وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

الجامعة التقنية الشمالية

المعهد التقني / الموصل

قسم تقنيات الأجهزة الطبية

Analogue Electronic Principles *مباديء الالكترونيك التناظري*

اعداد: أ. م. عامر محمد نوري النعيمي

ETMI102

أشباه الموصلات (Semi-Conductors)

تقسم المواد من حيث قابلية التوصيل للتيار الكهربائي إلى :

- ❖ المواد الموصلة (Conductors) مثل النحاس والحديد
- ❖ المواد العازلة (Insulators) مثل المطاط والخشب
- ❖ المواد شبه الموصلة (Semi-Conductors) مثل السليكون ، الجرمانيوم
  - شبه الموصل النقي عديم الفائدة لأنه يكون متعادل الشحنة
  - شبه الموصل الموجب p-type

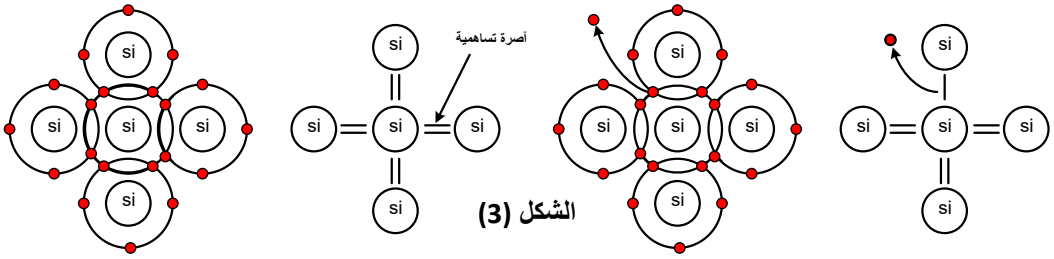
يتم الحصول عليه بإضافة شوائب ثلاثية التكافؤ مثل الألمنيوم ، والغاليوم إلى شبه الموصل النقي (ويكون حامل للفجوات ذات الشحنة الموجبة).

- شبه الموصل السالب n-type

يتم الحصول عليه بإضافة شوائب خماسية التكافؤ مثل الفسفور والانتيمون إلى شبه الموصل النقي (ويكون ذو شحنة سالبة).

البلورة: هي مادة صلبة ناتجة عن اتحاد الذرات مع بعضها بنسق واحد مرتب والقوى التي تربط الذرات مع بعضها تدعى الأواصر التساهمية.

إن ذرة السليكون تمتلك أربعة الكترونات في مدارها الخارجي وتتحد ذرات السليكون بطريقة بحيث تحوي في مداراتها التكافؤية ثمانية الكترونات حيث أن كل ذرة سليكون مجاورة تساهم بإلكترون مع الذرة المركزية ، وبذلك تتشكل الأواصر التساهمية كما في الشكل (3) . وعندما ترفع طاقة خارجية إلكترونا تكافؤيا إلى مستوى طاقة أعلى (مدار أكبر) فإن الإلكترون المغادر يخلف فراغا في المدار الخارجي ، هذا الفراغ يدعى فجوة **(hole).**



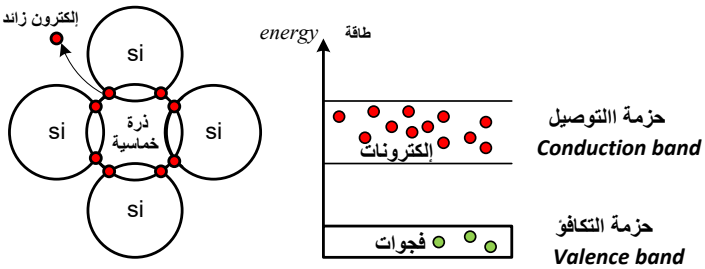
الشكل (3)

التطعيم

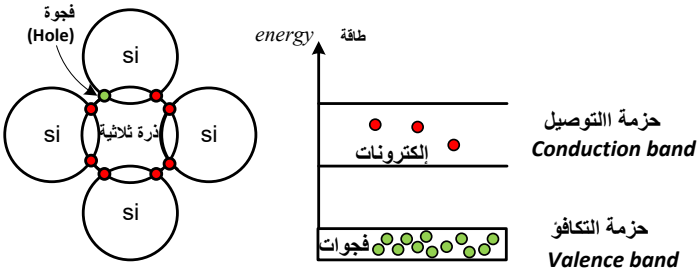
هو إضافة ذرات من الشوائب (ليست رباعية التكافؤ) إلى البلورة من أجل زيادة عدد الإلكترونات الطليقة أو لأجل زيادة عدد الفجوات ، عندما تطعم البلورة تدعى شبه موصل مطعم أو غير نقي. وسنحصل على شبه موصل نوع سالب **(n-type)** أو شبه موصل نوع موجب **(p-type)** .

