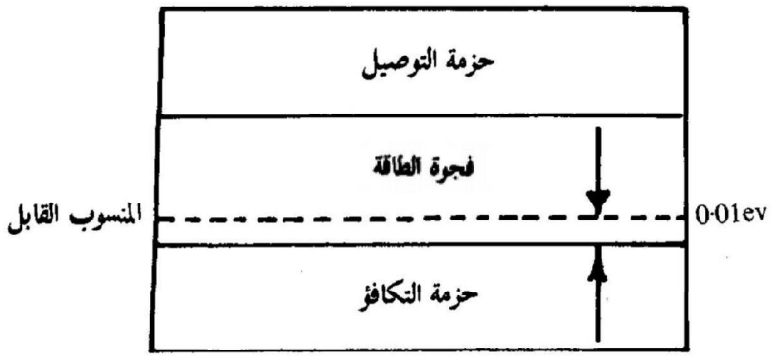
b - 4 : اشبـــاه الموصـــلات المـــوجبـــة P - type semiconductor

الان لو اضفنا بعض ذرات مادة شائبة ثلاثية التكافؤ كالكاليوم او الالمنيوم او البورون الى بلورة السيلكون فان ظاهرة مختلفة سوف تحدث . تحوي ذرات الكاليوم عـــلى ثلاثة الكترونات في مدارها الخارجي متوزعة على هيئة $4s^2 4p$ لذلك فان وجـــود هذه الذرات في بلورة السيلكون $3s^2 3p^2$ يولد مكانات شاغرة في تركيبها الالكتروني تدعى بالفجوات holes – انظر الشكل -9- ويحتاج الالكترون الى طاقـــة قليلة جدا لكي يدخل في فجوة معينة ولكنه بهذه العملية يترك خلفه فجوة جديدة . فعند تسليط مجال كهربائي على بلورة السيلكون الشائبة هذه فان حركة الفجوات ستنتظـم فيها وتنساق نحو القطب السالب مولدة بذلك تيارا يدعى بتيار الفجوات currenthole هذا النوع من المادة يدعى بشبه الموصل من النوع الموجب P - type sehaicarducter وتدعى الذرات الشائبة الداخلة بالذرات المتقبلة acceptors لتقبلها الالـكترونات من ذرات البلورة الاصلية .



الشكل -9- شبه موصل من نوع P

وكما هو الحال في الشوائب المانحة فان الشوائب القابلة تكون مستويات طاقة جديدة ضمن فجوة الطاقة وعلى مسافة قريبة جدا من حزمة التكافؤ يطلق عليها بالمنسوب القابل acceptor level – انظر الشكل -10- تبلغ قيمته حوالي 0.01 ev بالنسبة للجرمانيوم و 0.16 ev بالنسبة للسيلكون . وان وجود هذا المنسوب يسهل من عملية انتقال الالكترونات من حزمة التكافؤ اليه وان انتقال الالكترون يؤدي الى تخلف فجوة في حزمة التكافؤ وهذه الفجوات تساعد على سريان التيار .



الشكل -10- مخطط الطاقة لشبه موصل نوع P

5- كثافة الشحنات في اشباه الموصلات الشائبة

مما تقدم يتبين لنا ان توصلية الشوائب تكون غالبة على التوصلية الذاتية اذا كان تركيز الشوائب الواهية N_d او المتقبلة N_a أكبر من تركيز حاملات الشحنة الذاتية $n_i = p_i$ وفي شبه الموصل الشائب يقل تركيز الحاملات الاقلية بنفس عدد المرات التي يزداد بها تركيز الحاملات الاكثرية فاذا كان $n_i = n_n = p_n = 10^{13}\ cm^{-3}$ في الجرمانيوم ثم تضاعف تركيز الالكترونات ، بعد اضافة الذرات المانحة ، بـ 1000 مرة بحيث اصبح $n_n = 10^{16}\ cm^{-3}$ فسيقل تركيز الفجوات بـ 1000 مرة ويصبح $p_n = 10^{10}\ cm^{-3}$ اي أقل بمليون مرة من تركيز الالكترونات والسبب في ذلك ان اعادة الاتحاد تتناسب طرديا مع تركيز الالكترونات وبذلك سيضاعف عدد الالكترونات التي تتحد ثانية مع الفجوات بـ 1000 مرة فتصبح الفجوات 1000 مرة اقل مما كانت عليه . وبالنسبة الى نصف موصل سالب فان العلاقة

$$n_n p_n = n_i^2 \qquad \text{..... (15)}$$

$$10^{16} \times 10^{10} = (10^{13})^2$$

وما قيل عن شبه الموصل السالب يصح قوله على شبه الموصل الموجب حيث ان $Na >> p_i$ ويمكن اعتبار ان $P_p \approx Na$ اي ان

$$n_p P_p = p_i^2 = n_i^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (16)$$
$$10^{10} \times 10^{16} = (10^{13})^2$$

بقي لنا ان نذكر انه عندما ترتفع درجة حرارة شبه الموصل الشائب كثيرا عن درجة حرارة الغرفة فان الالكترونات او الفجوات الاصلية سوف تهيمن على الالكترونات والفجوات الشائبة وتصبح كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل مساوية مرة اخرى لكثافة الفجوات في حزمة التكافؤ وهكذا فان الحرارة العالية غير مرغوب فيها اذ هي تبعد العناصر شبه الموصلة من اداء عملها بالصورة الاعتيادية .

6- سريان التيار في اشباه الموصلات الشائبه

يسري التيار في المواد بصورة عامة اذا كان هناك .

أ – انحدار في الجهد $\left(\frac{dv}{dx}\right)$

ب – انحدار في كثافة الحاملات للشحنات السالبة او الموجبة $\left(\frac{dn}{dx}\right)$ او $\left(\frac{dp}{dx}\right)$

ج – تغير في الازاحة الكهربائية مع الزمن $\left(\frac{dD}{dt}\right)$.

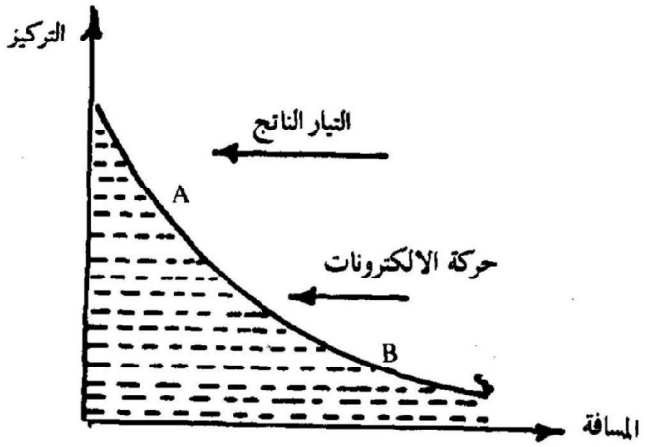
يسمى التيار الناتج عن التغير في الازاحة الكهربائية بتيار الازاحة displacement current وهو يظهر في العوازل فقط اما التيار الناتج عن وجود انحدار في الجهد فيسمى بتيار الحمل او التوصيل وهو يظهر في الموصلات واشباه الموصلات وقد تكلمنا عنه فيما مضى واطلقنا على التيار الناتج من حركية كل الالكترونات في حزمة التوصيل او الفجوات في حزمة التكافؤ ، في شبه الموصل الذاتي عند تسليط المجال الكهربائي ، بتيار الانسياق drift current تمشيا مع السرعة النهائية التي تصلها حاملات الشحنة اي سرعة الانسياق dritt velocity

من جهة اخرى هناك تيار اخر يظهر فقط في اشباه الموصلات عند غياب المجال الكهربائي وعندما يكون توزيع الشحنات داخل المادة شبه الموصلة غير منتظم يسمى بتيار

الانتشار diftusion current (I_D)

فعلى سبيل المثال اذا كان تركيز الالكترونات عند النقطة (A) – انظر الشكل -11- في داخل المادة شبه الموصلة اكبر مما هو عليه في النقطة (B) فان وجود هذا الانحدار في التركيز concentration gradient سوف يعمل عل دفع الالكترونات للانتشار من النقطة (A) باتجاه النقطة (B) مؤديا بذلك الى احداث تيار الانتشار .

هذا وقد وجد ان كثافة تيار الانتشار الناتج عن انتشار الالكترونات J_{Dn} تتناسب طرديا مع انحدار التركيز لهذه الالكترونات في المادة شبه الموصلة السالبة حيث ان



الشكل -11- تغيرتركيز الالكترونات مع المسافة في شبه الموصل

$$J_{Dn} = e\, D_n \frac{dn}{dx} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (17)$$

وتسمى D_n بثابت التناسب وتكون مساوية لـ $\frac{KT}{e}\mu_e$

كذلك فان كثافة تيار الفجوات الناتجة عن انتشار الفجوات J_{Dp} تتناسب طرديا مع انحدار التركيز لهذه الفجوات في المادة شبه الموصلة الموجبة حيث ان

$$J_{Dp} = -\, e\, D_p \frac{dp}{dx} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (18)$$

حيث يمثل D_p ثابت التناسب ويكون مساويا لـ $\frac{KT}{e}\mu_p$ وتأتي الاشارة السالبة اعلاه بسبب ان اتجاه سريان الفجوات هو في الاتجاه المعاكس لتيار انتشار الفجـوات بينما يكون تيار انتشار الالكترونات في نفس اتجاه سريان الالكترونات .

مما تقدم يتبين لنا انه في حالة تسليط مجال كهربائي على شبه موصل يحمل انحدارا في تركيز الشحنات بداخله فان نوعين من التيار سوف يسريان فيه هما : تيار الانسيـاق وتيار الانتشار وعليه فان كثافة التيار الكلي (J_n) الناجمة عن الالكترونات على سبيـل المثال ، هي .

$$J_n = J_e + J_{Dn} = ne\,\mu_e E + e D_n \frac{dn}{dx} \qquad \text{..... (19)}$$

وكذلك الحال بالنسبة لكثافة التيار الكلي (J_p) الناجمة عن الثقوب

$$J_p = J_h + J_{Dp} = pe\,\mu_h E - e D_p \frac{dp}{dx} \qquad \text{..... (20)}$$

اسئلة ومسائل

1)عدد أهم العناصر شبه الموصلة

2) ما المقصود بشبه الموصل الذاتي والشائب

3) ما المقصود بتيار الحمل وكيف يختلف عن تيار الانتشار

4) لماذا يتصرف شبه الموصل النقي في درجة حرارة الصفر المطلق وكأنه عازل ؟

5) في نفس درجة الحرارة حدد أي بلورة هي الأكفأ في التوصيل من الأخرى ، بلورة الجرمانيوم النقي أو بلورة السليكون النقي، مع ذكر سبب ذلك ؟

- ما هي الفجوة Hole ، مع تحدد طريقتين لإنتاجها ؟

6) ما الظروف التي تصبح عندها الحاملات الاقلية اكبر عددا من الحاملات الاكثرية ؟

7) وضح ما دور الحاملات الاقلية في شبه الموصل من نوع N . وضح كذلك كيف يتم توليد الحاملات الاقلية في النوع P .

8) اشرح الاسس لنظرية الحزم المعتمدة للتفريق بين الموصلات والعوازل .

9) اشتق علاقة لكثافة (أ)الالكترونات في حزمة التوصيل (ب) الفجوات في حزمة التكافؤ في شبه الموصل .

10) برهن على ان مستوى فيرمي يقع في منتصف فجوة الطاقة في اشباه الموصلات النقية

11) ماشبه الموصل الشائب ؟ وضح الفرق بين نوع P ونوع N .

12) عرف الحركية للشحنات وبين علام تعتمد ؟

13) وضح لماذا يمتلك شبه الموصل الشائب معامل مقاومة موجباً بينما يمتلك شبه الموصل الذاتي معامل مقاومة سالبا مع زيادة درجة الحرارة ؟

14) هل تغير الذرات الشائبة من مقاومة المواد شبه المو صلة ؟ كيف ؟ ولماذا ؟

15) ما شرط الحصول على تيار الانجراف

16) اذكر الشرط الضروري لتوليد تيار الانتشار

17) ما العوامل التي تحدد عدد الشحنات الحرة في المواد

18) ارسم الشكل التخطيطي لمخطط طاقة الحزم للسيلكون في درجة حرارة الصفر المطلق عند درجة حرارة الغرفة

19) اذا كانت الايونات الموجبة لاتستطيع الحركة فكيف تفسر وجود تيار الفجوات ؟

20) ما العملية المعاكسة لعملية توليد ازواج الكترون – فجوة ؟ وضح ذلك

21) ايهما اكبر حركية الالكترونات ام الفجوات ولماذا ؟ وضح ذلك

- ما هو المصطلح الذي يصف دمج الفجوة مع الإلكترون الحر، مع ذكر اسمه باللاتينية ؟

22) وضح بالتفصيل كيفية تكون حاجز الجهد في وصلة الـ PN

23) نصف موصل نقي من الجرمانيوم يمتلك مقاومية 0.45 اوم – متر . احسب كثافة حاملات الشحنات (الالكترونات والفجوات) اذا كانت الحركية لهذه الحاملات هي $0.39\ m^2/V$ و $0.19\ m^2/V$ وعلى التوالي

24) نصف موصل من نوع N من الجرمانيوم يمتلك توصلية $200v / m$. افرض ان حركية الالكترونات هي $0.39\ m^2 / V$. احسب كثافة الذرات الشائبة

25) اذا كانت كثافة الالكترونات الحرة في الجرمانيوم النقي عند $300\ k^\circ$ هي $2.4 \times 10^{19} / m^3$ ما مقاومة قضيب من الجرمانيوم ابعاده 1 و 2 ملمتر و 1 سم .

26) اذا كانت كثافة الالكترونات الحرة في السيلكون النقي هي $1.7 \times 10^{16} / m^3$. احسب مقاومة قطعة من السيلكون طوله 1 و 2 مليمتر و 1 سم.

27) استخدم النتائج في السؤالين اعلاه لحساب النسبة بين مقاومية السيلكون الى مقاومية الجرمانيوم عند درجة الحرارة 300 .

28) احسب النسبة بين عدد الذرات في الجرمانيوم الى ازواج الالكترون – فجوة عند درجة حرارة الغرفة . كذلك احسب المقاومة الذاتية (عدد ازواج الالكترون – فجوة هي $2.4 \times 10^{19}\ m^{-3}$ عند $300\ k^\circ$) .

جمهورية العراق – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سومر– كلية التربية الاساسية – قسم العلوم الطبيعية – فرع الفيزياء

محاضرات في الالكترونيات

Lectures in Electronics

المحاضرة الثالثة :

مقدمة في الثنائي البلوري

Introduction to Crystal Diode

مدرس المادة : م.م. فؤاد نمر عجيل

المحتويات:

١. ثنائي الوصلة PN Junction Diode

٢. منطقة الاستنزاف Depletion Layer

٣. الجهد الحاجز Potential Barrier

٤. وصلة PN في حالة الاستقرار PN Junction in The Stability Case

٥. حساب الجهد الحاجز Calculate the Potential Barrier

٦. وصلة PN تحت تاثير جهد انحياز خارجي PN under the influence of an external bias voltage

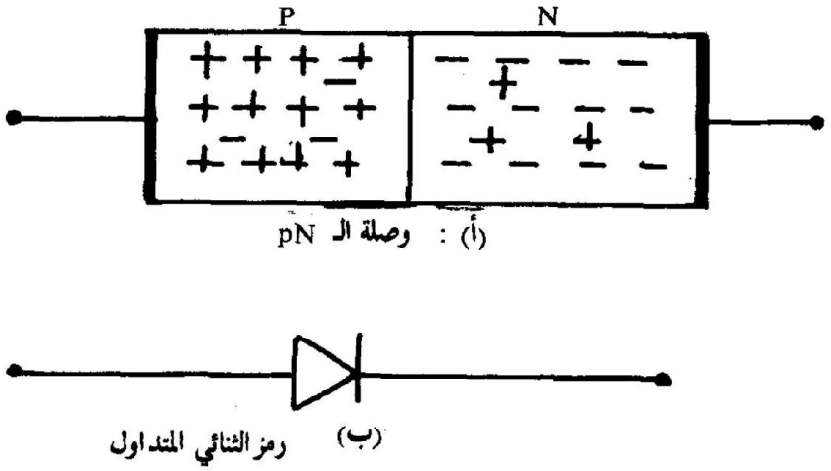
٧. اسئلة ومسائل حول المحاضرة Questions about the lecture

الثنائي البلوري Crystal Diode

ان دراسة هذه الثنائيات ليس ضروريا فقط للتعرف على تطبيقاتها الكثيرة التي سنأتي عليها في فصل لاحق وانما ايضا لان فهم عمل هذه الثنائيات ، وعلى وجه الخصوص ثنائي الوصلة pN ، هو ضروري لفهم عمل الترانزستور الذي يشكل اساس الهندسة الالكترونية الحديثة

1- ثنائي الوصلة pN Junction Diode : PN

يتم الحصول على ثنائي الوصلة pN عند جمع combine النوعين، السالب والموجب من شبه الموصل الى بعضهما . ولا يقصد بالجمع هنا ، تقريب احد النوعين الى النوع الاخر بحيث يتلامسا وانما يقصد به ان كلا النوعين من المادة شبه الموصلة السالبة والموجبة ، يتم تصنيعهما على بلورة واحدة من مادة نصف موصلة ، بحيث يصبح احد نصفيها سالبا والنصف الاخر موجباً وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصفي البلورة . يبين الشكل (1أ) ثنائي الوصلة pN اواختصاراً بالثنائي diode ويرمز له عادة بالشكل (1 ب)



(أ) : وصلة الـ pN

(ب) رمز الثنائي المتداول

الشكل (١)

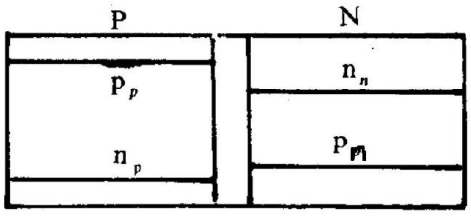
2- منطقة الاستنزاف depletion layer :

عند جمع نصفي وصلة الـ P N بالطريقة المذكورة اعلاه وبسبب ان تركيز حاملات الشحنة في اي من النوعين (الالكترونات في النوع السالب والفجوات في النوع الموجب)

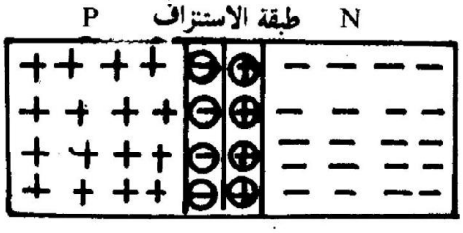
هواكبر بكثير مما هوفي النوع الاخر مما يشير الى عدم وجود انتظام في توزيع اي من هذه الحاملات عبر الوصلة او بعبارة أخرى وجود تحدر في تركيز الالكترونات $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ في المنطقة السالبة وكذلك تحدر في تركيز الثقوب $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ في المنطقة الموجبة أنظر الشكل (2) . يلاحظ في هذا الشكل وصلة PN يحدث عبرها تغيراً فجائياً من النوع P الى النوع N وبالعكس وتسمى هذه الوصلة أحيانا بالوصلة الفجائية aburpt Junction . ان وجود مثل هذا التحدر سيؤدي بالتالي الى انتقال (او انتشار) بعض الالكترونات الى المنطقة الموجبة عبر الحد في شبه الموصل وكذلك بعض الثقوب في الاتجاه المضاد .

ان عبور الالكترونات الى المنطقة P سوف يجعل منه حاملا اقليا وبوجود الاعداد الكبيرة من الفجوات حوله يكون زمن بقائه قصيراً ، فحال دخوله المنطقة P يسقط في فجوة وعندما يتم هذا فان الفجوة تختفي ويصبح الالكترون الحر الكترونا تكافؤيا . كذلك هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة الى المنطقة N حيث تقوم باقتناص الكترون حر من بين الاعداد الكبيرة المحيطة بها .

ان انتشار الحاملات وانتقالها من جهة الى اخرى لايعني انتقال الذرات الأم التابعة لها ، ذلك لان هذه الاخيرة تكون مرتبطة مع مثيلاتها من الذرات الاخرى بأواصر تساهمية يصعب كسرها ، وانما يؤدي الى تكون شحنتين مختلفتي الاشارة على جانبي الحد الفاصل ، في وصلة الـ pN ، بسبب من تخلف الايونات الموجبة في المنطقة N والايونات السالبة في المنطقة P انظر الشكل (3) .



الشكل (٢) : – وصلة فجائية



الشكل (٣) : وصلة الـ pN مع طبقة الاستنزاف

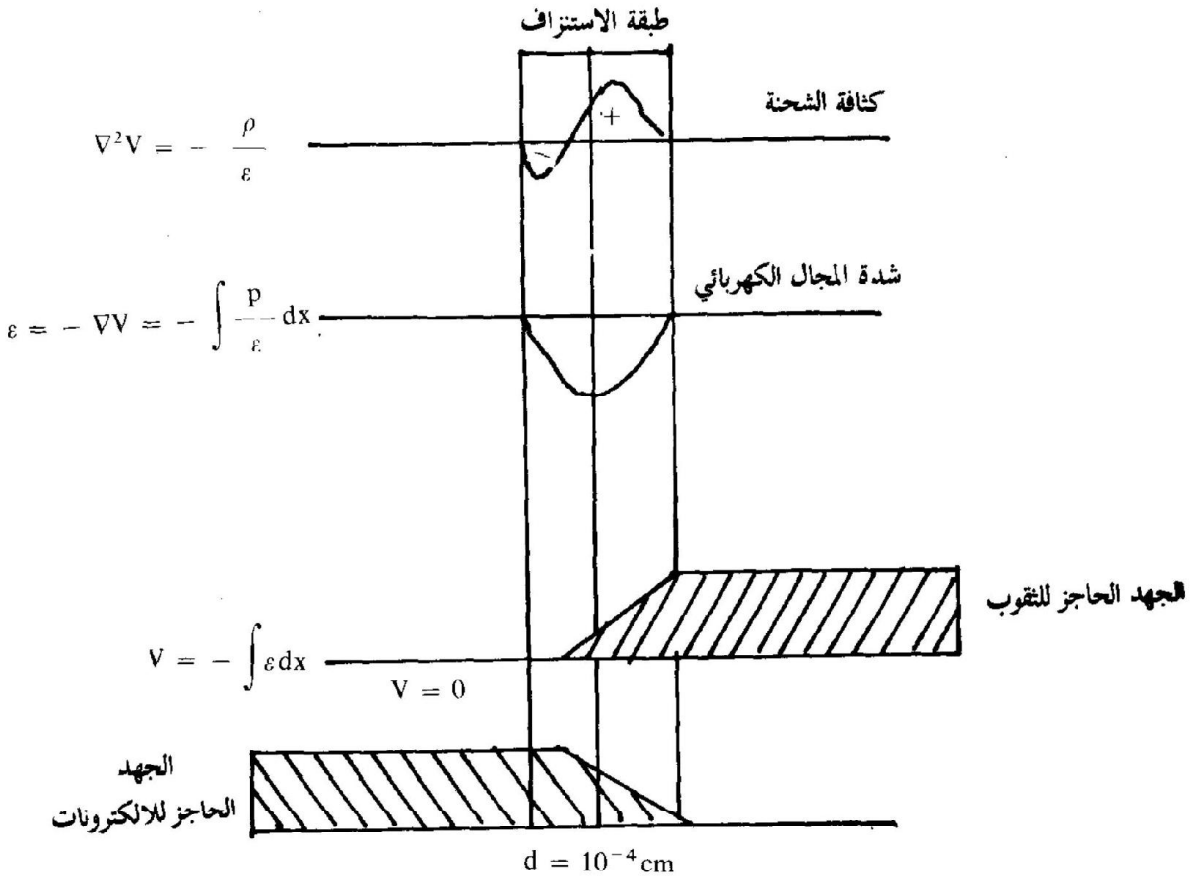
ان كل زوج متكون من الايون الموجب والسالب في الشكل (3) يدعى بثنائي القطب dipole ، وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني ان الكترونا واحدا من الكترونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفا عن التجوال وبتزايد اعداد هذه الثنائيات القطبية تخلى المنطقة المتاخمة للحد الفاصل بين وصلتي الـ pN ، من الشحنات المتحركة وتدعى هذه المنطقة الخالية من الشحنات بطبقة الاستنزاف depletion leuyer – انظر الشكل (٣) .

ومن الجدير بالذكر ان معظم مقاومة وصلة الـ pN تتركز في منطقة الاستنزاف حيث تكون مقاومتها كبيرة بالمقارنة مع بقية اجزاء شبه الموصلين P و N .

3- الجهـد الحاجـز : The potential barrier

من المعروف ان وجود شحنتين مختلفتين ومفصولتين عن بعضهما بمسافة سوف يعمل على خلق مجال كهربائي يؤدي بدوره الى احداث جهد كهربائي (V_B) عبر وصلة الـ PN يعمل على اعاقة انتشار الحاملات في كلا الاتجاهين ويسمى بالجهـد الحاجـز potential barrier . يوضح الشكل (٤ ب) تغير شدة المجال الكهربائي حول حدود الوصلة بينما يبين الشكل (٤ ج) الجهد الذي يحجز أو يعيق انتقال ثقوب اكثر ، اما الشكل (٤ د) فيشير الى الجهد الحاجز للالكترونات وعليه فان الشكلين الاخيرين يبدوان كمرتفعين او تلين احداهما يعيق مرور او تسلق الالكترونات والاخر يعيق تسلق الفجوات ولذلك يدعى كل منهما احيانا بمرتفع الجهد potential hill وتكون قيمته في غضون بضع اعشار الفولت .

ومن الجدير بالذكر ان ازدياد تركيز الشوائب يؤدي الى ازدياد تركيز الحاملات الاكثرية ومن ثم تزداد اعدادها التي تنتشر عبر الحد الفاصل وبالتالي تنمو كثافة الشحنة المتخلفة ويزداد لذلك قيمة الجهد الحاجز اي يزداد ارتفاعه ويصاحب ذلك تناقص في سمك منطقة الاستنزاف ويرمز لهذا السمك عادة بالرمز d ، وبالنسبة الى الجرمانيوم مثلا ، وعند القيم المتوسطة لتركيز الشوائب ، تتراوح قيمة V_B مابين 0.2 الى 0.3 فولت و d مابين 10^{-5} الى 10^{-4} سم . اما عند قيم التركيز الاعلى التي تستخدم في بعـض الحالات ، فيكون V_B مساويا لـ 0.7 فولت و d مساويا لـ 10^{-6} سم .



الشكل (٤) : – كثافة الشحنة وشدة المجال الكهربائي والجهد الحاجز في منطقة الاستنزاف في وصلة الـ pN

4- وصلة الـ PN في حالة الاستقرار

ذكرنا انفا ان وجود التحدر في تركيز الالكترونات والفجوات عبر الوصلة PN سيعمل على انتشار هذه الحاملات الاكثرية عبر الوصلة . ان انتقال الحاملات الاكثرية نتيجة للانتشار سوف يؤدي الى احداث تيار الانتشار وفقا لمعادلة الانتشار الاتية :

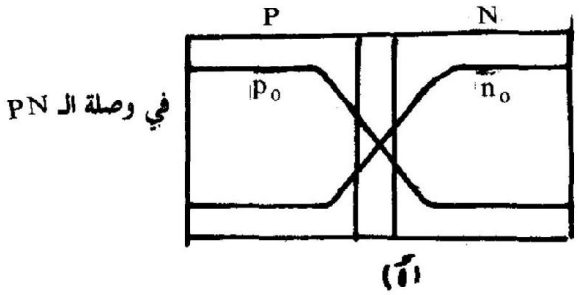
$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \qquad \ldots (1)$$

حيث يمثل J_e كثافة تيار الانتشار الناتج عن الالكترونات التي تنتشر من الجانب N الى الجانب P ويمثل D_e ثابت الانتشار للالكترونات ويقاس بالمتر المربع لكل ثانية هناك معادلة مشابهة بالنسبة لكثافة انتشار التيار الناتج عن الثقوب

$$J_h = - qD_h \frac{dp}{dx} \qquad \ldots (2)$$

حيث يعني وجود الاشارة السالبة ، في المعادلة اعلاه الى ان حركة الفجوات تكون بعكس حركة الالكترونات وعليه فان محصلة كثافة تيار الانتشار في وصلة الـ PN تكون مساوية لـ

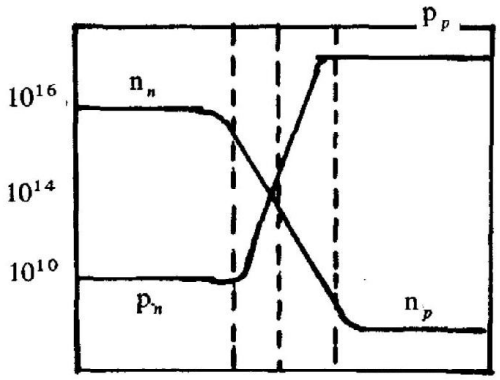
$$J_d = J_e + J_h = q\left(D_e \frac{dn}{dx} + D_h \frac{dp}{dx} \right) \qquad \ldots (3)$$



الشكل (٥ أ)

على الرغم من اننا ذكرنا ان التغير من النوع P الى النوع N يكون فجائيا ، انظر الشكل (2) ، الا ان عملية انتشار الحاملات الاكثرية عبر هذه الوصلة سوف يؤثر على قيمة الانحدار الكثافي لهذه الحاملات عبر الوصلة ويصبح الانحدار الكثافي منحنيا ومتدرجا – انظر الشكل (5) – بدلا من كونه فجائيا ويوضح الشكل (5 ب) توزيع تركيز الحاملات في وصلة الـ PN في الجرمانيوم . ونظراً لاختلاف تركيز الحاملات الاكثرية والاقليه بملايين المرات فقد رسم المحور الرأسي الذي يمثل تركيز الالكترونات والفجوات بمقياس لوغاريتمي . وعادة مايختلف تركيز الشوائب في المنطقتين N و P ، ويقابل الشكل هذه الحالة بالذات ويلاحظ ان تركيز الحاملات الاكثرية والاقلية في شبه الموصل السالب هما : $n_n = 10^{16}\,cm^{-3}$ و $n_p = 10^{10}\,cm^{-3}$ وفي شبه الموصل الموجب هما $p_p = 10^{18}\,cm^{-3}$ و $p_n = 10^{8}\,cm^{-3}$

من جهة أخرى فأن وجود الجهد الحاجز والناتج بسبب من عملية الانتشار ، سوف يعمل على تحريك الحلاملات الاقلية في كل من المنطقتين N و P مؤديا بذلك الى احداث تيار يسمى بتيار التوصيل . وحيث ان الحاملات الاقلية ، تتكون هي الاخرى ، من نوعين : الالكترونات والفجوات ، لذا فان تيار التوصيل يتكون هو الاخر من مركبتين هما :



الشكل (٥ ب) : – تركيز الحاملات في الجرمانيوم

كثافة تيار التوصيل للالكترونات

$$J'_e = \sigma_e E = qn\mu_e E \qquad \ldots (4)$$

وكثافة تيار التوصيل للفجوات

$$J'_h = \sigma_h E = qp\mu_h E \qquad \ldots (5)$$

حيث يمثل n و p عدد كل من الالكترونات والفجوات الاقلية وعلى التوالي بينما تمثل μ_e و μ_h حركية كل من الالكترونات والفجوات .

وعند جمع المعادلتين (4) و (5) فان كثافة تيار التوصيل الكلي تكون مساوية لـ

$$J'_c = (\sigma_e n + \sigma_p p)\, qE \qquad \ldots (6)$$

مما تقدم يتبين لنا ان محصلة التيار ، الساري في وصلة الـ PN يسبب من حركة الالكترونات ، تكون مساوية لتيار الانتشار+ تيار التوصيل اوبصيغة رياضية :

$$J_e + J'_e = qD_e \frac{dn}{dx} + qn\mu_e E \qquad \ldots (7)$$

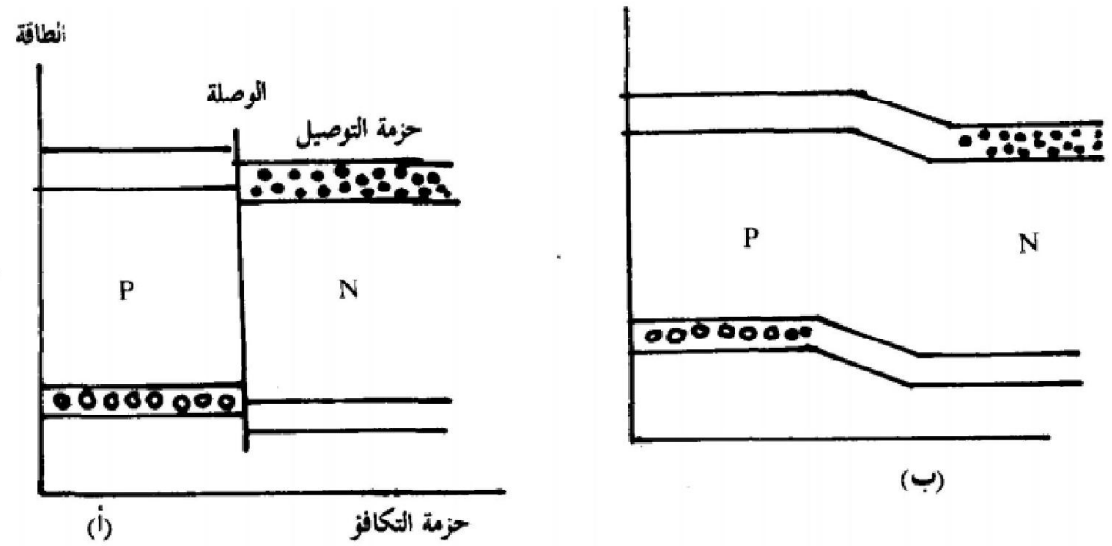
وكذلك بالنسبة لمحصلة التيار الناتج عن حركة الفجوات

$$J_h + J_h' = qp\mu_h E - qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (8)$$

على اية حال ، تكون محصلة التيار الكلي (J) في وصلة الـ PN ، في حالة انعدام الجهد الخارجي ، مساوية لمجموع تيار الانتشار وتيار التوصيل ، أوان

$$J = J_d + J_c \qquad \ldots (9)$$

في حالة التوازن الحركي لوصلة الـ pN يتساوى هذان التياران مقدراً ويتعاكسان اتجاها وبالتالي يكون التيار الكلي (J) المار خلال وصلة الـ PN مساويا للصفر. وهذا هو المفروض في حالة انعدام الجهد الخارجي او بكلمة اخرى أن الجهد الحاجز سيأخذ دائما تلك القيمة اوالوضع الذي يكفل التعادل بين تياري الانتشاروالتوصيل . لنفرض الان ان تيار الانتشار قد ازداد بسبب ارتفاع درجة الحرارة ان هذه الزيادة في تيار الانتشار معناها عبور عدد اكبر من الالكترونات الى جهة وكذلك عبور عدد اكبر من الفجوات الى منطقة N مؤدية بذلك الى زيادة عدد الايونات المتخلفة وبالتالي الى زيادة قيمة الجهد الحاجز . ان نمو ارتفاع الجهد الحاجز سوف يؤدي الى زيادة مقابلة في تيار التوصيل اي الى انتقال الحاملات الاقلية في الاتجاه العكسي وطالما ان $J_c < J_d$ يتواصل نمو ارتفاع الجهد الحاجز ، وفي نهاية المطاف ، ونتيجة لزيادة J_c يحدث الاتزان ($J_c = J_d$) ويتوقف نمو V_B .



الشكل (٦) : مخطط الطاقة (أ) قبل الانتشار (ب) بعد الانتشار

5- حساب الجهد الحاجز

ذكرنا ، انفا ، ان الجهد الحاجز يأخذ دائما تلك القيمة او الوضع الذي يكفل حصول التعادل بين تياري الانتشار او التوصيل ، ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا بجعل اي من المعادلتين (7) او (8) مساوية للصفر ، اي ان

$$q D_e \frac{dn}{dx} = - qn \mu_e E \qquad \dots (10)$$

او ان

$$\frac{dn}{n} = - \frac{\mu_e}{D_e} E \, dx \qquad \dots (11)$$

لدينا من معادلة انشتاين في الانتشار

$$\frac{De}{\mu_e} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{KT}{q} \qquad \dots (12)$$

وعند التعويض عن قيمة $\frac{D_e}{\mu_e}$ من المعادلة (12) في المعادلة (11) نحصل على

$$\frac{dn}{n} = - \frac{q}{KT} E \, dx \qquad \dots (13)$$

ويأخذ التكامل عبر الوصلة (الملتقى PN) اي على فرض ان عرض منطقة الاستنزاف $x_2 - x_1$ – انظر الشكل (5) – وكذلك من n_p الى n_n . حيث يمثل n_n عدد الالكترونات على حافة منطقة الاستنزاف في الجانب N من الوصلة و n_p عدد الالكترونات على حافة منطقة الاستنزاف في الجانب P من الوصلة . اي ان

$$\int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \frac{q}{KT} \int_{x_1}^{x_2} (- E) \, dx \qquad \dots (14)$$

لدينا ان $V = - \int E \, dx$ وعليه فان المعادلة (14) تصبح بعد اجراء التكامل بالصيغة

$$n_n = n_p e^{V_B/(KT/q)} \quad \ldots (15)$$

هذه المعادلة تمثل العلاقة بين كثافة الالكترونات عند حافة طبقة الاستنزاف في المنطقة N وكثافتها عند حافة الطبقة في المنطقة P من وصلة الثنائي . من جهة اخرى يمثل الاسس $V_{B/(KT/q)}$ نسبة قيمة حاجز الجهد الى معدل الطاقة للشحنات اوبعبارة اخرى هو مقياس لمعدل قدرة هذه الشحنات لعبور هذا الحاجز الجهدي .