شبه موصل نوع سالب (n-type)

للحصول على إلكترونات حزمة توصيل **إضافية** ، نضيف **خمسة إلكترونات** حرة في مدارها التكافؤي ، ستقوم هذه الذرة بتكوين الأواصر التساهمية مع أربعة جيران من السليكون ويبقى **إلكترون زائد** يستطيع الانتقال إلى مدار حزمة التوصيل ، ويمكن السيطرة على عدد إلكترونات بواسطة السيطرة على كمية الشوائب المضافة . تسمى الإلكترونات بالحاملات الأغلبية (majority carriers).والشكل(8) يبين كيفية تكوين هذا النوع من أشباه الموصلات



الشكل(8) شبه موصل نوع سالب (n)



الشكل(9) شبه موصل نوع موجب (p)

شبه موصل نوع موجب (p – type)

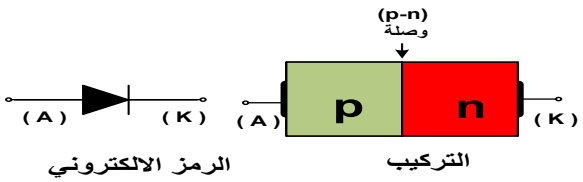
بإضافة **ذرات ثلاثية التكافؤ** إلى البلورة النقية ستعمل على تكوين ثلاثة أواصر تساهمية مكتملة مع ذرات السليكون المحيطة بها ، وستظهر فجوة في كل ذرة ثلاثية ، ويمكن السيطرة على عددها بواسطة السيطرة على كمية الشوائب المضافة ، وعليه تكون الفجوات هي الحاملات الأغلبية ، بينما إلكترونات حزمة التوصيل هي الحاملات الأقلية ، والشكل(9) يبين كيفية تكوين هذا النوع من أشباه الموصلات

ثنائيات أشباه الموصلات

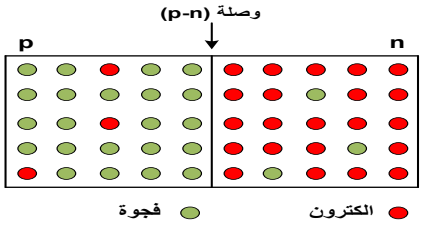
الوصلة **junction** عبارة عن ملتقى المنطقة من النوع الموجب P مع المنطقة من النوع السالب N .

ثنائي الوصلة junction diode

يتم تشكيل ثنائي الوصلة p-n على بلورة من مادة شبه موصل نقي مثل السليكون أو الجرمانيوم يطعم أحد جانبي هذه البلورة بشوائب مانحة (**خماسية التكافؤ**)،ويطعم الجانب الأخر بشوائب متقبلة (**ثلاثية التكافؤ**)، ويبين الشكل (1) التركيب والرمز الالكتروني لثنائي الوصلة . نلاحظ إن للثنائي طرفين ، الأول المتصل بالمادة نوع p ويطلق عليه (Anode) ويرمز له بالحرف **A** ، والطرف الثاني المتصل بالمادة نوع n ويطلق عليه الكاثود (Cathode) ويرمز له بالحرف **K** .



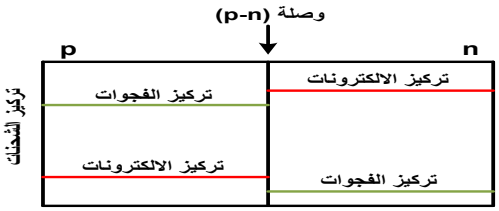
التركيب والرمز الالكتروني
الشكل (1)



توزيع الشحنات في ثنائي الوصلة p-n
الشكل (2)

الشكل (3) يبين توزيع الشحنات في ثنائي الوصلة حيث تكون غالبية الشحنات (حاملات التيار) في الجزء الأيسر (نوع p) هي الفجوات (Holes) وتمثل الالكترونات (Electrons) أقلية في هذا الجزء ، بينما تكون غالبية الشحنات في الجزء الأيمن (نوع n) الكترونات وتمثل الفجوات أقلية في هذا الجزء .

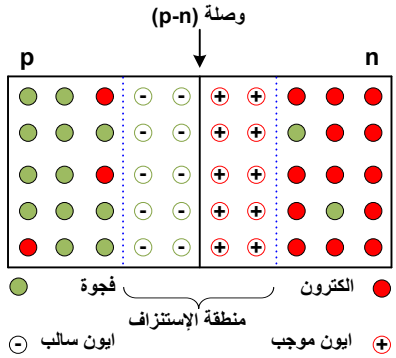
الثنائي غير المنحاز (ثنائي وصلة غير منحاز أي لا توجد فولتية خارجية مسلطه عليه) .