وباتباع نفس الخطوات اعلاه يمكن الوصول الى نفس معادلة مشابهة للمعادلة (15) بالنسبة لكثافة الفجوات اي ان

$$P_p = P_n e^{V_B/(KT/q)} \quad \ldots (16)$$

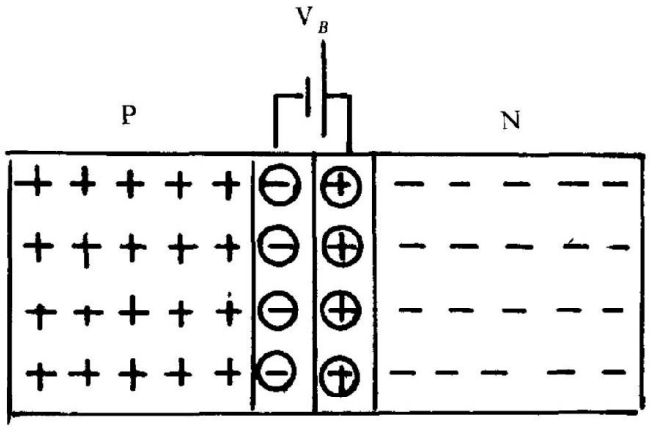
المعادلتين (15) و (16) تعرفان بمعادلتي بولتزمان Boltzman equations على أية حال عند وضع $n_n = N_D$ و $n_p = n_i^2 / N_A$ وتعويضهما في المعادلة (15) نحصل على

$$V_B = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad \ldots (17)$$

ان أهمية المعادلة (17) تكمن في حقيقة ان V_B قد تم حسابه بدلالة كثافة الذرات الثنائية التي سببت وجوده .

6- وصلة الـ pN تحت تأثير جهد انحياز خارجي :

عرفنا فيما سبق ، ان نشوء طبقة الاستنزاف عبر وصلةالـ PN يرافقه ظهور جهد حاجز V_B عند هذه الوصلة يعيق انتشار الحاملات الاكثرية ويعمل بذلك للوصول الى حالة الاتزان الحركي ليجعل من محصلة التيار المار في وصلة الـ PN ، مساوية للصفر . يبين الشكل (7) وصلة الـ PN مع الجهد الحاجز V_B والذي يكون مساويا لـ (0.7) فولت تقريبا عند درجة حرارة الغرفة (25°c) بالنسبة لشبه الموصل من السيلكون و 0.3 فولت بالنسبة لشبه الموصل من الجرمانيوم .

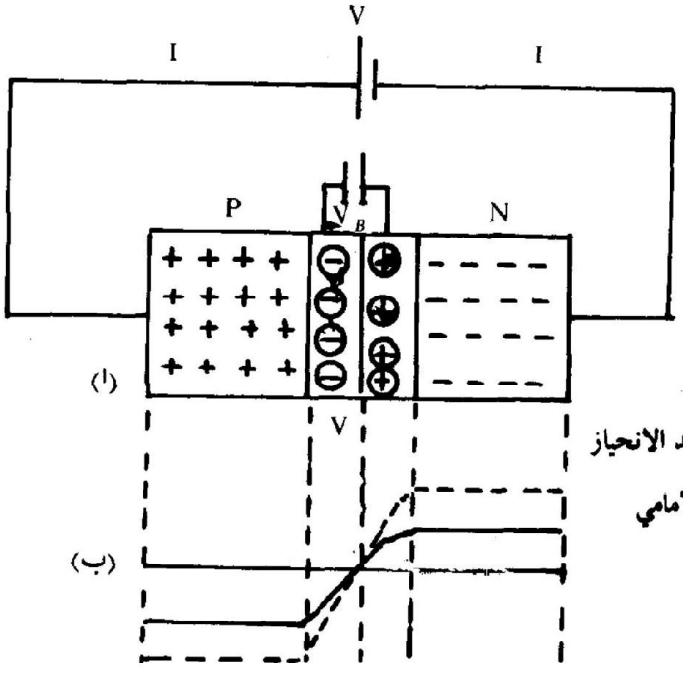


الشكل (٧) : وصلة الـ PN مع الجهد الحاجز V_B

الان اذا ما سلطنا جهداً خارجياً فان هذا الجهد سوف يكون اما مشابها لـ V_B ويسمى عندئذ بالانحياز العكسي او مخالفا لـ V_B ويدعى بالانحياز الامامي وسنقوم هنا بدراسة تأثير هذين النوعين من الانحياز على وصلة الانحياز وسنبدأ بـ .

أـ الانحيـاز الامامـي لوصلـة الـ Forword bias : PN

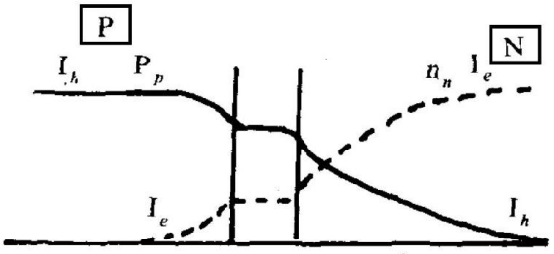
يتم الحصول على الانحياز الامامي لوصلة الـ PN بربط القطب الموجب لمصدر جهد خارجي الى شبه الموصل الموجب P والقطب السالب منه الى شبه الموصل السالب N – انظر الشكل (8 أ) .



الشكل (٨) (أ) وصلة الـ PN مع وجود جهد الانحياز
(ب) حالات الجهد مع وجود جهد الانحياز الامامي

ان المجال الكهربائي ، الناتج عن الجهد الخارجي المسلط على الملتقى PN ، سوف يؤثر في الاتجاه المضاد لمجال حاجز الجهد وبالتالي يقل الجهد عبر الملتقى PN ، اي ينخفض ارتفاع الحاجز الجهدي – انظر الشكل (8 ب) – وبنمو لذلك تيار الانتشار اذ تستطيع اعداد اكبر من الحاملات الاكثرية ان تجتاز الحاجز الجهدي المنخفض اما تيار التوصيل فلن يتغير تقريبا لانه يعتمد على عدد الحاملات الاقلية التي تعبر الملتقى PN من المنطقتين N و P بفضل سرعاتها الحرارية وبالتالي فان التيار الكلي المار خلال الملتقى لايكون مساويا للصفر .

على اية حال ، عندما تتحرك الفجوات من المنطقة P الى المنطقة N ، بسبب من التنافر بينها وبين القطب الموجب ، فانها تلتحم مع الالكترونات لتصبح هذه الاخيرة الكترونات تكافؤية وكلما توغلت في المنطقة N كلما زاد فرص التحامها مع الالكترونات ويقل عددها تبعا لذلك ، تدريجيا . ويحدث الشيء نفسه بالنسبة للالكترونات العابرة الى المنطقة P . انظر الشكل (9) .



الشكل (٩) : مركبات التيار في مرحلة الـ pN

ومن الجدير بالذكر ان تركيز الشوائب يكون مختلفا عادة في شبه الموصل الواحد ومن ثم يختلف تركيز الحاملات في المنطقتين N و P اختلافا كبيراً وبالتالي يكون الحقن بالحاملات من المنطقة ذات التركيز الاعلى هو الغالب . فاذا كان $p_p > n_n$ فان الحقن بالفجوات من المنطقة P الى المنطقة N يفوق الحقن بالالكترونات في الاتجاه المضاد بكثير ، كما هو الحال في الشكل (9) ، فان الالكترونات سوف يتم سحبها من عمق المنطقة N لتسقط في الفجوات وبالتالي فان اعداد الالكترونات العابرة ستكون صغيرة وتضمحل بسرعة عند مرورها في منطقة p الغنية بالفجوات .

على اية حال ، يقوم القطب السالب لمصدر الجهد الخارجي بتعويض الالكترونات الملتحمة مع الفجوات وبذلك يسري تيار في اسلاك التوصيل I . من جهة اخرى تتحول الالكترونات الساقطة في الفجوات من كونها الكترونات سائبة الى الكترونات تكافؤية وبالتالي فانها تفقد جزءاً من طاقتها .

على الرغم من ان جزءاً من هذه الطاقة المفقودة قد يتحول الى حرارة الا ان الجزء الاكبر منها سوف ينتقل الى الالكترونات التكافؤية للذرات الاخرى . وحيث ان التيار المار في الدائرة هو واحد ، لذا فانه يصبح من المعقول ان نفترض ان الالكترون التكافؤي العائد الى الذرة الاقرب الى القطب الموجب لمصدر الجهد الخارجي ، هو الذي يستلم هذه الطاقة المفقودة وبالتالي فان هذا الالكترون يصبح قادراً على الانفلات من ذرته ليتجه نحو القطب الموجب . وهكذا تتكرر العملية اعلاه طالما استمر تسليط الجهد الامامي .

على اية حال ، يمكن اعادة كتابة معادلة بولتزمان (المعادلة (15) و (16)) بالطريقة الآتيـة :

$$P_n = P_p e^{-qV_B/(KT)} \qquad \ldots (18)$$

و

$$n_p = n_n e^{-qV_B/(KT)} \qquad \ldots (19)$$

عند تسليط جهد انحياز V + على وصلة الـ pN فان الجهد الحاجز يصبح عندئـذ مساويا لـ $(V_B - V)$ وتصبح كثافة الفجوات مساوية لـ

$$P_n + \Delta P_n = P_p e^{-(V_B - V)/(KT/q)} = (P_0 e^{-V_B/(KT/q)}) e^{V/(KT/q)} \qquad \ldots (20)$$

هذه الزيادة في عدد الفجوات (ΔP_n) تكون بسبب ان فجوات اكثر أصبحت تمتلك الطاقة الكافية التي تمكنها من اجتياز حاجز الجهد الجديد والمختزل الى قيمة أقل . وبطبيعة الحال هذا يعود الى تسليط جهد الانحياز V . كذلك يزداد عدد الالكترونات في الجهة المقابلة من طبقة الاستنزاف بحيث ان :

$$n_p + \Delta n_p = n_n e^{-(V_B - V)/(KT/q)} = (P_p e^{-V_B/(KT/q)}) e^{V/(KT/q)} \qquad \ldots (21)$$

عند طرح المعادلة (18) من المعادلة (20) نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الفجوات

$$\Delta P_n = P_p e^{-V_B/(KT/q)} (e^{V/(KT/q)} - 1) \quad \ldots (22)$$

وبنفس الطريقة عند طرح المعادلة (19) من المعادلة (21)، نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الالكترونات

$$\Delta n_p = n_n e^{-V_B/(KT/q)} (e^{V/(KT/q)} - 1) \quad \ldots (23)$$

الان على فرض ان A تمثل مساحة الوصلة و v_h معدل سرعة الفجوات فان حاصل الضرب $\Delta P q v_h$ سوف يمثل مركبة التيار الناتج عن الفجوات المحقونة الى المنطقة N . أي أن

$$i_h = P_p q v_h e^{-V_B/(KT/q)} (e^{V/(KT/q)} - 1)$$

$$= B_h (e^{V/(KT/q)} - 1) \quad \ldots (24)$$

وبنفس الطريقة سوف نجد ان مركبة التيار الناتج عن الالكترونات المحقونة الى المنطقة P، تكون مساوية لـ

$$i_e = B_n (e^{V/KT/q)} - 1) \quad \ldots (25)$$

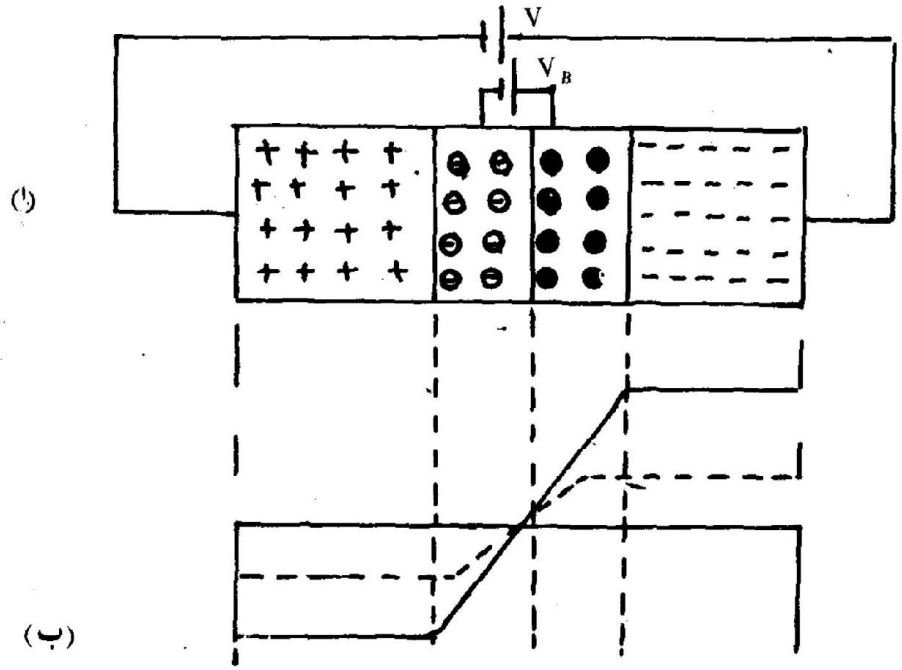
وبالتالي فان التيار الكلي يكون مساويا لـ

$$i = i_h + i_e = (B_h + B_e) (e^{V/(KT/q)} - 1) \quad \ldots (26)$$

ب- الانحياز العكسي لوصلة الـ pN

لنفرض الان ان الجهد الخارجي قد تم ربطه بحيث يؤثر في نفس اتجاه الجهد الحاجز، اي تم ربط القطب الموجب لمصدر الجهد الخارجي الى شبه الموصل السالب N والقطب السالب منه الى شبه الموصل الموجب P – انظر الشكل (10 أ) . في هذه الحالة يؤثر المجال الكهربائي الناتج عن تسليط الجهد الخارجي عبر الملتقى pN في نفس

اتجاه مجال الجهد الحاجز وبالتالي فان الحاملات الاكثرية (الفجوات والالكترونات) سوف تتحرك باتجاه نهايتي البلورة (بعيدا عن الملتقى PN) لتخلف وراءها الايونات السالبة والموجبة الاضافية ولهذا السبب يزداد عرض طبقة الاستنزاف كلما ازداد الانحياز العكسي – انظر الشكل (10 أ).



الشكل (١٠) : وصلة الـ pN مع جهد الانحياز العكسي

على الرغم من ان الجملة الاخيرة اعلاه صحيحة الا انها ليست دقيقة ذلك لانه يتوجب علينا ان نسأل : عند قيمة معينة لجهد انحياز عكسي ، الى اي حد يمكن ان يزداد عرض طبقته الاستنزاف ؟ وهل يمكن زيادة هذا الجهد العكسي الى ما لانهاية ؟ ان الاجابة عن الجزء الاول من هذا السؤال تتلخص على النحو الاتي : ان الالكترونات الهاربة سوف تخلف وراءها ايونات موجبة وتخلف الفجوات المغادرة ايونات سالبة وعليه فان الايونات الجديدة سوف تزيد من فرق الجهد على طبقة الاستنزاف وكلما زاد عرض طبقة الاستنزاف كبر فرق الجهد عبرها ويتوقف نمو طبقة الاستنزاف عندما يساوي فرق جهدها الجهد الخارجي العكسي المسلط عليها . اما بالنسبة للجزء الثاني من السؤال ، فان الاجابة عنه تكون بالنفي . ذلك لان الاستمرار في زيادة الفولتية العكسية سوف يؤدي ، كما ذكرنا ، الى زيادة الجهد الحاجز مما يعمل على زيادة اعاقة مرور حاملات التيار الاكثرية من جهتي الوصلة ولكنه يعمل في نفس الوقت على دفع حاملات التيار الاقلية

من ازواج الالكترونات والفجوات المنتجة حراريا في داخل منطقة الاستنزاف الى نهايتي البلورة ، الالكترونات الى اليمين والفجوات الى اليسار. انظر الشكل (10أ) – وبما ان الطاقة الحرارية تنتج ازواجا الكترون – فجوة ، قرب الوصلة ، باستمرار فهناك تيار صغير يسري باستمرار في الدائرة الخارجية .

يكون عدد حاملات التيار الاقلية هذه محدودا عند درجة حرارة معينة ، لذا فان زيادة الجهد السالب لن يؤدي الى زيادةالتيار العكسي لهذا السبب يدعى احيانا بتيار التشبع saturation current ويرمز له بـ I_s ، ولكنه يعمل بطبيعة الحال على تعجيل هذه الحاملات $\left(a = \frac{e}{m}\frac{V}{d} \right)$ م / ثا) ومن ثم زيادة سرعها بدرجة كبيرة .

وعلى وفق ذلك عليه فان زيادة جهد الانحياز العكسي عن حد معين (جهد الانكسار break down voltoge) سوف يعمل على اكساب هذه الحاملات طاقة كبيرة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات التكافؤ للذرات الاخرى عند اصطدامها بها . ان هذه الالكترونات الاخيرة قد تمتلك قدرا من الطاقة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات اخرى من الذرات الاخرى وبهذه الطريقة سوف نحصل على عدد من الالكترونات الحرة يتضاعف عددها بسرعة كبيرة جدا مؤديا الى ما يسمى بالانهيار الكهربائي electrical breakdown يعمل على الاخلال بالاستقرار الحراري لوصلة الـ PN . اوبعبارة اخرى ان كمية الحرارة التي يحصل عليها ثنائي الوصلة نتيجة التسخين بالتيار العكسي تصبح اكبر من كمية الحرارة المسحوبة من الملتقى ولذلك ترتفع درجة حرارة الملتقى وتقل مقاومته ويزداد التيار فيحدث تسخين زائد للثنائي ويتحطم حراريا ولهذا السبب فان معظم الثنائيات لايسمح لها ان تصل الى الانكسار اوبعبارة اخرى ان الجهد العكسي المسلط على الثنائي يجب ان يبقى اقل من جهد الانكسار .

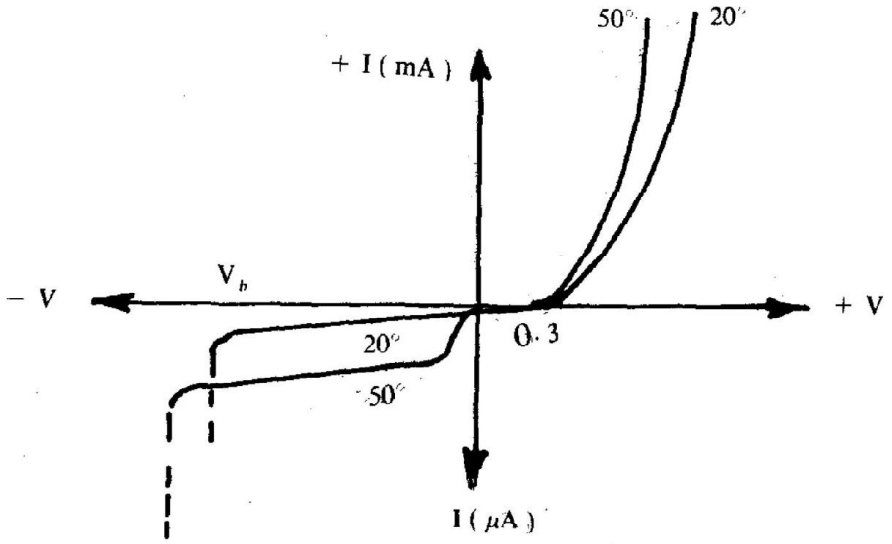
على اية حال ، عند التعويض في المعادلة (26) عن(V) بـ $-(V_B + V)$ فان الحد $e^{-qV/KT}$ سوف يصبح صغيرا الى الحد الذي يمكن اهماله . اي ان

$$i = I_s = -(B_h + B_e) \qquad \ldots (27)$$

وبالتالي فان معادلة الفولتية – التيار للثنائي البلوري تصبح على الشكل الاتي :

$$i = I_s (e^{-qV_p/KT} - 1) \qquad \ldots (28)$$

حيث يمثل I_s ، وكما ذكرنا ، تيار التشبع العكسي الناتج عن حركة ازواج الالكترون – فجوة المنتجة حراريا – لذا فان رفع درجة حرارة الوصلة سيؤدي الى زيادة عدد ازواج حاملات التيار الاقلية المتولدة ، اي يزداد تركيز هذه الحاملات وتنمو التوصلية وبالتالي فان خصائص الثنائيات شبه الموصلة تعتمد على درجة الحرارة كثيرا ويتضح ذلك جيدا من منحنى (I – V) للثنائي البلوري ، الشكل (11) ، المرسوم طبقا للمعادلة اعلاه والمأخوذ عند درجتي حرارة مختلفتين لثنائي بلوري من الجرمانيوم.



الشكل (١١) : – منحنى (I – V) للثنائي

يلاحظ في الشكل (11) نمو التيارين الامامي والعكسي عند رفع درجة الحرارة الى ان نسبة زيادة التيار العكسي تكون اكبر. ففي الجرمانيوم يتضاعف التيار العكسي مرتين تقريبا في كل مرة ترتفع فيها درجة الحرارة بمقدار 10°م ، فعلى سبيل المثال اذا ارتفعت درجة الحرارة من 20 م الى 70 م فان I_s يتضاعف e^5 اي 32 مرة ، اما في السيليكون فان الطاقة الحرارية تنتج الحاملات الاقلية باعداد أقل مما تنتجه في ثنائيات الجرمانيوم اوبعبارة اخرى ، ان I_s في السيلكون يقل بكثير عنه في ثنائي الجرمانيوم . هذه الميزة العظيمة للسيلكون هي أحد الاسباب التي جعلته يسود في مجال شبه الموصل.

من جهة اخرى يلاحظ في الشكل (11) ، ان التيار الامامي لاينمو عند رفع درجة الحرارة بنفس القوة التي ينمو بها التيار العكسي والسبب في ذلك هو ان التيار الامامي يعتمد أساسا على تركيز الشوائب (الواهبة والقابلة) ولا علاقة له بدرجة الحرارة ، الا ان رفع درجة الحرارة يزيد وكما ذكرنا ، من تيار التشبع I_s وبالتالي فان ارتفاع الجهد الحاجز يجب ان يقل ليسمح عندئذ للحاملات الاكثرية بالانتشار للوصول الى حالة الاتزان الحركي على فرض ان الجهد الخارجي المسلط يساوي صفراً ، وبالتالي فانه يمكن القول ان انخفاض الجهد الحاجز مع ارتفاع درجة الحرارة هو السبب المباشر وراء زيادة التيار الامامي .

ومن الجدير بالملاحظة في الشكل (11) ان التيار الامامي لايبدأ بالسريان الا عند جهد معين يدعى بجهد العتبة threshold voltage او جهد القطع ويكون مساويا لـ 0.2 الى 0.3 فولت في الجرمانيوم وفي حدود 0.5 الى 0.7 فولت في السيلكون . ان هذا الفرق بين جهدي القطع (0.4 فولت) يعود سببه الى تيار التشبع العكسي . ففي الجرمانيوم يكون هذا التيار اكبر مما هو عليه في السيلكون بحوالي الف مرة . فبينما تقدر قيمته في الجرمانيوم بالمايكروأمبير ($1\ \mu A = 10^{-6} A$) نجد ان قيمته في السيلكون تكون بالنانو امبير ($1nA = 10^{-9} A$) .

كذلك يلاحظ في الشكل (11) ، ان فولتية الانكسار تبدأ عند قيمة أعلى عند ارتفاع درجة الحرارة . لماذا ؟ .

مثـال :

اذا كان تيار الاشباع I_s يتغير من 10^{-14} الى 10^{-9} عند تغير درجة الحرارة من 20° الى 125° م . فأحسب V_B في كلا الحالتين على فرض ان التيار الامامي يبقى ثابتا عند القيمة (1mA) .

لدينا من المعادلة ان

$$I = I_s (e^{-qV_B/KT} - 1)$$

او ان

$$\frac{I}{I_s} = e^{-qV_B/KT} - 1$$

او ان

$$\ln\left(\frac{I}{I_s}\right) = -\frac{q V_B}{KT}$$

وحيث ان $T = 20 + 273 = 293°K$ لذا فان :

$$\frac{KT}{q} = 25\ mV$$

وبالتالي فان

$$V_B = 25 \log\left(\frac{I}{I_s}\right) = 25 \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-14}}\right) = 633\ mv \quad \ldots$$

عند $T = 273 + 125 = 388°K$ تصبح قيمة $\frac{KT}{q}$ مساوية لـ 34 ملي فولت
وبالتالي فان

$$V_B = 34 \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-9}}\right) = 460\ mv$$

وعليه فان V_B يقل مع زيادة درجة الحرارة على الرغم من ثبات التيار الامامي (ثبوت جهد الانحياز الامامي) .

اسئلة ومسائل

1) لماذا لاتعد المادة شبه الموصلة من نوع N او نوع – P ذات فائدة عملية ؟
2) اشرح بالتفصيل كيفية نشوء طبقة الاستنزاف في وصلة الـ pN
3) ما سبب تركز مقاومة وصلة الـ pN في منطقة الاستنزاف ؟

4) ما المقصود بالوصلة الفجائية ؟ وضح ما تقول
5) اشرح بالتفصيل ما المقصود بحاجز الجهد ؟ بين كيف يتم حدوثه
6) ما المقصود بتيار الانتشار ؟ وكيف يتم حدوثه ؟
7) في الشكل (٦أ) اشرح سبب ظهور حزمة P اعلى قليلاً من حزمة n ؟
8) اشتق المعادلة (١) ثم بين معناها
9) وضح ما دور الفجوات في شبه الموصل .
10) ما مقدار التيار المار في وصلة الـ pN في حالة التوازن الحركي ؟ وضح ذلك
11) هل يعتمد عدد حاملات الشحنات الاقلية على درجة الحرارة ؟ وكيف ؟
12) برهن على صحة معادلة انشتاين – المعادلة (11) – ثم بين معناها .
13) اشتق المعادلة (17) ثم بين معنى كل رمز فيها
14) اشرح كيف ينشأ تيار التوصيل في كل من شبه الموصل النقي والشائب . ايهما اكبر ؟
15) ما علاقة تيار التوصيل بتيار الانتشار في شبه الموصل الثابت في حالة
أ – التوازن الحركي ب – عند تسليط جهد انحياز امامي جـ – جهد انحياز عكسي
16) ما تأثير كل من الانحياز الامامي والعكسي على ارتفاع حاجز الجهد ؟ وضح ذلك مع الرسم .
17) لماذا لايتغير تيار التوصيل عند تسليط جهد انحياز امامي على وصلة الـ pN
18) اشرح الكيفية التي يسري فيها التيار في دائرة ثنائي شبه موصل عند تسليط جهد انحياز أمامي
19) ما التيار العكسي ؟ هل يؤدي زيادة الجهد السالب على وصلة الـ pN الى زيادته ؟ وضح بالتفصيل
20) ارسم منحنى (V – I) موضحاً عليه كل النقاط المهمة
21) اشرح بالتفصيل تأثير درجة الحرارة على عمل وصلة الـ pN
22) اشتق المعادلة (34) ثم بين معناها .

23) في الشكل (13) لماذا اختيرت r_p بدلا من r_F ؟ ولماذا اضيفت R_s ؟

24) في الشكل (15) لماذا اضيف مصدر الجهد المستمر ؟ وضح ذلك

25) ما المقصود بخط الحمل وكيف يتم تعينه ؟ اذكر فائدته

26) ما المقصود بنقطة التشغيل ؟ وكيف يتم تعينها

27) اشرح بالتفصيل كيف يحدث انهيار زينر رقارن بينه وبين الانهيار الكهربائي

28) ما تأثير ارتفاع درجة الحرارة على قيمة V_z ؟ اشرح بالتفصيل

29) ما تأثير زيادة التطعيم على قيمة V_z ؟ اشرح بالتفصيل

30) اشرح بالتفصيل كيف يسري التيار في الثنائي النفقي

31) لماذا يستخدم الثنائي النفقي في توليد الذبذبات ذات الترددات العالية جدا ؟

32) اشرح الكيفية التي يسري فيها التيار في الثنائي النفقي مع زيادة الفولتية .

33) اذا كان ثابت التناسب (A) في المعادلة هي 5×10^{21} فما قيمة n_i لكل من السيلكون والجرمانيوم عند درجة حرارة $300^\circ K$

34) تم اضافة شوائب من ذرات انتيمون بنسبة ذرة واحدة انتيمون الى مليون ذرة جرمانيوم . احسب كثافة الالكترونات الحرة الموجودة في شبه الموصل بعدالاضافة كذلك احسب كثافة الفجوات عند الاستقرار قبل وبعد اضافة هذه الشوائب .

35) احسب قيمة التوصلية σ_i لقطعة شبه موصل من Ge عندما تكون نسبة الذرات الواهبة ذرة واحدة الى 10^7 ذرة جرمانيوم

36) يتم اضافة شوائب من ذرات البورون بنسبة ذرة بورون لكل 10^6 ذرة جرمانيوم احسب كثافة الالكترونات الحرة الموجودة في شبه الموصل بعد الاضافة ثم احسب كثافة الفراغات كذلك احسب التوصلية .

37) اذا كان $I_s = 10^{-14}$ A عند 10^{-9} A, 25°C] عند درجة حرارة 125°C . احسب قيمة الجهد عبر الثنائي عند درجة الحرارة 25°C و 125°C علما بان قيمة التيار المار في كلا الحالتين هو 1mA

38) اذا كانت مقاومية النحاس عند درجة حرارة 20°C هي $1.7\times10^{-8}\ \Omega m$ جد معدل سرعة الانجراف في سلك النحاس اذا كانت مساحة مقطعه العرضي هي $10^{-6}\ m^2$ ويحمل تيارا قدره (4A) (الوزن الذري للنحاس 63.3 وكثافته هي 8.9 gm/cm³)

$1.7 \times 10^{-8}\ \Omega - m$

39) احسب المقاومية الذاتية لكل من السيلكون والجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة ماذا يحدث لهذه المقاومية لو اضيف الى كل منهما شوائب من الانتيمون بنسبة

$10^6 : 1$ ذرة شبه موصل

40) اذا كان التيار المار في دائرة ثنائي بلوري من الجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة وفولتية 1V هو $100\ \mu A$. احسب قيمة التيار عند الفولتيات $0{\cdot}2 -$ و $0{\cdot}2 +$ عند نفس درجة الحرارة وعند درجة حرارة 40° .

41) اذا كان تيار التشبع العكسي في دائرة ثنائي بلوري هو ($2\ \mu A$) عند الفولتية ($-1V$) فما الفولتية الامامية اللازمة لاحداث تيار قدرة $100\ mA$ علما بان مقاومة الثنائي هي $15\ \Omega$

42) في وصلة الـ pN من الجرمانيوم تنخفض كثافة الفراغات من $10^{21} m^{-3}$ الى $0{\cdot}9 \times 10^{21}\ m^{-3}$ عبر مسافة قدرها $2\mu m$. احسب تيار الانتشار العائد الى الفجوات في الوصلة عند درجة حرارة الغرفة .

43) اذا كانت المقاومة $R = \rho \frac{l}{A}$. اشتق علامة للمقاومية بدلالة كثافة الحاملات والحركية والشحنة .

جمهورية العراق – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سومر– كلية التربية الاساسية – قسم العلوم الطبيعية – فرع الفيزياء

محاضرات في الالكترونيات

Lectures in Electronics

المحاضرة الرابعة :

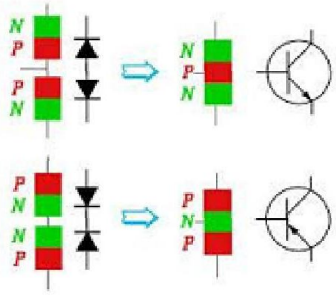
مقدمة في الترانزستور

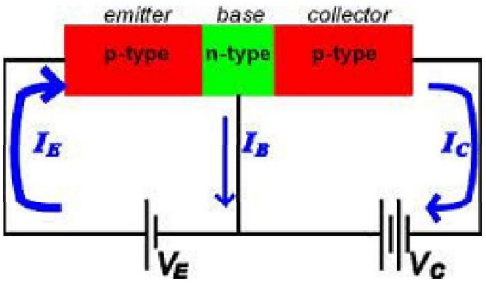
Introduction to Transistor

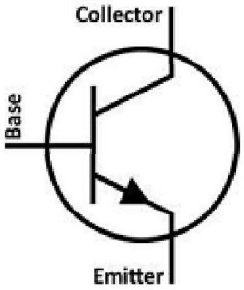
مدرس المادة : م.م. فؤاد نمر عجيل

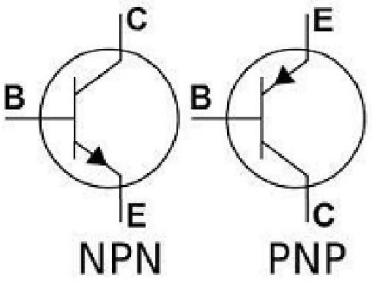
المحتويات:

1. تعريف الترانزستور
2. تحييز الترانزستور
3. مركبات التيار في الترانزستور
4. المميزات الاستاتيكية في الترانزستور
5. مميزة التوصيل بقاعدة مشتركة
6. بارامترات الترانزستور عند التوصيل بقاعدة مشتركة
7. مميزة التوصيل بباعث مشترك
8. بارامترات الترانزستور عند التوصيل بباعث مشترك
9. اسئلة ومسائل حول المحاضرة





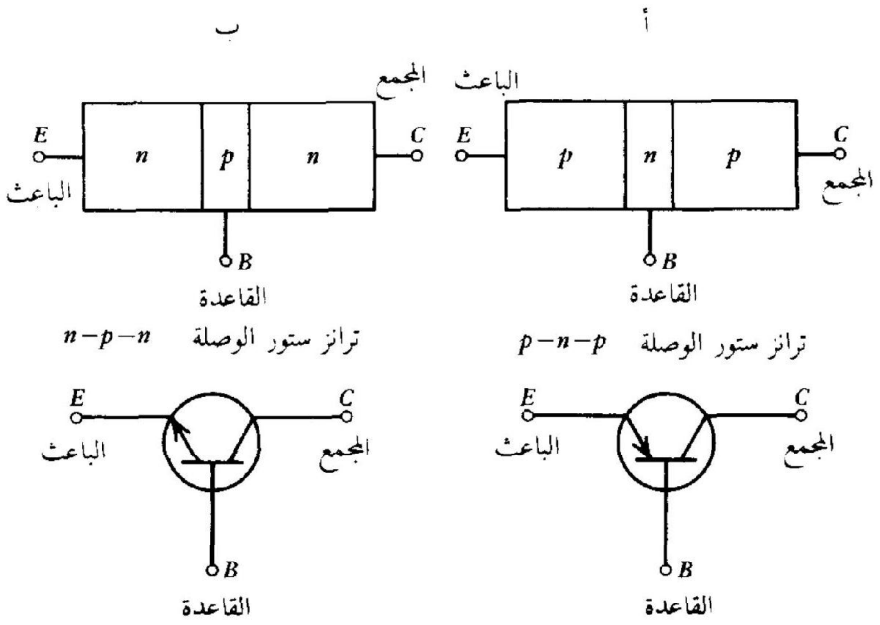




1- الترانزستور The Transistor

يتكون الترانزستور من قطعة واحدة من الجرمانيوم أو السليكون مقسمة إلى ثلاث مناطق ذات نوعية مختلفة بحيث تكون المنطقة الوسطى من نوع معين والمنطقتان الطرفيتان من نوع آخر . فإذا كانت المنطقة الوسطى من النوع الإلكتروني تكون المنطقتان الطرفيتان من النوع الثقبي (شكل (1 - أ)) ويسمى الترانزستور في هذه الحالة بالوصلة $p–n–p$ أما إذا كانت المنطقة الوسطى من النوع الثقبي تكون المنطقتان الطرفيتان من النوع الإلكتروني (شكل (1 - ب)) ويسمى الترانزستور في هذه الحالة بالوصلة $n–p–n$. وتسمى المنطقة الوسطى في كلا الحالتين بالقاعدة Base . أما المنطقتان الطرفيتان فتسمى إحداها بالباعث Emitter والأخرى بالمجمع Collector ويرمز للترانزستور عند أستخدامه كعنصر من عناصر الدارة الإلكترونية بالرمز المبين في الشكل 1 - جـ أو 1 - د إذا كان من النوع $p–n–p$ أو $n–p–n$ بالتتابع . ولتحديد الباعث يرسم عليه سهم يشير الى إتجاه التيار عندما يكون ملتقى الباعث ـــ قاعدة محيزاً تحييزاً مباشراً (أي عندما يمر تيار مباشر بين الباعث والقاعدة) ويتضح من هذا الشكل أن إتجاه التيار في الترانزستور $p–n–p$ يكون من الباعث إلى القاعدة (أي في إتجاه حركة الثقوب) . أما بالنسبة للترانزستور $n–p–n$ فيكون إتجاه التيار خارجاً من القاعدة إلى الباعث (أي عكس إتجاه حركة الإلكترونات) .