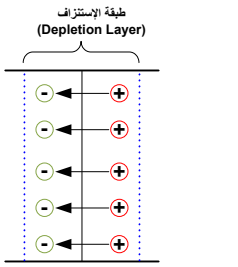
تركيز الالكترونات والفجوات على جانبي الوصلة p-n
الشكل (3)

طبقة الاستنزاف

نتيجة لعملية الانتشار والاتحاد فإن المنطقة القريبة من الوصلة أصبحت لا تحتوي على الكترونات أو فجوات حرة ، كما أن الشحنة في هذه المنطقة أصبحت غير متعادلة لان الإلكترون الذي يعبر إلى المنطقة p يترك ذرته على شكل ايون موجب ، كما أن الفجوة التي تعبر من المنطقة p إلى المنطقة n تبقى ذرتها على شكل ايون سالب ، وهكذا تتكون منطقة خالية من الشحنات على جانبي الوصلة ويطلق على هذه المنطقة(**منطقة الاستنزاف (Depletion Region**



بعد الإنتشار الشكل (4)



$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx} \Rightarrow V = -\int \varepsilon dx$$

مجال طبقة الإستنزاف الشكل (5)

الجهد الحاجز

إن كل ثنائي قطب له مجال كهربائي يكون اتجاهه من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة ، الشكل (5) ، ووجود مجال كهربائي بين ايونات يكافئ فرق جهد (جهد إعاقة) ، يسمى فرق الجهد هذا بالجهد الحاجز أو الفاصل (barrier potential) . عند درجة حرارة (25°C) يساوي الجهد الحاجز **(0.3V) تقريباً في ثنائي الجرمانيوم و (0.7V) في ثنائي السليكون .**

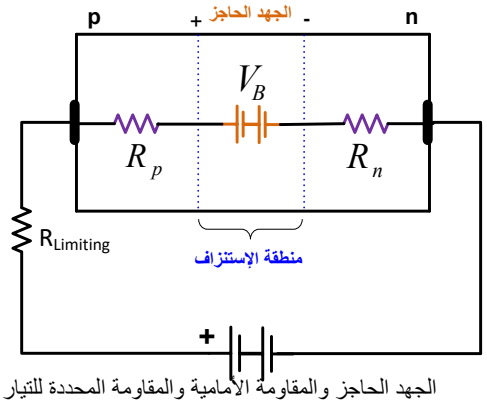
الانحياز الأمامي: لتحقيق الانحياز الأمامي

i. توصيل ثنائي الوصلة p-n ببطارية بحيث يكون الجانب p للثنائي متصل بالقطب الموجب للبطارية الجانب n للثنائي متصل بالقطب السالب للبطارية ، وهي الحالة التي تسمح بمرور التيار.
ii. جهد البطارية الخارجية (جهد الانحياز) اكبر من الجهد الحاجز .

- يقل الجهد الحاجز V_B إلى أن يصل الصفر .
- مرور تيار يسمى تيار الانحياز الأمامي I_f .
- يكون للثنائي مقاومة أمامية (إجمالية) $(r_B ; R_f)$ قليلة $R_f \leq 25\ \Omega$

المقاومة الإجمالية (r_b) (bulk resistance)

- بعد التغلب على الجهد الحاجز ، فإن كل ما يعيق التيار هو مقاومتي المنطقتين p;n وحاصل جمعهما تدعى المقاومة الإجمالية **bulk resistance** وتعتمد قيمتها على ❶ حجم المنطقتين p;n ❷ نسبة الشوائب الموجودة فيها، وكلما كان تطعيم شبه الموصل خفيفا كانت مقاومته عالية أما إذا زاد التطعيم فإن المقاومة الإجمالية تقل .

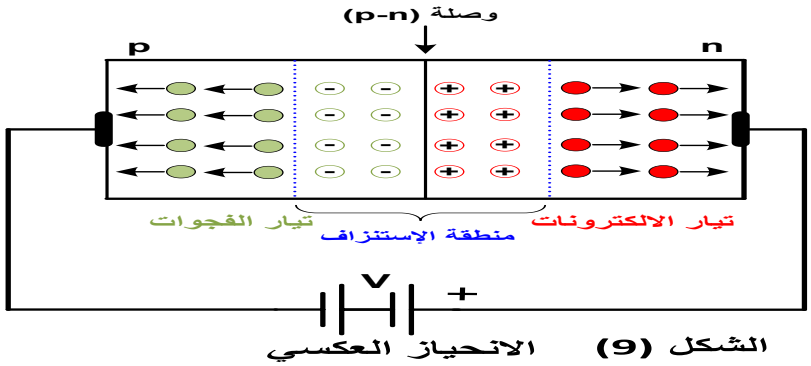


الجهد الحاجز والمقاومة الأمامية والمقاومة المحددة للتيار

ويمكن حساب قيمة هذه المقاومة من العلاقة التالية $r_B \approx \frac{0.3}{I_f}$ لثنائي الجرمانيوم حيث يمثل I_f التيار الأمامي المقاس عند (1v) .