وعموماً يكون حجم الترانزستور صغيراً ويوضع داخل حافظة من البلاستيك أو المعدن محكمة القفل حتى لا يتعرض للرطوبة والعوامل الجوية الأخرى. وتتميز منطقة الباعث في كلا النوعين بتوصيلية عالية أي بنسبة تركيز

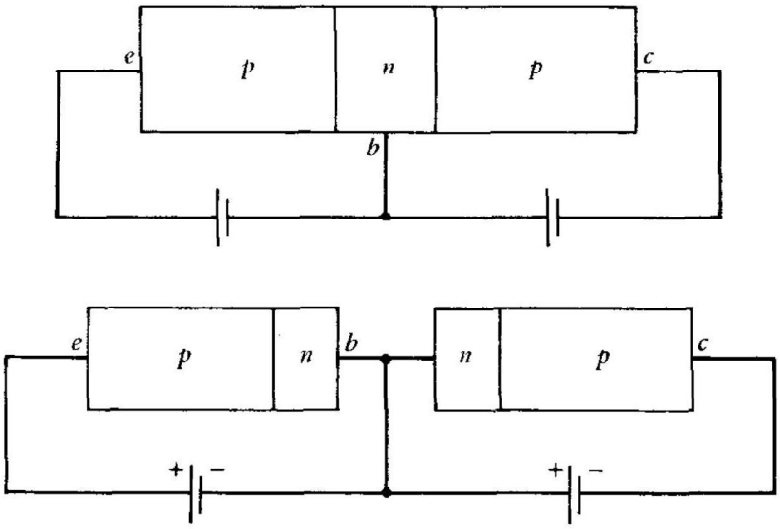


شكل (1)

عالية للشوائب ، في حين يتميز المجمع بتوصيلية ضعيفة أى بنسبة تركيز منخفضة للشوائب . أما القاعدة فتتميز بتوصيلية متوسطة ويكون عرضها صغير جداً (وقد رسمت مكبرة لغرض الإيضاح)•ويجب أن يكون عرض القاعدة أقل من متوسط الممر الحر (طول الإنتشار) للحاملات الأقلية فيها . ولما كان طول الإنتشار في حدود $١٠^{-١}$ سم فإنه يجب أن يكون عرض القاعدة في حدود $١٠^{-٣}$ سم .

2- تحييز الترانزستور The Transistor Biasing

سوف تقصر المناقشة على ترانزستور الوصلة $p–n–p$ أما بالنسبة للترانزستور $n–p–n$ فينطبق عليه نفس القول بعد تبديل دور كل من الإلكترونات والثقوب وكذلك تبديل إشارة الجهد اللازم للتحييز . وهكذا فإنه يمكن إعتبار أن ترانزستور الوصلة $p–n–p$ مكافئاً لثنائي وصلة $p–n$ يتبعه ثنائي آخر $n–p$ (شكل (2)) وذلك لإمكان إستخدام نفس النظريات والعلاقات الخاصة بثنائي الوصلة . لذا فإنه يلزم إستخدام منبعي جهد



شكل (2)

لتحييز الترانزستور . فإذا كان جهد المنبعين مساوياً للصفر يحدث الإتزان الديناميكي في كل من ملتقى الباعث — قاعدة وملتقى القاعدة — مجمع ، وتكون التيارات المارة عبر هذين الملتقيين مساوية للصفر . وبالتالي تكون تيارات كل من الباعث والقاعدة والمجمع مساوية للصفر . وعند إستخدام الترانزستور كعنصر في الدارات الإلكترونية ، يكون تحييز ملتقى الباعث — قاعدة تحييزاً مباشراً في حين يحيز ملتقى المجمع قاعدة تحييزاً عكسياً (كالمبين في (شكل (2)) ويقال في هذه الحالة إن الترانزستور محيز في المنطقة النشطة .

3- مركبات التيار في الترانزستور

Transistor Current Components

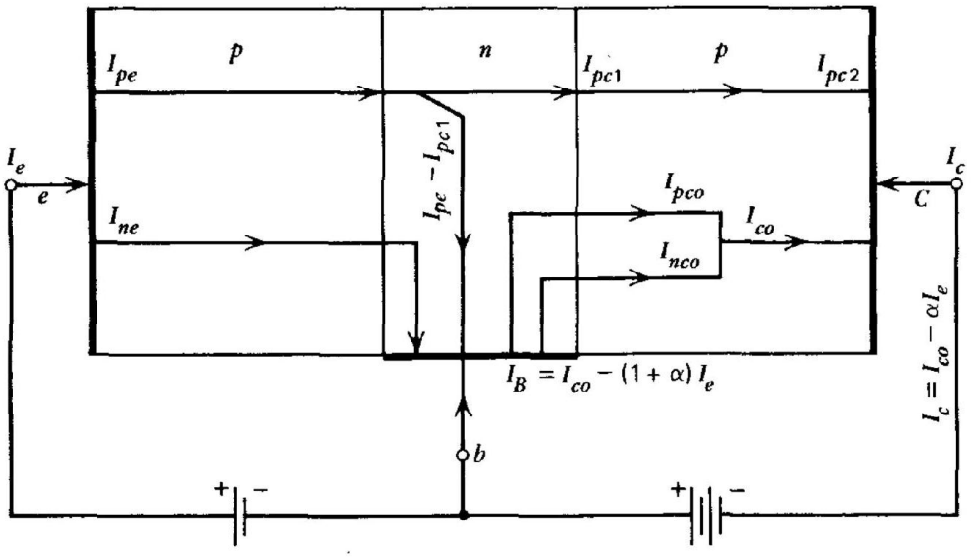
عند تحييز ملتقى الباعث قاعدة تحييزاً مباشراً يتكون تيار الباعث من مركبتين وهما المركبة الثقبية I_{pe} وتنتج عن إنتشار الثقوب من الباعث (المادة p) إلى القاعدة ، والمركبة الإلكترونية I_{ne} وتنتج عن إنتشار الإلكترونات من القاعدة (المادة n) إلى الباعث . ويكون تيار المركبتين في نفس الإتجاه كالمبين بالشكل (3) . وبذلك يكون تيار الباعث الكلي I_e عبارة عن مجموع هاتين المركبتين أي أن :

$$I_e = I_{pe} + I_{ne} \qquad \text{..... (1)}$$

ولما كان تركيز الحاملات الغالبية في الباعث أعلى بكثير من تركيزها في القاعدة (حيث أن نسبة الشوائب في الباعث أعلى بكثير منها في القاعدة) تكون المركبة الإلكترونية I_{ne} صغيرة جداً بالمقارنة بالمركبة الثقبية (بالنسبة للترانزستور (p–n–p)) أي أنه يمكن إعتبار أن

$$I_e \simeq I_{pe} \qquad \text{..... (2)}$$

ويجب ملاحظه أن المركبة الإلكترونية I_{ne} تمر في الدارة الصغرى المكونة من الباعث والقاعدة . أما الثقوب فتستمر في حركتها الإنسياقية بعد دخولها القاعدة . فإذا كان عرض القاعدة أقل بكثير من متوسط الممر الحر للثقوب فيها تمر معظم الثقوب عبر القاعدة وتصل إلى ملتقى المجمع — قاعدة دون أن تعيد إتحادها مع



شكل (3)

الإلكترونات (وهي الحاملات الغالبية في القاعدة) مكونة بذلك تياراً مقدارمI_{pc1}عند هذا الملتقى الأخير. وأما الثقوب القليلة التي أعادت إتحادها مع إلكترونات القاعدة فإنها تؤدي إلى تكوين تيار مقداره $I_{pe}-I_{pc_1}$ يمر في الدارة الصغرى بين الباعث والقاعدة (شكل (3)) وتعتمد قيمة هذا التيار الأخير على كل من عرض القاعدة وتركيز الإلكترونات بها حيث تقل قيمته كلما قل عرض القاعدة وكلما قلت نسبة تركيز الإلكترونات بها والعكس صحيح. فإذا كان عرض القاعدة W ومتوسط الممر الحر للثقوب L_p وتحقق الشرط $W \ll L_p$ فإنه يمكن إعتبار أن

$$I_{pc1} \gg I_{pe}-I_{pc1} \qquad \text{..... (3)}$$

أي أن

$$I_{pc1} \simeq I_{pe} \qquad \text{..... (4)}$$

وإذا أريد عمل ترانزستورات ذات أداء جيد فإنه يجب أن يكون عرض القاعدة ونسبة تركيز الشوائب فيها محققاً للعلاقة (4).

وحيث أن ملتقى المجمع قاعدة محيزاً تحييزاً عكسياً يكون المجال الكهربي الناتج في هذا الملتقى مجالاً معجلاً لهذه الثقوب فتزداد سرعتها عند عبوره ثم تستمر في تحركها كحاملات غالبية في منطقة المجمع إلى أن تصل لنهايته . فإذا كان جهد المجمع العكسي عالياً يمكن أن تكتسب هذه الثقوب طاقة حركة كبيرة أثناء عبورها ملتقى المجمع ـــ قاعدة وتصبح بالتالي قادرة على توليد أزواج إلكترونية ـــ ثقبية جديدة مما يؤدي إلى زيادة عدد الثقوب التي تصل إلى المجمع عن العدد الداخل من ملتقى المجمع قاعدة . فإذا كان التيار الثقبي الواصل لنهاية المجمع هو I_{pc2} فإنه يمكن إعتبار أن $I_{pc2} \geqslant I_{pc1}$ وذلك تبعاً لقيمة الجهد العكسي .

والآن نفرض أن دارة الباعث ـــ قاعدة كانت مفتوحة (أي أن $I_p=0$) مع بقاء ملتقى المجمع ـ قاعدة محيزاً تحييزاً عكسيا . في هذه الحالة يمر في الثنائي المكون من المجمع والقاعدة تيار عكسي مكون من مركبتين إحداهما I_{nco} وهي ناتجة عن إنتشار الإلكترونات الأقلية من المجمع إلى القاعدة والأخرى I_{pco} وهي ناتجة عن إنتشار الثقوب الأقلية من القاعدة إلى المجمع . ولما كال إتجاه المركبتين واحداً فإنه ينتج عنها تيار عكسي I_{co} مقداره

$$-I_{co}=I_{pco}+I_{nco} \qquad \text{..... (5)}$$

وهذا التيار هو عبارة عن تيار التشبع العكسي وهو يمر في الدارة الصغرى المكونة من المجمع والقاعدة . أي أن تيار المجمع في هذه الحالة هو

$$I_c=I_{co} \qquad \text{..... (6)}$$

وعند إغلاق دارة الباعث ـــ قاعدة يصبح التيار الكلي المار في المجمع هو

$$-\mathrm{I}_c=\mathrm{I}_{co}+\mathrm{I}_{pc2} \qquad \text{..... (7)}$$

ولنتعرف الآن على بعض الخصائص المميزة للترانزستور :

ا ـــ كفاءة الباعث (γ) Emitter Efficiency

كفاءة الباعث هي النسبة بين تيار الحاملات المحقونة من الباعث للقاعدة إلى التيار الكلي للباعث . أي

أنه في حالة ترانزستور الوصلة $p–n–p$ وعند أخذ العلاقتين (1) ، (2) في الإعتبار تكون كفاءة الباعث هي

$$\gamma \equiv \frac{I_{pe}}{I_e} = \frac{I_{pe}}{I_{pe} + I_{ne}} \leqslant 1 \qquad \text{..... (8)}$$

وكلما كانت كفاءة الباعث قريبة من الواحد الصحيح كانت نوعية الترانزستور أفضل ولذا يجب أن يكون تركيز الشوائب في الباعث أعلى ما يمكن .

ب — معامل النقل β Transport Factor

ويبين هذا المعامل نسبة الثقوب (في حالة ترانزستور الوصلة $p–n–p$) التي تعبر خلال القاعدة (دون إعادة الإتحاد مع الإلكترونات) إلى الثقوب التي حقنت للقاعدة من الباعث . وبالرجوع إلى شكل (3) والعلاقة (3) يكون معامل النقل هو

$$\beta \equiv \frac{I_{pc1}}{I_{pe}} \leqslant 1 \qquad \text{..... (9)}$$

وبنفس الأسلوب فكلما كان معامل النقل قريباً من الواحد الصحيح كانت نوعية الترانزستور أفضل .

جـ — معامل التضاعف δ Multiplication Factor

وهو عبارة عن نسبة الثقوب (في حالة ترانزستور الوصلة $p–n–p$) التي تصل إلى نهاية المجمع إلى الثقوب التي تحقن من القاعدة . أي أن

$$\delta \equiv \frac{I_{pc2}}{I_{pc1}} \geqslant 1 \qquad \text{..... (10)}$$

ويكون هذا المعامل مساوياً للواحد الصحيح عندما يكون جهد التحييز العكسي صغيرا . أما إذا زاد جهد التحييز العكسي يصبح هذا المعامل أكبر من الواحد الصحيح بقليل نتيجة تولد أزواج إلكترونية ثقبية جديدة .

د — معامل كسب التيار α The Current Gain

هو عبارة عن نسبة تغير تيار المجمع بتغير تيار الباعث (عند بقاء تحييز المجمع قاعدة ثابتا) مأخوذة بإشارة سالبة أي

$$\alpha \equiv -\frac{(I_c - I_{co})}{I_e - 0} \qquad \text{..... (11)}$$

وباستخدام العلاقات (7 - 10) نجد أن

$$-\alpha = \frac{I_{pc2}}{I_e} = \frac{I_{pc2}}{I_{pe1}} \times \frac{I_{pc1}}{I_{pe}} \times \frac{I_{pe}}{I_e} = \gamma\beta\delta \simeq 1 \qquad \text{..... (12)}$$

ويعرف هذا المعامل بإسم معامل كسب التيار للنبضات الكبيرة للترانزستور ذات القاعدة المشتركة وهو عبارة عن حاصل ضرب كل من كفاءة الباعث ومعامل النقل ومعامل التضاعف وتكون قيمته العددية لمعظم الترانزستورات في حدود ٠,٨٥ ــ ٠,٩٨ وللمعامل α أهمية كبيرة في نظرية الترانزستورات وتعتمد قيمته على كل من تيار الباعث I_e وجهد المجمع العكسي ودرجة الحرارة . والإشارة السالبة تعني أنه ــ إذا كان تيار الباعث متجهاً الى الداخل يكون تيار المجمع متجهاً إلى خارج الترانزستور . وبالرجوع إلى العلاقة (5) نجد أن

$$I_c = I_{co} + I_{pc2} = I_{co} - \alpha I_e \qquad \text{..... (13)}$$

ولما كان تيار التشبع العكسي I_{co} تياراًصعيراً جداً والمعامل α قريب من الواحد الصحيح فإنه يمكن إعتبار أن تيار المجمع مساوٍ تقريباً لتيار الباعث ، وهذا يعني أن تيار القاعدة صغير ويمكن إيجاد قيمته بإستخدام قانون كيرشهوف للتيار .

$$I_b + I_e - I_c = 0 \qquad \text{..... (14)}$$

أي أن

$$I_b = I_c - I_e = I_{co} - \alpha I_e - I_e = I_{co} - (1+\alpha) I_e \qquad \text{..... (15)}$$

وهكذا ثبت أن تيار القاعدة صغير جداً حيث أن المعامل $1 \gg (1+\alpha)$.

وجدير بالذكر أن الباعث في الترانزستور يلعب دور الكاثود في الصمام الثلاثي في حين تقوم القاعدة في الترانزستور بدور شبكة التحكم في الصمام . فالتغير في فرق الجهد بين الباعث والقاعده يؤدي إلى تغير تيار الباعث ، وينتقل هذا التغير بأكمله ــ تقريباً ــ إلى المجمع . أي أن القاعدة تتحكم في تيار المجمع مثلما تتحكم شبكة التحكم في تيار الأنود . ويتمثل الإختلاف في أن بعض الثقوب (في حالة ترانزستور الوصلة $p\text{-}n\text{-}p$) تعيد إتحادها في القاعدة فيؤدي هذا إلى سريان تيار قيمته $(1+\alpha) I_e$) في القاعدة .

أما المجمع في الترانزستور فيلعب دور الأنود في الصمام . وجدير بالذكر أن الجهد العكسي للتقى المجمع ــ قاعدة لا يؤثر في تيار المجمع طالما كانت قيمته كبيرة بحيث يكون تيار التشبع العكسي قد وصل إلى قيمة التشبع . ويمكن إثبات أن تيار المجمع يعتمد على جهد المجمع العكسي طبقاً للعلاقة

$$I_c = I_{co}\left(1 - \exp\frac{eV_c}{KT}\right) - \alpha I_e \qquad \text{..... (16)}$$

فإذا وصل الجهد إلى قيمة سالبة كبيرة (حوالي ٠,١٠ فولت) نجد أن الحد الأسي يصبح مساوياً للصفر ونحصل بالتالي على نفس العلاقة (13) . وتعرف العلاقة (16) بالعلاقة العامة للترانزستور .

(يجدر الذكر بأن التيارات في الترانزستور سواء I_e ، I_b ، I_c تعتبر موجبة إذا كانت متجهة إلى داخل الترانزستور وسالبة إذا كان إتجاهها خارجاً من الترانزستور) .

4 - المميزات الإستاتيكية للترانزستور

Transistor Static Characteristics

يوجد في الترانزستورات ترابط بين أربعة متغيرات وهي (تيار المجمع I_c وفرق الجهد بين المجمع والقاعدة

V_{cb} وتيار الباعث I_e وفرق الجهد بين الباعث والقاعدة V_{eb} . وعموماً تصعب دراسة العلاقات بين هذه المتغيرات الاربعة في نفس الوقت . لذا فإنه يجب تثبيت متغيرين عند قيم محددة ودراسة علاقة المتغير الثالث بالمتغير الرابع .

ومن الجدير بالذكر أنه توجد طرق ثلاث لتوصيل الترانزستور في الدارة الإلكترونية التي تحتوي عادة على دارتين صغيرتين تعتبر إحداها بمثابة دارة الدخل the input والأخرى بمثابة دارة الخرج the output . فإذا كانت القاعدة مشتركة في الدارتين يسمى توصيل الترانزستور في هذه الحالة بالتوصيل ذات القاعدة المشتركة The Common-Base Configuration (CB) وإذا كان الباعث هو المشترك في الدارتين يكون التوصيل ذا باعث مشترك The Common-Emitter Configuration (CE) وأما الطريقة الثالثة فتعرف بالتوصيل ذات المجمع المشترك The Common-Collector Configuration (CC) وفيها يكون المجمع هو المشترك في الدارتين . وفي كل طريقة من الطرق الثلاث يمكن دراسة منحنيات الخواص (المميزات) الإستاتيكية للترانزستور وذلك بتقسيمها إلى مجموعتين . الأولى هي مجموعة منحنيات (مميزة) الخرج والثانية هي مميزة الدخل .