المقاومة المحددة للتيار الأمامي : هي المقاومة التي تربط على التوالي مع الثنائي لغرض تحديد التيار المار خلاله ,وللمحافظة على الثنائي من التلف يتم اختيار قيمتها بحيث يكون دائما $I_f < I_f(\max)$.

الانحياز العكسي:



الشكل (9)

هناك عدد من التيارات في حالة الانحياز العكسي وهي

- ***تيار العبور الزائل*** **(transient current)** ***:*** وهو التيار الذي يمر في الدائرة خلال تكون طبقة الاستنزاف ويصبح صفر بعدما يقف نمو طبقة الاستنزاف ،ويستغرق هذا التيار بضع نانو ثانيه.

- ***تيار الحاملات الأقلية :*** وهو تيار بسيط يسري بعدما يستقر عرض طبقة الاستنزاف حيث أن الطاقة الحرارية تنتج أزواج " إلكترون - فجوة " قرب الوصلة لذا فهناك تيار صغير مستمر يدعى بتيار التشبع **(saturation current)** .

- ***تيار التسرب السطحي :*** تيار صغير يسري في الثنائي المنحاز عكسياً والذي يجري على سطح البلورة بسبب عدم اكتمال الأواصر أو تمزقها على السطح الخارجي للثنائي مما يؤدي إلى وجود فجوات على السطح ويزداد تيار التسرب السطحي **(surface-leakage current)** بازدياد الفولتية العكسية

فولتية الانكسار :

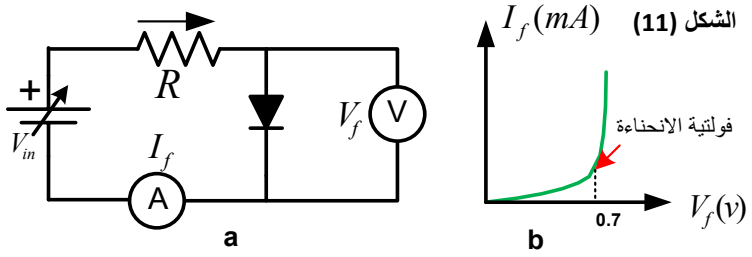
عند الاستمرار في زيادة قيمة الفولتية العكسية نصل أخيرا إلى فولتية الانكسار**break-down voltage** وتكون عادة اكبر من (50v) وحال الوصول إلى فولتية الانكسار تظهر أعداد كبيرة من الحاملات الأقلية في طبقة الاستنزاف وبذلك يكون توصيل الثنائي غزيراً ،

إن معظم الثنائيات لا يسمح لها الوصول إلى الانكسار ، وبعبارة أخرى ، فان **الفولتية العكسية المسلطة على الثنائي يجب أن تبقى اقل من فولتية الانكسار** . ***$PIV < V_B$***

ملاحظه كتقريب مثالي يعمل الثنائي عمل مفتاح مغلق **ON** في حالة الانحياز الأمامي و يعمل مفتاح مفتوح **OFF** في حالة الانحياز العكسي .

المنحنى الأمامي للثنائي :

الشكل (11-a) يبين دائرة يمكن بنائها في المختبر وبما أن المصدر المستمر يدفع تيار في نفس اتجاه سهم الثنائي يكون الثنائي منحاز أماميا ، وكلما ازدادت فولتية المصدر نلاحظ زيادة تيار الثنائي والذي يمكن قياسه بواسطة استخدام اميتر على التوالي . وقياس فولتية الثنائي بواسطة ربط جهاز فولتميتر بالتوازي على الثنائي . وبرسم قيم التيارات والفولتيات نحصل على الرسم البياني لتغير التيار مع فولتية الثنائي .



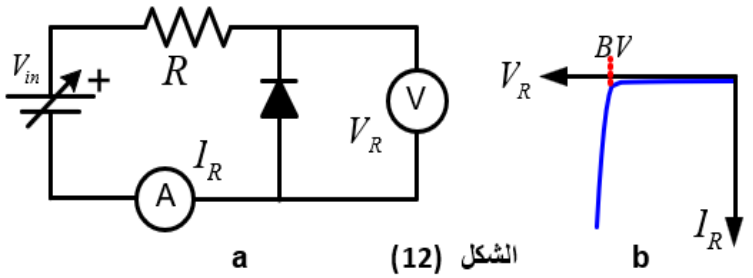
الشكل (11)

في الشكل (11-b) يظهر الرسم البياني لثنائي سليكون في حالة انحياز أمامي ، إن الرسم يخبرنا إن الثنائي لا يوصل بصورة جيدة **حتى التغلب على الجهد الحاجز** ومقداره **(0.7v) للسليكون و للجرمانيوم(0.3v)** وهذا هو السبب أن التيار يكون صغيرا لبضعة الأعشار الأولى من الفولت ،إن الفولتية التي يبدأ التيار عندها بالزيادة السريعة تسمى فولتية المفصل أو الانحناءة (knee voltage) وهي تساوي **فولتية الجهد الحاجز** . فوق فولتية الانحناءة يزداد تيار الثنائي بحدة حيث أن زيادة طفيفة في فولتية الثنائي تسبب زيادة كبيرة في تياره . وكل ما يعيق التيار بعد التغلب على الجهد الحاجز هو المقاومة الإجمالية $r_B = R_p + R_n$ **(bulk resistance)**

أقصى تيار أمامي مستمر $I_{F(\max)}$ ***:*** وهو يمثل اكبر تيار أمامي يمكن أن يتحمله الثنائي قبل أن يتلف أو تتغير صفاته ولذلك فان استمارة معلومات المصنع تبين أقصى تيار يستطيع الثنائي تحمله دون أن يقصر عمره أو تتلفه . وهذا يفسر استخدام مقاومة على التوالي مع الثنائي وهي المقاومة المحددة للتيار (current – limiting resistor) وكلما كبرت قيمة R كان تيار الثنائي اقل .

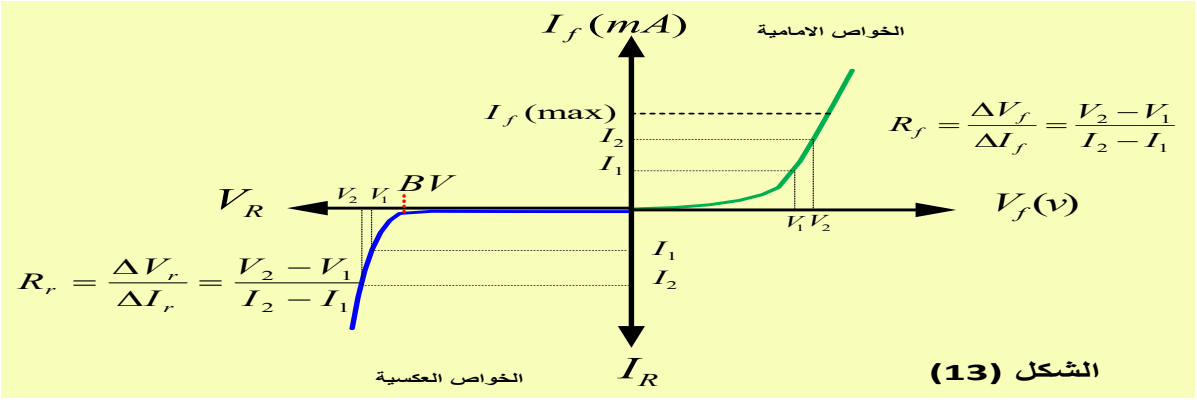
منحنى الثنائي العكسي :

عندما ينحاز ثنائي عكسيا الشكل(12-a) نحصل على تيار صغير فقط وبواسطة قياس تيار وفولتية الثنائي نستطيع رسم منحني الانحياز العكسي للثنائي الشكل (12-b) . إن تيار الثنائي يكون صغيرا جدا لكل الفولتيات العكسية التي تقل قيمتها عن فولتية الانكسار ***BV*** . عند الانكسار يزداد التيار بسرعة كبيرة نتيجة لزيادات قليلة في الفولتية



الشكل (12)

وباستخدام قيم موجبه للفولتية وللتيار الأمامي . وقيم سالبه للتيار والفولتية العكسية نستطيع أن نرسم منحني يمثل عمل الثنائي في الاتجاهين الأمامي والعكسي كما في الشكل (13)



الشكل (13)

الدائرة المكافئة للثنائي

الثنائي المثالي(ideal-diode) :

يعمل الثنائي المثالي (التقريب الأول) عمل موصل تام (فرق الجهد عليه يساوي صفر) في حالة الانحياز الأمامي وعمل عازل تام (التيار يساوي صفر) في حالة الانحياز العكسي . لاحظ الشكل . وبمفهوم آخر يعمل الثنائي المثالي عمل مفتاح ذاتي **automatic switch** فعندما يحاول تيار المرور بنفس اتجاه سهم الثنائي يكون المفتاح مغلقا . وعندما يحول تيار المرور عكس اتجاه سهم الثنائي يكون المفتاح مفتوح.