5 - مميزة التوصيل بقاعدة مشتركة

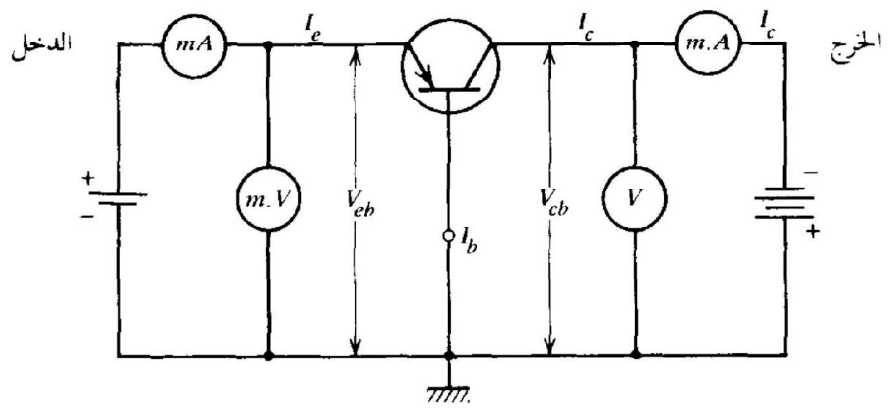
The Common-Base Characteristics

في هذه الحالة تكون القاعدة مشتركة بين دارة الدخل ودارة الخرج كالمبين في شكل (4) . وبالنظر للعلاقة (16) يتضح أن تيار المجمع I_c (والذي يعتبر تيار الخرج) يمكن أن يحدد بمعرفة كل من تيار الباعث I_e (الذي يعتبر تيار الدخل) وجهد الخرج V_{cb} (فرق الجهد بين المجمع والقاعدة) . أي أنه يمكن إعتبار كل من I_c ، V_{cb} متغيرات مستقلة تؤثر على المتغير الثالث I_e . لذلك فإنه يمكن كتابة علاقة الخرج كالتالي

$$I_c = f_1(V_{cb}\ \ I_e) \qquad \text{..... (17)}$$

كذلك فإنه يمكن إختيار كل V_{cb} ، I_e كمتغيرات مستقلة وتحديد كيفية إعتماد جهد الدخل V_{eb} عليها . أي أنه يمكن إعتبار أن العلاقة

$$V_{eb} = f_2(V_{cb},\ I_e) \qquad \text{..... (18)}$$

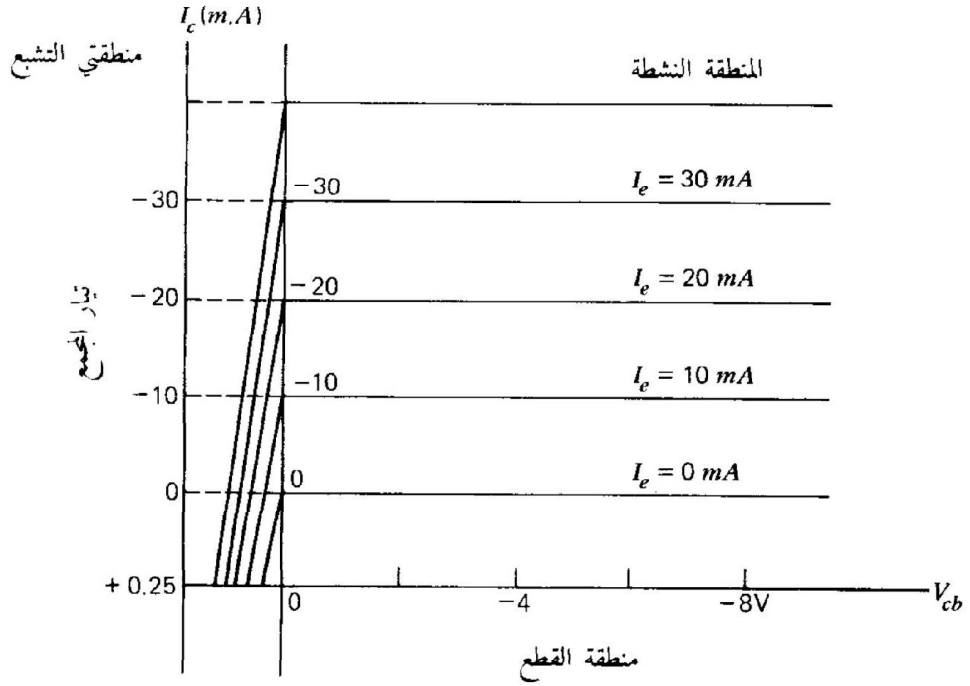


شكل (4)

هي التي تحدد مميزة الدخل للترانزستور .

أ — مميزة الخرج The Output Characteristics

يبين شكل (5) مجموعة مميزة الخرج الإستاتيكية للترانزستور ذي القاعدة المشتركة وهي عبارة عن علاقة تيار المجمع بجهد المجمع قاعدة عند قيم مختلفة لتيار الباعث . ويجدر الذكر أن إتجاه كل من I_{co} ، I_c يكون سالباً للترانزستور $p–n–p$ وموجباً للترانزستور $n–p–n$ وتنقسم هذه المميزة إلى ثلاث مناطق متباينة هي .



شكل (5)

١ — المنطقة النشطة

وهو المربع العلوي الأيمن من الشكل (5) وفيه يكون ملتقى المجمع قاعدة محيزاً تحييزاً عكسياً في حين يكون ملتقى الباعث — قاعدة محيزاً تحييزاً مباشرا . فإذا ما كان تيار الباعث مساوٍ للصفر $I_e = 0$ يكون تيار المجمع I_c صغيراً جداً ومساوياً لتيار التشبع العكسي $I_c = I_{co}$ (لا يتعدى عدة ميكروامبيرات للترانزستور الجرمانيومي وعدة نانوامبيرات للترانزستور السليكوني) . أما إذا كان تيار الباعث مساوٍ لقيمة معينة يمر الجزء الأكبر منه وهو $-\alpha I_e$ خلال المجمع وعندئذ تحدد العلاقة (13) تيار المجمع .

وهكذا نجد أنه في المنطقة النشطة يعتمد تيار المجمع على تيار الباعث إعتماداً كبيراً في حين يؤثر جهد المجمع في تيار المجمع تأثيراً ضعيفاً (لا يتعدى ٠,٥٪) بسبب تغير فروق الجهد في ملتقى المجمع — قاعدة والذي يؤثر بدوره على المركبة الصغيرة لتيار الباعث . ولما كانت قيمة α قريبة من الواحد الصحيح ولكن أصغر منه يكون تيار المجمع دائماً أقل بقليل من تيار الباعث .

٢ — منطقة التشبع

وهي المنطقة الواقعة على يسار محور تيار المجمع . ونجد في هذه المنطقة أن كلاً من ملتقى المجمع — قاعدة

والباعث — قاعدة محيز تحييزاً مباشرا . فيؤدي ذلك إلى مرور تيارين في إتجاهين متضادين ، أحدهما هو تيار الباعث والآخر تيار المجمع (حيث يعمل المجمع كالباعث تماما) . بذلك يصبح التيار المار خلال المجمع هو عبارة عن الفرق بين هذين التيارين . فإذا كان جهد المجمع المباشر كبيراً فإنه يمكن أن يصبح تيار المجمع المباشر أكبر من تيار الباعث المباشر . وبالتالي يغير تيار المجمع إتجاهه وتصبح قيمته موجبه .

٣— منطقة القطع

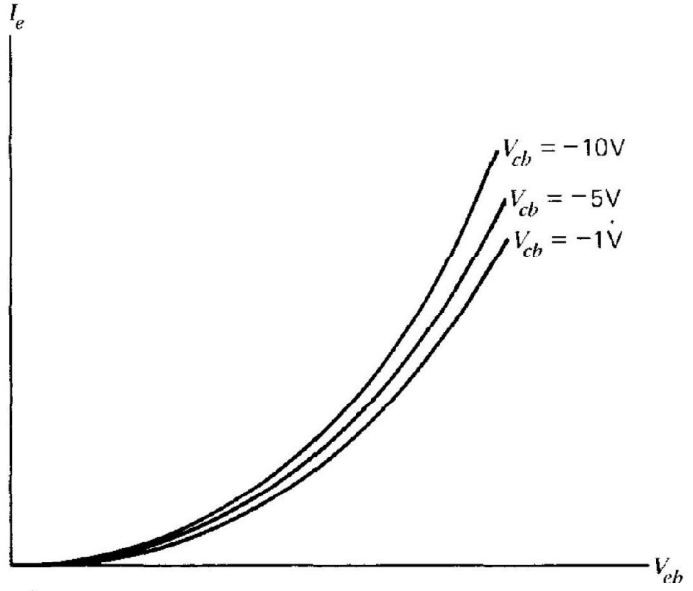
وهي المنطقة الواقعة تحت محور I_e حيث يكون تحييز كل من ملتقى المجمع — قاعدة وملتقى الباعث — قاعدة تحييزاً عكسيا . وبالتالي يكون تيار كل من الباعث والمجمع عبارة عن تيار التشبع العكسي .

ب — مميزة الدخل The Input Characteristics

وهي عبارة عن علاقة تيار الباعث بفرق الجهد بين ملتقى الباعث — قاعدة عند قيم مختلفة لجهد المجمع العكسي . وهي لا تختلف من حيث المبدأ عن مميزة الثنائي شبه الموصل إلا في وجود عدة منحنيات تمثل قيماً مختلفة لجهد التحييز العكسي للمجمع . ويلاحظ أنه بزيادة جهد التحييز العكسي يقل تيار الباعث وذلك بسبب نقص عرض المنطقة الفعالة من القاعدة والتي تحتوي على الحاملات الحرة مما يؤدي إلى نقص الحاملات الغالبية وزيادة الحاملات الأقلية في القاعدة وتعرف هذه الظاهرة باسم ظاهرة «إيرلي» early ، ويبين شكل (6) مجموعة مميزة الدخل للترانزستور ذي القاعدة المشتركة .

6 - بارامترات الترانزستور عند التوصيل بقاعدة مشتركة
Transistor CB Parameters

تستخدم مجموعتي مميزة الترانزستور عند التوصيل بقاعدة مشتركة في تحديد عدة بارامترات تعبر عن العلاقة بين المتغيرات المختلفة . وهذه البارامترات هي



شكل (6)

أ— مقاومة المجمع r_c

وهو عبارة عن مقلوب معدل تغير تيار المجمع بتغير جهد المجمع — قاعدة عند بقاء تيار الباعث ثابتاً أي أن

$$r_c = \frac{\Delta V_{cb}}{\Delta I_c}\Bigg|_{I_e=\text{const.}} = \frac{\partial V_{cb}}{\partial I_c} \qquad \text{..... (19)}$$

وتحدد هذه المقاومة من مجموعة مميزة الخرج ، وتكون قيمتها عالية (حوالي ١ ميجا أوم) حيث أنها تمثل المقاومة العكسية للثنائي مجمع — قاعدة .

ب— معامل كسب التيار α,

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار الباعث مع بقاء جهد المجمع — قاعدة ثابتاً أي أن

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e}\Bigg|_{V_{cb}=\text{const}} = \frac{\partial I_c}{\partial I_e} \qquad \text{..... (20)}$$

جـ— مقاومة الباعث r_e

وهي عبارة عن مقلوب معدل تغير تيار الباعث بتغير جهد الباعث — قاعدة مع بقاء جهد المجمع — قاعدة ثابتاً أي أن

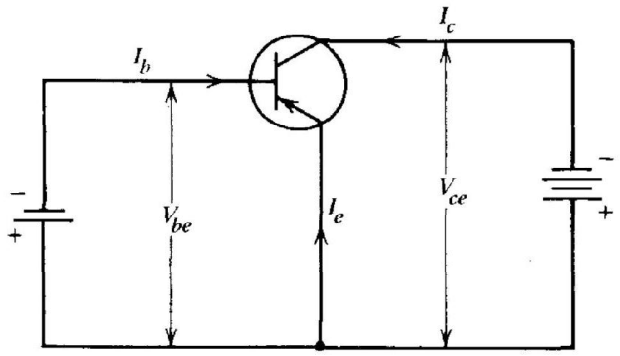
$$r_e = \frac{\Delta V_{eb}}{\Delta I_e}\Bigg|_{V_{cb}\ \text{const}} = \frac{\partial V_{eb}}{\partial I_e} \qquad \text{..... (21)}$$

وتحدد هذه المقاومة من مجموعة مميزة الدخل وتعتمد إعتماد كبيراً على تيار الباعث وتكون قيمتها عادة صغيرة حيث أنها تعتبر بمثابة المقاومة المباشرة للثنائي باعث—قاعدة .

7 - مميزة التوصيل بباعث مشترك

The Common-Emitter Characteristics

في معظم الدارات الإلكترونية يفضل توصيل الباعث كطرف مشترك بين دارة الدخل ودارة الخرج لما لهذا التوصيل من مميزات كثيرة بالمقارنة بالتوصيل بالقاعدة المشترك . وأهم هذه المميزات هي إمكانية إستخدام الترانزستور كمكبر للتيار ، وزيادة إستقرار تشغيله بالنسبة لتغير جهود التحييز أو درجة الحرارة . ويعرف التوصيل في هذه الحالة والمبين في شكل (7) بالتوصيل ذي الباعث المشترك ويجدر الذكر أن الترانزستور يجب أن يبقى محيزاً في المنطقة النشطة (أي يكون الباعث موجباً بالنسبة للقاعدة والمجمع سالباً بالنسبة للقاعدة وذلك للترانزستور *p-n-p*. وعند التوصيل بالباعث المشترك تصبح المتغيرات الأربعة هي تيار القاعدة I_b وجهد القاعدة—باعث V_{be} (وهي متغيرات دارة الدخل) وتيار المجمع I_c وجهد المجمع — باعث V_{ce} (وهي متغيرات



شكل (7)

دارة الخرج) وبنفس الأسلوب فإنه يمكن إعتبار كل من V_{ce} ، I_b متغيرات مستقلة في حين تعتبر كل من V_{be} ، I_c متغيرات تابعة أي أن

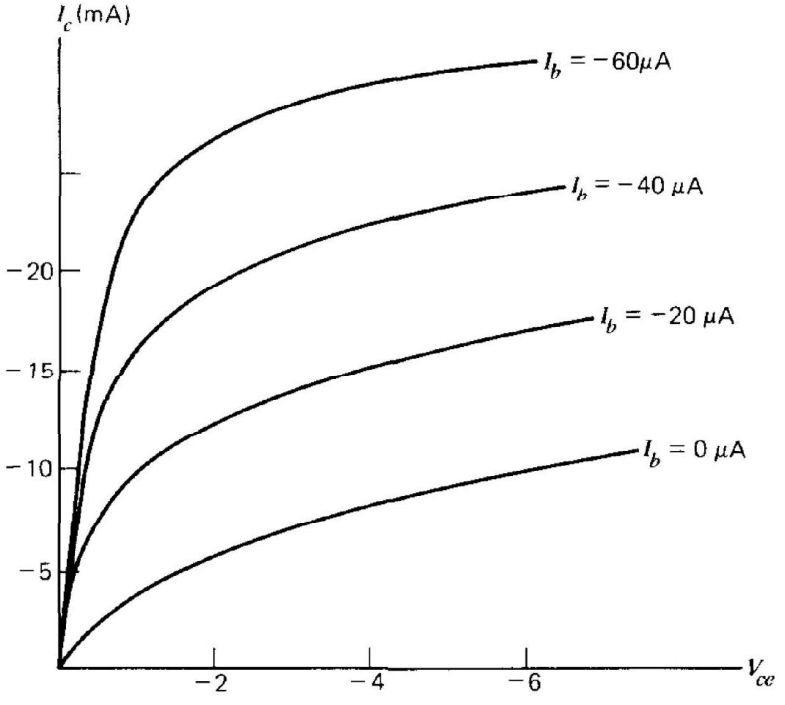
$$V_{be}=f_1(V_{ce}, I_b) \qquad \text{..... (22)}$$

$$I_c=f_2(V_{ce}, I_b) \qquad \text{..... (23)}$$

وتمثل العلاقة (23) مميزة الخرج للترانزستور ذي الباعث المشترك في حين تمثل العلاقة (22) مميزة الدخل له .

أ— مميزة الخرج للتوصيل بباعث مشترك The CE Output Characteristics

يبين شكل (8) مميزة الخرج لتوصيل الترانزستور بباعث مشترك . وهذه المميزة هي عبارة عن علاقة تيار المجمع (بالملي أمبير) I_c بجهد المجمع . باعث V_{ce} (بالفولت) عند قيم مختلفة لتيار القاعدة I_b

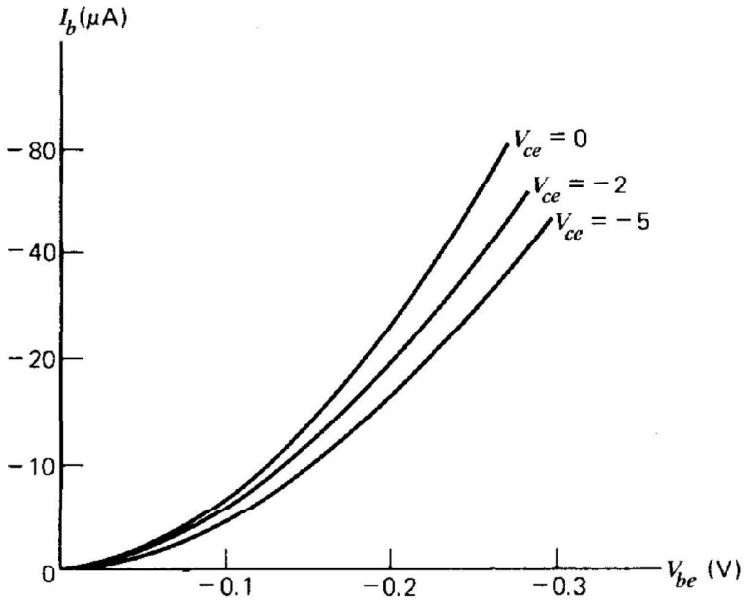


شكل (8)

(بالميكروأمبير) ويظهر من هذه المنحنيات أن تيار المجمع لا يعتمد كثيراً على جهد المجمع– باعث وإنما يعتمد بالدرجة الأولى على تيار القاعدة . ويلاحظ أن ميل المنحنيات أكثر وضوحاً عما هو بالنسبة لتوصيل الترانزستور بقاعدة مشتركة . وتعتبر مميزة الخرج للتوصيل بباعث مشترك أكثر حساسية من مميزة الخرج للتوصيل بقاعدة مشتركة مما يؤدي إلى إمكان تحديد تيار القاعدة مباشرة من المميزة بدلاً من تحديده حسابياً في حالة القاعدة المشتركة .