التقريب الثاني (Second-Approximation) :

في حالة التقريب الثاني فولتية الجهد الحاجز تؤخذ بنظر الاعتبار وهذا يعني إن التيار لا يمر خلال الثنائي حتى نجتاز قيمة الجهد الحاجز ، الدائرة المكافئة للتقريب الثاني ، نتصور الثنائي مفتاح على التوالي مع بطارية قيمتها (0.7v) للسيلكون و (0.3v) للجرمانيوم .

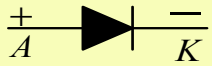
التقريب الثالث(Third-Approximation) :

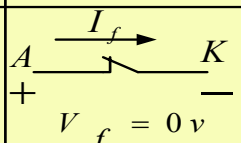
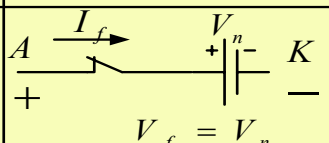
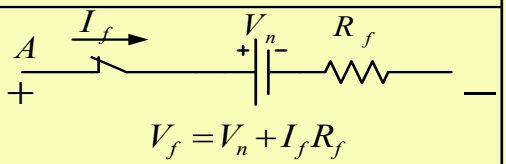
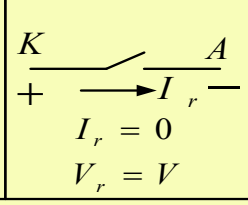
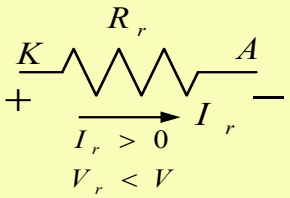
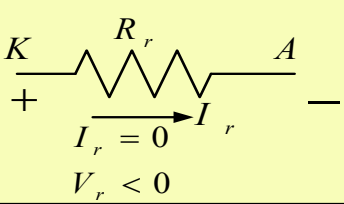
في هذا التقريب ندخل المقاومة الإجمالية r_B ضمن حساباتنا فعندما يكون الثنائي منحاز أماميا فان التيار ينتج فولتية على المقاومة r_B ، وكلما كبر التيار كبرت قيمة الفولتية ، الدائرة المكافئة للتقريب الثالث عبارة عن مفتاح و وبطارية قيمتها (0.7v) لثنائي السليكون و (0.3v) لثنائي الجرمانيوم ومقاومة مقدارها r_B

فولتية الذروة العكسية (PIV):

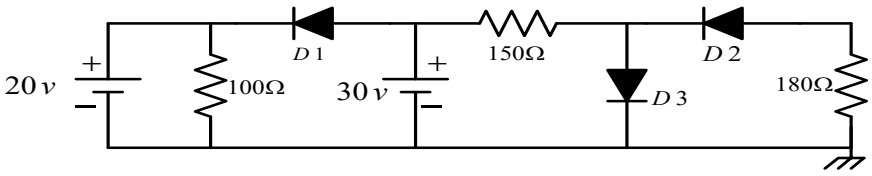
وهي تلك الفولتية العكسية التي يجب أن يتحملها الثنائي دون حدوث الانكسار.

جدول تقاريب الثنائي (الدائرة المكافئة)



حالة الانحياز	التقريب الاول (الحالة المثالية)	التقريب الثاني	التقريب الثالث
الامامي فولتية الانود اكبر من فولتية الكاثود			
العكسي فولتية الانود أقل من فولتية الكثود			

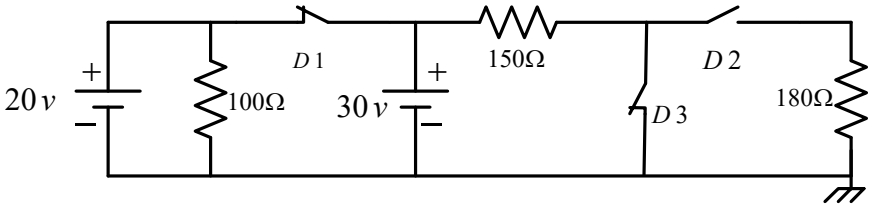
مثال١ : ارسم الدائرة المكافئة للدائرة الالكترونية المبينة أدناه , علما بان الثنائيات سليكون في **الحالة المثالية**.



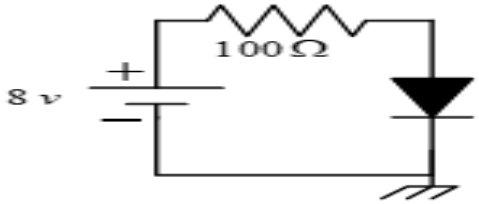
الحل : لرسم الدائرة المكافئة في أي من التقاريب الثلاثة التي تم ذكرها في جدول تقاريب الثنائي , علينا أولا تحديد حالة كل ثنائي في الدائرة هل هو منحاز أماميا أم عكسيا , وعليه فإن الدائرة أعلاه سيكون فيها :

D3 & D1 ذو انحياز أمامي D2 ذو انحياز عكسي

ولهذا ستكون الدائرة المكافئة لها في الحالة المثالية كما مبين أدناه :



مثال ٢ : في الدائرة المرسومة أدناه إذا كان الثنائي المستخدم جرمانيوم يعمل في درجة حرارة 25°C والمقاومة الأمامية له **10 Ω** والمقاومة العكسية **200 MΩ** . أوجد الفولتية على طرفيه والتيار المار فيه , في كل من حالات التقاريب الثلاثة .

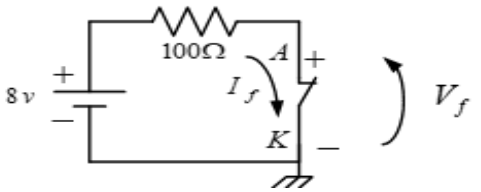


الحل: واضح من الدائرة أن الثنائي منحاز أمامي وعليه سيكون التيار والفولتية هي كما يلي:

التقريب الاول (الحالة المثالية)

$$V_f = 0v$$

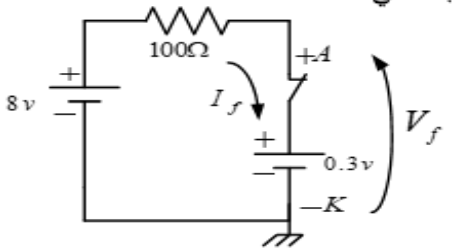
$$I_f = \frac{8}{100} = 0.08A = 80mA$$



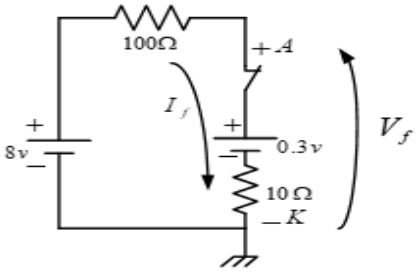
التقريب الثاني

$$V_f = 0.3volt$$

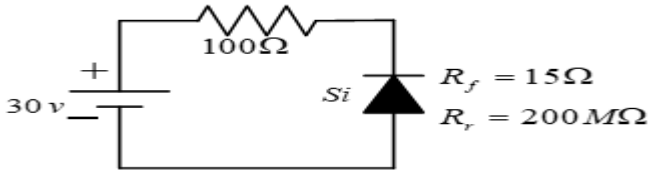
$$I_f = \frac{8-0.3}{100} = 0.077A = 77mA$$



$$I_f = \frac{8-0.3}{100+10} = 0.07\,A = 70\,mA$$
$$V_f = 0.3 + 70*10^{-3}*10$$
$$V_f = 0.3 + 0.7 = 1volt$$

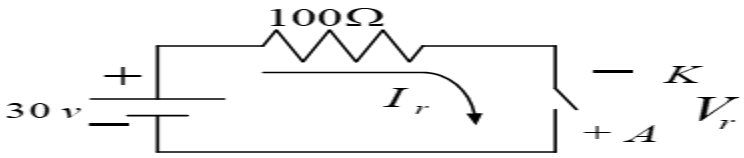


مثال٣ : أوجد فولتية الثنائي والتيار المار فيه في الدائرة التالية .



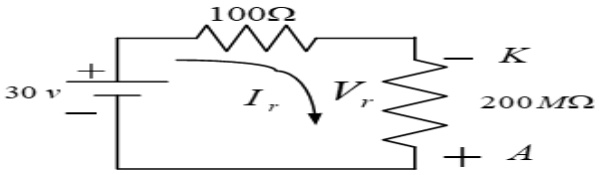
الحل: في هذه الدائرة الثنائي منحاز عكسي

الحالة المثالية



$$I_r = 0$$
$$V_r = -30\ volt$$

التقريب الثاني والثالث



$$I_r = \frac{30}{100+200*10^{+6}} \approx 0.15*10^{-6}\,A = 0.15\mu A$$ قليل جدا
$$V_r = -200*10^{6}*0.15*10^{-6} = -30volt$$

دوائر الثنائي Diode Circuits

توحيد الموجة المتناوبة (A.C Rectification)

نظراً لمقدرة الثنائي على السماح للتيار للمرور في اتجاه واحد ومنع مروره في الاتجاه العكسي فان الثنائيات تستخدم في دوائر التوحيد أو التقويم (Rectification Circuits) والموجودة بمصادر القدرة ذات التيار المستمر(D.C) والتي تعمل على مصادر الجهد المتناوب (A.C) وان مصدر القدرة ذو التيار المستمر جزء ضروري في كل الأنظمة الالكترونية .