ب — مميزة الدخل للتوصيل بباعث مشترك The CE Input Characteristics

وهي عبارة عن علاقة تيار القاعدة (بالميكروامبير) بجهد القاعدة—باعث V_{be} (بالملي فولت) عند قيم مختلفة لجهد المجمع—باعث V_{ce} (بالفولت) . ويلاحظ من الشكل (9) الذي يوضح صورة مميزة الدخل أن تيار القاعدة يتأثر تأثراً ضعيفاً بتغير جهد المجمع —باعث في حين يلعب V_{be} الدور الرئيسي في تحديد قيمة هذا التيار . ويرجع السبب في تغير تيار القاعدة بتغير جهد المجمع العكسي إلى ظاهرة «إيرلي»



شكل (9)

8 - بارامترات الترانزستور عند التوصيل بباعث مشترك

Transistor (CE) Parameters

يلاحظ عند توصيل الترانزستور بباعث مشترك أن تيار الدخل هو تيار القاعدة وليس تيار الباعث . لذا يجب تحديد تيار المجمع كدالة من تيار القاعدة . وبإستخدام العلاقتين (13) ، (15) فإنه يمكن إيجاد تيار المجمع في الشكل الآتي :

$$I_c = \frac{\alpha I_b}{1-|\alpha|} + \frac{I_{co}}{1-|\alpha|} \qquad \text{..... (24)}$$

فإذا كان $I_b = 0$ نجد أن

$$I_c = -\frac{I_{co}}{l-|\alpha|} \qquad \text{..... (25)}$$

وهكذا نجد أن توصيل الترانزستور بباعث مشترك يؤدي إلى تكبير تيار التشبع العكسي لملتقى المجمع– قاعدة بمقدار $1/1-\alpha$, مره . فإذا كان المعامل α للترانزستور مساو ٠,٩٥ وكان تيار التشبع I_{co} مساوٍ ٥ ميكروامبير (في حين تيار القاعدة مساو– للصفر) فإننا نجد أن تيار المجمع $I_c=0.1\ \text{mA}$.

ويدل هذا على مدى تأثير تيار التشبع العكسي (الذي يعتمد أساساً على درجة الحرارة) على تيار المجمع في حالة التوصيل بباعث مشترك . وسوف يتضح فيما بعد كيفية إستقرار تشغيل الترانزستور الموصل بباعث مشترك بالنسبة لتغير درجة الحرارة . كذلك يلاحظ أن أي تغير في تيار القاعدة ينعكس على المجمع مكبراً بمقدار $\alpha/1-|\alpha|$, مرة $|\alpha|-|\alpha|/|\alpha|\ll 1$). ويوضح هذا دور توصيل الترانزستور بباعث مشترك بغرض تكبير تيار الدخل .

ويعتبر المعامل $\alpha/1-|\alpha|$ بارامتراً هاماً لتوصيل الترانزستور بباعث مشترك ويعرف بإسم معامل تكبير التيار للترانزستور بباعث مشترك .

معامل تكبير التيار β, :

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار القاعدة عند بقاء جهد المجمع — باعث ثابتاً . أي أن

$$\beta=\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}\ \Big|_{V_{ce}=\text{const}}=\frac{\partial I_c}{\partial I_b}=\frac{\alpha}{1-|\alpha|} \qquad \text{..... (26)}$$

معامل الإستقرار S : Stability Factor

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار التشبع العكسي . أي أن

$$S=\frac{\partial I_c}{\partial I_{co}}=\frac{1}{1-|\alpha|} \qquad \text{..... (27)}$$

ويعكس هذا المعامل كيفية تأثر تيار المجمع وعدم إستقراره بتغير درجة الحرارة .

أسئلة

— إرسم الدارة الرمزية لنوعي الترانزستور مبيناً إتجاه التيار في كل منها ؟
— بين الفرق بين مناطق الترانزستور الثلاث .
— كيف يحيز الترانزستور في المنطقة النشطة ؟
— بين بإستخدام الرسم مركبات التيار في الترانزستور . وما هو أصل كل من هذه المركبات ؟
— عرف كل من كفاءة الباعث ومعامل النقل ومعامل التضاعف . وما القيمة التقريبية لكل منها واشرح كيفية إرتباط هذه القيم بخصائص مناطق الترانزستور ؟
— عرف معامل كسب التيار في الترانزستور ذي القاعدة المشتركة . وما هي قيمته التقريبية مع ذكر العوامل المؤثرة على هذه القيمة ؟
— أوجد قيمة تيار المجمع بدلالة تيار الباعث للترانزستور ذي القاعدة المشتركة .
— ترانزستور من النوع p–n–p محيز في المنطقة النشطة . ما هي إشارة كل من تيار الباعث والمجمع والقاعدة وجهد الباعث قاعدة والمجمع قاعدة ؟

— إرسم مجموعة مميزة الخرج لترانزستور موصلاً بقاعدة مشتركة . ما هي خصائص المناطق الثلاث للمميزة . إشرح شكل المنحنيات ؟

— إرسم مجموعة مميزة الدخل لترانزستور موصلاً بقاعدة مشتركة مع شرح المنحنيات .

— ما هي أهم بارامترات الترانزستور الموصل بقاعدة مشتركة . وكيف يمكن تحديدها عمليا .

— إرسم دارة لترانزستور موصلاً بباعث مشترك . أذكر بعض مزايا التوصيل بباعث مشترك .

— إرسم مجموعة مميزة الخرج لترانزستور موصلاً بباعث مشترك . قارن بين هذه المجموعة ومجموعة الخرج للقاعدة المشتركة .

— ما هي أهم بارامترات الترانزستور ذي الباعث المشترك . أوجد تيار المجمع للترانزستور الموصل بباعث مشترك .

— إشرح كيفية تأثير الحرارة على تيار المجمع في حالة توصيل الترانزستور بباعث مشترك .

— إذا كان تيار التشبع العكسي لثنائي هو ٥ ميكرو أمبير . أحسب قيمة التيار المباشر لهذا الثنائي عندما تكون قيم الجهد المباشر هي ٠,١ ، ٠,٢ ، ٠,٤ ، فولت .

— إحسب قيمة الجهد العكسي الذي يصبح عنده التيار العكسي مساوياً ٩٠٪ من قيمة تيار التشبع العكسي لثنائي من الجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة .

— بإعتبار أن مميزة الثنائي محددة بعلاقة خطية (شكل ٥—٩) . احسب التيار المباشر المار خلال ثنائي موصل على التوالي بمقاومة ١٠٠ أوم . ومنبع جهد ١٠ فولت إذا علمت أن $V_\gamma=0.2$ وأن r_f للثنائي=٢٥ أوم .

— ثنائي سليكوني يعمل عند جهد مباشر مقداره ٠,٥ فولت وعند درجة حرارة ٢٥° م . إحسب قيمة الزيادة في التيار عند ٥٠° م .

— أوجد قيمة معاملة كسب التيار α, عند توصيل الترانزستورات بقاعدة مشتركة إذا علمت أن معامل تكبير التيار β لهذه الترانزستورات هي ٥٠ ، ١٠٠ ، ١٢٥ ، ١٥٠ ، ١٨٥ .

— أوجد قيمة β للترانزستورات التي تتميز بقيم α التالية

0.95 و 0.97 , 0.98 , 0.990 , 0.995

— إذا كان تيار القاعدة في ترانزستور عبارة عن ٢٠ ميكرو أمبير عندما كان تيار الباعث ٦,٤ ميلي أمبير . أوجد قيمة كل من α ، β لهذا الترانزستور .

– **ترانزستور مع** $\alpha = 0.98$ و $I_E = 1mA$. **احسب** I_C و I_B **اذا علمت ان تيار التسرب** $1\mu A$.

جمهورية العراق – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سومر– كلية التربية الاساسية – قسم العلوم الطبيعية – فرع الفيزياء

محاضرات في الالكترونيات

Lectures in Electronics

المحاضرة الخامسة :

بعض تطبيقات الدوائر الالكترونية

Some Applications of Electronic Circuits

مدرس المادة : م.م. فؤاد نمر عجيل

المحتويات:

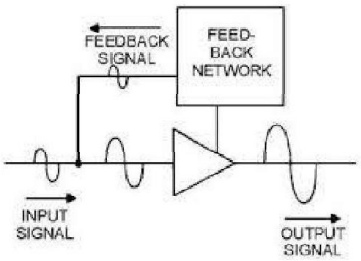
1. المكبرات ذات التغذية الخلفية Feedback Amplifiers
2. المذبذبات الجيبية Sinusoidal Oscillators
3. الدوائر المتكاملة Integrated Circuits

المكبرات ذات التغذية الخلفية Feedback Amplifiers

1- التغذية الخلفية في المكبرات

2- معامل كسب المكبر في حالة وجود تغذية خلفية

3- أثر التغذية الخلفية على إستقرار معامل الكسب



١ ـ التغذية الخلفية في المكبرات

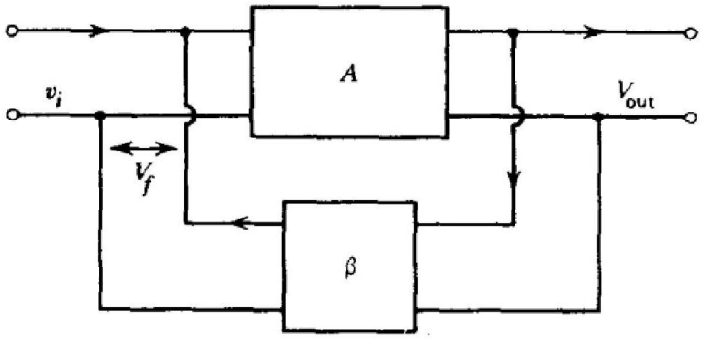
التغذية الخلفية في المكبرات عبارة عن إعادة جزء من نبضة خرج المكبر إلى مدخله من جديد . وهذا الجزء المعاد يمكن أن يكون جزءاً متناسباً من جهد الخرج وتعرف التغذية الخلفية عندئذ بالتغذية الخلفية بالجهد Voltage Feedback ، كذلك يمكن أن يكون المعاد جزءا متناسباً من تيار الخرج وتعرف التغذية الخلفية في تلك الحالة بالتغذية الخلفية بالتيار Current Feedback . وتنقسم التغذية الخلفية . من حيث طور الجزء المعاد إلى المدخل — إلى موجبة وسالبة . فعندما ينطبق طور الجزء المعاد إلى المدخل مع طور نبضة الدخل الأصلية فإن هذا يؤدي إلى زيادة قيمة نبضة الدخل الفعلية وتعرف التغذية الخلفية عندئذ بالتغذية الخلفية الموجبة Positive Feedback . إما إذا كان طور الجزء المعاد إلى المدخل مخالفاً لطور نبضة الدخل الأصلية (أي يوجد بينهما فرق طور مقداره ١٨٠°) فإن هذا يؤدي إلى إنخفاض قيمة نبضة الدخل الفعلية وتعرف هذه الحالة بالتغذية الخلفية السالبة Negative Feedback .

وتعرف نسبة الجزء المعاد من جهد أوتيار الخرج إلى القيمة الكلية لهذا الجهد أو التيار بإسم معامل التغذية الخلفية β Feedback Coefficient · وتؤثر التغذية الخلفية على خصائص المكبر مثل معامل كسبه للجهد أو التيار ومعاوقات الدخل والخرج له وعلى إستجابته لتكبير الترددات المختلفة وكذلك على مستوى الضوضاء المتولدة في المكبر وعلى التشويه اللاخطي للمكبر. وعند توفر شروط معينة للتغذية الخلفية الموجبة يتحول المكبر إلى مولد للذبذبات دونما إدخال أي نبضات للمدخل .

٢ ـ معامل كسب المكبر في حالة وجود تغذية خلفية

يوضح شكل (1) مبدأ التغذية الخلفية بالجهد حيث A يرمز لمكبر معامل كسبه للجهد A بدون التغذية الخلفية ، β عبارة عن دارة التغذية الخلفية والتي تحقق معامل تغذية خلفية مقداره β . فإذا كان جهد نبضة الدخل الأصلية هو v_i فإنها تكبر خلال المكبر وينتج عنها نبضة خرج مقدارها v_o ، ثم يعاد جزء من هذا الجهد مقدار v_f إلى المدخل . وقيمة الجزء المعاد هي

$$v_f = \beta v_o \qquad \text{..... (1)}$$



شكل (1)

لذا يصبح جهد الدخل الفعلي للمكبر هو

$$v_i' = v_i + v_f = v_i + \beta v_o \qquad \text{..... (2)}$$

وبالتالي يكون جهد الخرج الفعلي للمكبر هو

$$v_o = v_i' A = v_i A + \beta A v_o$$

أي

$$v_o(1-\beta A) = v_i A \qquad \text{..... (3)}$$

ولما كان معامل الكسب للجهد هو عبارة عن النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل فإننا نجد أن معامل كسب المكبر A_f في حالة وجود تغذية خلفية هو

$$A_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1-\beta A} \qquad \text{..... (4)}$$

وهكذا يلاحظ أن معامل الكسب A_f في حالة وجود تغذية خلفية قد يزيد أو ينقص عن نظيره في حالة عدم وجود تغذية خلفية . فإذا كانت إشارة β سالبة يصبح المقام $(1-\beta A) > 1$ وبالتالي يكون معامل الكسب A_f أصغر من معامل الكسب A بدون التغذية الخلفية . وهكذا نجد أن التغذية الخلفية السالبة تؤدي إلى إنخفاض معامل كسب المكبر A_f . أما إذا كانت إشارة β موجبة يصبح المقام $(1-\beta A) < 1$ وعندئذ يكون $A_f > A$. أي أن التغذية الخلفية الموجبة تؤدي إلى زيادة معامل الكسب A_f عن نظيره بدون التغذية الخلفية . وعند زيادة المعامل βA بحيث تصل قيمته إلى الواحد الصحيح يصبح المقام في العلاقة (4) مساوٍ للصفر $(1-\beta A = 0)$ وعندئذ يصبح معامل الكسب للمكبر ذي التغذية الخلفية الموجبة مساوٍ لمالا نهاية أي $A_f = \infty$ وعندئذ يتحول المكبر إلى مولد للذبذبات .

وتستخدم التغذية الخلفية السالبة في المكبرات إستخداماً واسعاً . فعلى الرغم من أنها تؤدي إلى إنخفاض معامل كسب المكبر إلا أنها تؤثر على خصائص المكبر الأخرى وتكسبه مزايا عديدة مثل :

أ ــ زيادة إستقرار معامل الكسب بالنسبة لتغير ظروف التشغيل .

ب ــ الإقلال من التشوية اللاخطي لموجة الخرج .

جـ ــ زيادة إتساع شريحة الترددات التي يكون عندها معامل الكسب ثابتا .

د ــ خفض نسبة الضوضاء للمكبر .

هـ ــ التأثير على كل من معاوقتي الدخل والخرج .

أما التغذية الخلفية الموجبة فعلى الرغم من أنها تؤدي إلى زيادة معامل الكسب للمكبر إلى أنها تؤثر على

خصائص المكبر في عكس إتجاه تأثير التغذية الخلفية السالبة لذا فهي لا تستخدم عادة في المكبرات وإنما تستخدم في المذبذبات .

٣ ـ أثر التغذية الخلفية على إستقرار معامل الكسب

ينشأ عدم الإستقرار في قيمة معامل الكسب عن عدة عوامل مختلفة منها على سبيل المثال تغير الجهود أو درجة الحرارة بالنسبة للترانزستورات أو تغير الجهود (خاصة جهد تسخين الكاثود) والتقادم بالنسبة للصمامات. وتؤدي هذه العوامل إلى تغير معامل الكسب تبعاً لظروف التشغيل . فإذا كان معامل الكسب بدون تغذية خلفية هو $A \pm dA$ حيث dA هو قيمة عدم الإستقرار في المعامل فإنه يسهل حساب قيمة معامل عدم الإستقرار في معامل الكسب في حالة وجود تغذية خلفية كالتالي :

حيث أن معامل الكسب عند وجود تغذية خلفية يعطى بالعلاقة (4) فإنه يمكن إيجاد قيمة عدم الإستقرار في هذا المعامل بتفاضل هذه العلاقة أي أن

$$dA_f = \frac{dA}{(1-\beta A)^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

وبقسمة العلاقة (5) على (4) نجد أن

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1-\beta A)} \frac{dA}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

ففي حالة التغذية الخلفية السالبة يكون المعامل $(1/1-\beta A) < 1$. وبالتالي تصبح نسبة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية السالبة (dA_f/A_f) أقل من نسبة عدم الإستقرار بدونها (dA/A) . وهكذا فإنه في حالة التغذية الخلفية السالبة كلما زادت قيمة (β) إنخفض معامل الكسب طبقاً للعلاقة (4) وإنخفضت نسبة عدم الإستقرار طبقاً للعلاقة (6) . فإذا أصبحت قيمة$(1/1-\beta A) \ll 1$تتخذ العلاقة (4) الشكل الآتي

$$A_f = \frac{A}{-\beta A} = -\frac{1}{\beta} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

وهكذا نجد أن معامل كسب المكبر ذي التغذية الخلفية السالبة $-A_f$ لم يعد يعتمد على معامل كسب المكبر بدون التغذية الخلفية وإنما يتوقف أساساً على قيمة المعامل β.أي أن معامل كسب المكبر لم يعد يتوقف على قيم بارامترات الترانزستور أو الصمام والتي تتغير بتغير الظروف المختلفة وإنما يتوقف فقط على المعامل β أي على عناصر دارة التغذية الخلفية . فإذا كانت عناصر هذه الدارة (وهي عبارة عن مقاومات أو مقاومات ومكثفات) لا تتغير بتغير الظروف أصبح معامل الكسب ثابتاً تقريباً وعدم الإستقرار فيه أصغر ما يمكن .

أما في حالة التغذية الخلفية الموجبة يكون المعامل $(1/1-\beta A) > 1$ وبالتالي تصبح نسبة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية الموجبة $(-dA_f/A_f)$ أكبر من نسبة عدم الإستقرار بدونها (dA/A) .

مثال :

إذا كان معامل الكسب لمكبر بدون تغذية خلفية $A = 100$ ونسبة عدم الإستقرار في هذا المعامل يمكن أن تصل إلى ١٠٪ بتغير ظروف التشغيل . ثم نفذت تغذية خلفية لهذا المكبر بمعامل $\beta = \frac{1}{200}$ (أي أنه يتم إعادة

١/٢٠٠ من نبضة الخرج إلى المدخل) . إحسب معامل الكسب A_f ومعامل عدم الإستقرار عندما تكون هذه التغذية سالبة مرة وموجبة مرة أخرى . وإذا أصبح معامل التغذية الخلفية $\beta=\frac{1}{5}$ فما هو مقدار معامل الكسب في هذه الحالة .

الحل :

قيمة عدم الإستقرار في معامل الكسب بدون تغذية خلفية

$$10\pm=\frac{10\times 100}{100}$$

أي أن معامل الكسب يتغير في حدود مقدارها (٩٠–١١٠)

معامل الكسب في حالة التغذية الخلفية السالبة

$$A_{f-}=\frac{100}{1+\frac{1}{200}\times 100}=\frac{100}{1{,}5}=66.7$$

قيمة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية السالبة

$$dA_{f-}=\frac{1}{1.5}\ \frac{10}{100}\times 66.7=4.44$$

نسبة عدم الإستقرار في هذه الحالة هي

$$\frac{dA_{f-}}{A_{f-}}\%=\frac{4.44}{66.7}\simeq 6.6\%$$

معامل الكسب في حالة التغذية الخلفية الموجبة

$$A_{f+}=\frac{100}{1-\frac{1}{200}\times 100}=\frac{100}{0.5}=200$$

عدم الإستقرار للتغذية الموجبة هو

$$dA_{f+}=\frac{1}{0.5}\ \frac{10}{100}\times 200=40$$

نسبة عدم الإستقرار

$$\frac{dA_{f+}}{A_{f+}}=\frac{40}{200}=20\%$$

معامل الكسب عند زيادة التغذية الخلفية السالبة هو

$$A_{f-}=\frac{100}{1-\frac{1}{5}\times 100}=-\frac{100}{19}=-5.2\approx -5=\frac{-1}{\beta}$$

ومعامل عدم الإستقرار

$$dA_{f-}/A_{f-}=0.5\%$$

المذبذبات الجيبية Sinusoidal Oscillators

1- المقدمة

2- انواع التذبذب الجيبي

3- شروط التذبذب

1- المقدمة

تعرف المذبذبات بانها دوائر الكترونية تقوم بتوليد اشارات التيار المتناوب ذات الأشكال الموجية المختلفة ذاتيا – اي دون الحاجة الى اشارة ادخال – وفي مدى من الترددات تمتد من الترددات المسموعة (20 الى 20000 هرتز) مروراً بالترددات الراديوية (100 كيلوهرتز الى 30 ميكاهرتز) حتى اقصى مدى للترددات العالية.

ان توليد الاشارات يجب ان لا يفهم على انه خلق للطاقة وانما هو في الحقيقة تحويل للقدرة المستمرة المجهزة بوساطة مصدر القدرة المستمرة المستخدم مع المذبذب الى قدرة متناوبة ذات خصائص مرغوبة من حيث السعة والتردد .

وعلى الرغم من ان الاشارات المتولدة تشترك في كونها دورية : تعيد نفسها بانتظام في فترات زمنية متساوية . الا ان اشكالها الموجية تكون اما جيبية ويدعى المولد عندئذ بالمذبذب الجيبي (sinusoidal oscillator) واما ان تكون الاشارة الناتجة مربعة ويدعى المولد حينذاك بمذبذب الموجات المربعة (square wave oscillator) او بمتعدد الاهتزازات (multivibrator) . بينما سنقوم هنا بالتعرف على النوع الاول من هذه المذبذبات .

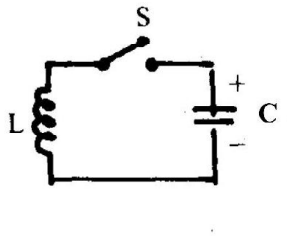
من الجدير بالذكر ان المذبذبات تستخدم بشكل كبير في اجهزة الراديو والتلفزيون والرادار والحاسبات الالكترونية وغيرها وكذلك في توليد الموجات ذات الترددات العالية بقصد استعمالها في تحميل الموجات . لذا فانه يصبح من الضروري ان تكون

سعة الموجات المتولدة وكذلك ترددها غير متغيرة مع الزمن . ولعل اكثر الاشياء ضرورة العمل المذبذب بشكل مرضي هو الاستقرارية اوالثبوتية في تردد الموجة المتولدة عند القيمة المطلوبة . كذلك يجب العمل على زيادة كفاءة المذبذب من خلال زيادة النسبة بين قدرة الموجة المتولدة الى القدرة المستمرة اللازمة لعمل المذبذب .

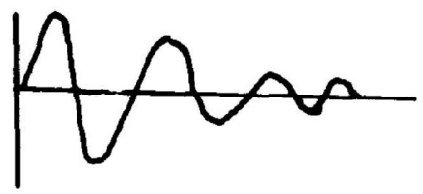
2- انواع التذبذب الجيبي :- Types of Sinusoidal Oscillations

ينقسم التذبذب الكهربائي الجيبي قسمين رئيسين هما : –

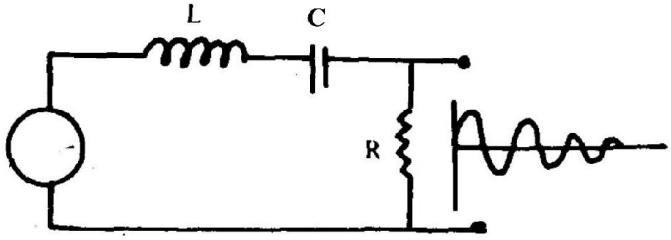
أ – التذبذب المضمحل damped oscillations : – هو ذلك النوع من التذبذب الجيبي الذي تقل سعة ذبذبته مع الزمن – انظر الشكل (١) الذي يمثل الشكل الموجي للتذبذب الكهربائي المضمحل . من الواضح ان الجهاز الكهربائي المولد لهذا النوع من التذبذب يحتوي على عنصر يسبب ضياع الطاقة ومن ثم فان فقدان الطاقة يحدث مع كل ذبذبة كذلك فان هذا الفقدان في الطاقة لا يتم تعويضه وبهذا فان النقصان في سعة الذبذبة يحدث تدريجياً ، يبين الشكل (٢) الدائرة اللازمة لحدوث مثل هذا النوع من التذبذب عو افرض ان المتسعة C هي مشحونة بالاساس وان المفتاح (s) يتم غلقه وفتحه بصوره منتظمة هذا ويمكن الحصول على نفس النتيجة من دون الحاجة الى متسعة مشحونة او استعمال المفتاح (s) ، عند تسليط موجة مربعة على دائرة C , L , R مربوطة على التوالي واخذ الموجة الناتجة على المقاومة انظر الشكل (٣) .



الشكل (٢) دائرة تذبذب .



الشكل (١) التذبذب المضمحل .



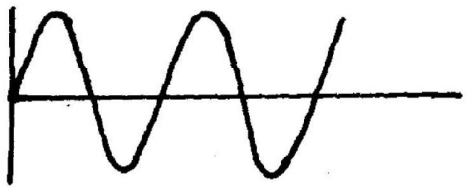
الشكل (٣) دائرة تذبذب مضمحل .

ومن الجدير بالذكر ان تردد التذبذب يبقى ثابتاً حيث ان التردد يعتمد على ثوابت خاصة بالدائرة الكهربائية ويكون مساويا في هذه الحالة ، لـ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

ب – التذبذب الجيبي غير المضمحل : undamped oscillation

هو ذلك النوع من التذبذب الجيبي الذي لا تتغير سعته مع التذبذب او بعبارة اخرى ثبوت سعة التذبذب مع الزمن – انظر الشكل (٤) – الذي يمثل الشكل الموجي للتذبذب الكهربائي غير المضمحل .



الشكل (٤) التذبذب الجيبي غير المضمحل .

يحدث هذا النوع من التذبذب بنفس الطريقة التي يحدث بها التذبذب المضمحل مع فارق واحد ان هناك تعويض دائماً للطاقة الضائعة بسبب من مرور التيار في المقاومة المرافقة لكل من المتسعة والملف في الدائرة الشكل (٢) . كذلك فان تردد الموجة الناتجة يكون هو التردد في المعادلة (١) .

3- شروط التذبذب

رأينا فيما سبق (في التغذية الخلفية) انه بالامكان جعل المكبر يصل الى حالة التذبذب عندما تكون التغذية الخلفية المستخدمة مع دائرة المكبر . من النوع الموجب . وبهذا فانه يصح التكلم عن المذبذب باعتباره مكونا من مكبر مع دائرة تغذية خلفية موجبة – انظر الشكل (٥) . حيث نلاحظ دائرة المكبر A مع دائرة التغذية الخلفية التي تقوم بتجهيز مدخل المكبر بجهد الادخال اللازم بحيث ان

$$v_i - \beta v_o = +A\beta v_i \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

او ان

$$v_i\ (1 - \beta A) = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

وحيث ان v_i لا يساوي صفراً في حالة وجود v_o لذا فان

$$1 - \beta A = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

او ان

$$\boxed{\beta A = 1} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

ان تحقق الشرط اعلاه . المعادلة (٥/ – في دائرة المكبر عن طريق التغذية الخلفية الموجبة يعني ظهور التذبذب التلقائي في هذه الدائرة سواء اكانت اشارة الادخال موجودة او غير موجودة . وعندئذ تدعى الدائرة بدائرة المذبذب .

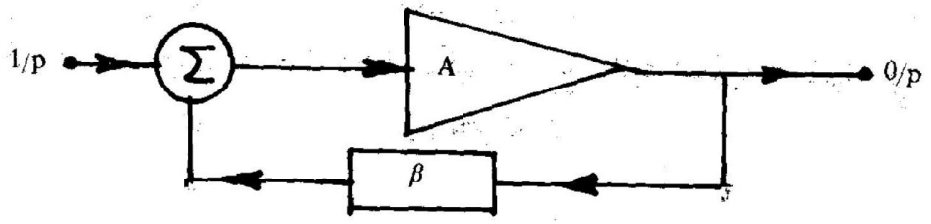
على اية حال تعامل الكمية βA . عند تحليل دائرة المذبذب . على انها كمية معقدة complex quantity او بعبارة اخرى انها تمتلك مقداراً واتجاهاً وتكتب بالصيغة الآتية :

$$\beta A = 1 + j\,0 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

وبهذا يتضح لنا ان الشرطين الاساسين واللازمين لظهور التذبذب هما :

1 – ان قيمة عامل التغذية الخلفية $\beta A = 1$

2 – ان محصلة الازاحة الطورية للاشارة الداخلة تساوي $2n\pi$ حيث ان n عدد صحيح ويساوي $3, 2, 1, 0 \ldots$



الشكل (٥) مكبر التغذية الخلفية .

الدوائر المتكاملة Integrated Circuits

1- المقدمة

2- انواع الدوائر المتكاملة

3- الدوائـــر المتكاملـــة احاديـــة البلـــورة

1- المقدمة

تُستخدم الدوائر المتكاملة integrated circuits (او اختصاراً IC) بكثرة في الحاسبات الالكترونية بسبب صغر حجمها واستهلاكها القليل للقدرة وكذلك الدقة والجودة التي تمتاز بهما هذه الدوائرفي عملها كذلك تستعمل في المركبات الفضائية وفي الاجهزة السمعية وغيرهما من الاجهزة حيث يشكل خفة الوزن للدوائر الالكترونية المستعملة عاملا حاسماً في جودة عمل هذه الاجهزة ومن هنا فان خفة وزن الدوائر المتكاملة يمنحها المركز الاول في الاستخدام في مثل هذه الاجهزة .

من ناحية اخرى تمتاز الدوائر المتكاملة برخص ثمنها وذلك بسبب من امكانية انتاج الآلاف من الوحدات المعقدة في زمن واحد وبعملية تصنيع واحدة . فعلى سبيل المثال يمكن انتاج ما يساوي او يزيد عن الف شريحة chip على رقاقة wafer (قطرها 1.5 سم وسمكها 300 مايكروميتر) تحتوي كل شريحة على 50 عنصراً أو مايزيد دفعة واحدة وعليه فانه يبدو واضحا بان كلفة العنصر الواحد من مكونات الشريحة سيكون رخيصا مقارنة مع كلفة تصنيع هذه المكونات بصورة منفصلة وبالطرق العادية.

من المعروف ان معظم العطلات failures التي تحدث في الدوائر المعقدة ذات العناصر المنفصلة discrete compnents يكون اما بسبب حدوث قطع في الاسلاك التي تربط بين هذه العناصر او بسبب من عدم احكام نقاط الربط وحيث ان هذا الربط في الدوائر المتكاملة يتم عن طريق ترسيب المعادن بين اطراف عناصر الدائرة

وعلى بلورة واحدة - كما سنرى لاحقا – لذا فانه يصبح بالامكان الاعتماد على هذه الدوائر ولفترات طويلة ، وما الاقمار الصناعية والمركبات الفضائية الا أدلة جيدة على جودة واحكام عمل هذه الدوائر المتكاملة .

واخيراً وعلى الرغم من كل ماقيل عن مميزات الدوائر المتكاملة الا انه يجدر بنا الاشارة هنا الى ان من الصعوبة السيطرة على دقة قيم العناصر غير الفعالة المصنعة بطريقة التكامل (ومنها المقاومات والمتسعات مثلاً) حيث ان قيم هذه العناصر تكون دالة لكل من الجهد المستعمل ودرجة الحرارة . من جهة اخرى فان المتسعات التي تنتج عرضا – اثناء التصنيع – وبشكل غير مقصود قد يؤدي الى اقران عناصر الدائرة الواحدة مع بعضها الآخر مما يؤثر على عمل هذه الدوائر ولابد من المعالجة الصحيحة .

2- انواع الدوائر المتكاملة Types of integrated circiuts :

تصنف الدوائر المتكاملة عادة ، الى ثلاثة انواع هـي :

1 – الدوائر المتكاملة احادية البلورة Monolithic IC_5
2 – الدوائر الغشائية Film circuits
3 – الدوائر المختلطة Hybrid circuits

على الرغم من أن الدوائر الاحادية البلورة هي من اكثر الانواع انتشاراً لحد الآن ومن ثم فان التركيز عليها سيكون اكثر من غيرها ، الا ان استخدام الدوائر الغشائية الرقيقة سيكون هو الافضل عندما تكون النسبة بين عدد العناصر غير الفعالة الى عدد العناصر الفعالة عاليا وعليه فاننا سنشير الى طبيعة هذه الدوائر ولكن من خلال التطرق للدوائر المتكاملة المختلطة وباختصار .

3- الدوائـــر المتكاملـــة احاديـــة البلـــورة : – Monolithic integrated circuits

ان كلمة monoli thic مشتقة من اللغة الاغريقية وتعني الحجر الواحد وعليه فان مصطلح monolithic IC يشير الى دائرة متكاملة تم تصنيع كل عناصرها على شريحة chip منفردة من رقاقة wafer السيلكون . هذا وان عملية التصنيع هذه

تعتمد على مايسمى بعملية تقنية الانتشار في المستوى الواحد diffused planar process حيث يتم في هذه العملية تنفيذ جميع الخطوات اللازمة على سطح واحد لشريحة السيلكون وكذلك تعمل كل التوصيلات اللازمة بين المكونات على نفس السطح .

وعلى الرغم من ان جل اهتمامنا ينحصر في التعرف على الدوائر المتكاملة من حيث الاستخدام الا انه من المفيد جداً التعرف ايضا على كيفية تصنيعها حيث أن عملية التصنيع هذه تعدّ فريدة من نوعها في عالم الالكترونات .

في أوائل الخمسينات عندما كانت صناعة اشباه الموصلات semiconductor technology في بدايتها ، كان الجرمانيوم (Ge) أهم العناصر المعتمدة في هذه الصناعة ، من بين العناصر الاخرى وذلك لسهولة تنقيته وتنميته للحصول على بلورة جرمانيوم كبيرة وكذلك للسرعة العالية التي تتم فيها عملية التصنيع الخاصة بكل من الترانزستورات والثنائيات .

في عام 1960 اصبح واضحا ان السيلكون (Si) بدأ يستبدل الجرمانيوم وفي معظم التطبيقات تقريباً . ان السبب الكامن وراء هذا الاستبدال يشير الى ان للسيلكون مميزات تتلخص فيما يأتي :

أ) انه عنصر شائع ومتوافر حيث انه يكون 20 % من قشرة الارض ويمكن لذلك استخراجه بسهولة ويسر مما يعني رخص صناعته .

ب) تمتلك ذراته طاقة ترابط عالية مما يجعل استعماله افضل بكثير من الجرمانيوم عند العمل في درجات الحرارة العالية او بعبارة اخرى صغر تيار التسرب فيه وارتفاع جهد الانهيار التابع له .

جـ– يمتلك اوكسيداً خاملاً ومستقراً يمكن استخدامه كقناع ضوئي photo-mask – كما سنرى لاحقا – في عملية تصنيع الدوائر المتكاملة اوكعازل جيد يكون طبقة منيعة تحمي البلورة من التلوث والرطوبة . اضف الى ذلك ان هذه الطبقة يمكن ازالتها بسهولة حيث انها تذوب في حامض الهيدروفلوريك الذي لايذوب فيه السيلكون .

أسئلة ومسائل

ماالمقصود بالتغذية الخلفية وما انواعها وضح ذلك
ماالمقصود بكسب الجهد للدائرة المفتوحة ؟ اشرح ذلك
اشتق المعادلة (6) ثم بين معنى كل رمز فيها .
ماذا يعني كون معامل التغذية الخلفية $\beta_f A$ يساوي واحداً ؟ اشرح بالتفصيل
ماذا تمثل β_f ؟ وماذا يعني كونها سالبة اوموجبة اومساوية للصفر؟ وضح ذلك
وضح تأثير التغذية الخلفية على كل من
أ– الكسب الكلي للمكبر
ب– التشويه على الموجة الخارجة
ج– ممانعتي الادخال والاخراج .
د– عرض النطاق الترددي .
اذكر ثلاثة أسباب توضح لماذا يتغير كسب المكبر من غير التغذية الخلفية .

ما المذبذب ؟ وما انواعه ؟
اذا كان المذبذب لايحتاج الى اشارة ادخال فما هو اذن مصدر الاشارة الخارجة ؟
اذكر شرطي التذبذب
لماذا يجب ان تكون n في محصلة الازاحة الطورية $2n\pi$ ، عدداً صحيحاً؟
ماالمقصود بالخاصية عدم الخطية للمكبرات . وما تأثير ذلك على عمل المكبر ؟ وضح بالتفصيل .

ماالمقصود بالدوائر المتكاملة ؟ تكلم عن المحاسن والمساوىء لهذه الدوائر .
ما أهم العطلات في الدوائر الالكترونية المعقدة ؟ وكيف يتم معالجتها في الدوائر المتكاملة ؟
تكلم باختصار عن الدوائر المتكاملة احادية البلورة .
لماذا يستخدم السيلكون بكثرة في الصناعات الالكترونية عوضا عن الجرمانيوم ؟
لماذا لايعد تصنيع المتسعات والملفات عملياً بطريقة الدوائر المتكاملة ؟
لماذا يفضل استخدام الشوائب نوع (p) في تصنيع المقاومات المتكاملة ، على الشوائب نوع (n) .
اذكر طريقتين تستخدم في عزل العناصر عن بعضها في الدوائر المتكاملة . ايهما افضل ؟ ولماذا ؟