$(A.C)$ { التيار المتناوب } [Alternating Current] ويكون على شكل موجة جيبية

$(D.C)$ { التيار المستمر } [Direct Current] ويكون على شكل خط مستقيم

{ الإنحياز الأمامي / الإنحياز العكسي } (طرق تجهيز الفولتية للثنائي)

فولتية الإدخال الفعالة $(V_{r.m.s})$ = فولتية المصدر المتناوبة (v_s)

$(V_{r.m.s})$ { فولتية متوسط جذر التربيع } [root mean square voltage]

(v_s) { فولتية المصدر } [source voltage]

(V_P) { فولتية الذروة ، الفولتية الابتدائية العظمى } [peak voltage]

(V_{P-P}) { الفولتية العظمى الى العظمى } [peak to peak voltage]

N_1 { عدد لفات الملف الابتدائي }

N_2 { عدد لفات الملف الثانوي }

(V_m) { الفولتية الثانوية العظمى } [maximum voltage] = (V_{in}) فولتية الإدخال للثنائي

(i_D) { التيار المار في الثنائي } [Diode current]

(i_L) { التيار المار في الحمل } [Load current]

(v_{out}) { فولتية الإخراج } [Output voltage] وهي الفولتية المتولدة على الحمل

(PIV) { فولتية الذروة العكسية } [Peak Inverse Voltage]
وهي الفولتية المتولدة على طرفي الثنائي (المفتاح المفتوح) في الإنحياز العكسي

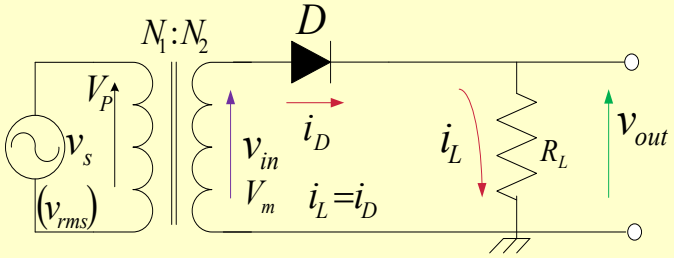
(T) { زمن الموجة } (زمن الإشارة)

$T_{in} = T_{out}$ (كل دورة في الإدخال تنتج دورة واحدة في الإخراج)

(R_F) { المقاومة الأمامية } [Front Resistance]

(R_R) { المقاومة العكسية } [ ]

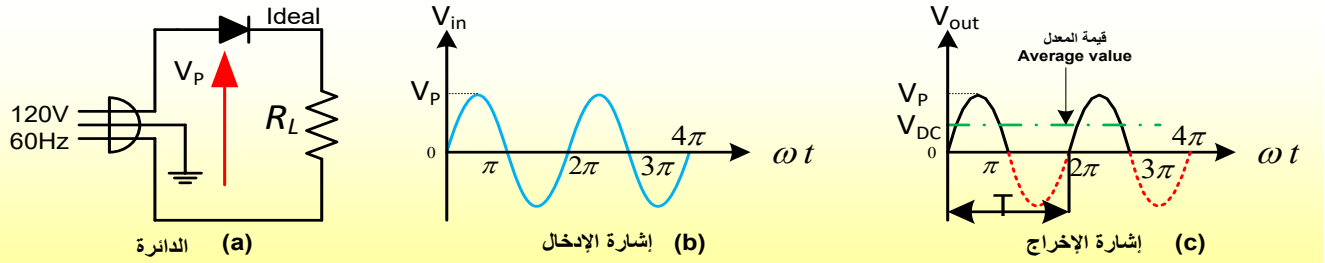
(R_L) { مقاومة الحمل } [Load Resistance]



دائرة موحد نصف الموجة

موحد نصف الموجة Half-Wave Rectifier

الشكل (1-a) عبارة عن موحد نصف موجة ، وهي تلك الدائرة التي تحول فولتية التيار المتناوب (Ac) إلى فولتية تيار مستمر (Dc) نبضي. خلال نصف الذبذبة الموجب لفولتية الدخل يكون الثنائي منحاز أماميا و يسمح للتيار بالمرور خلاله إلى مقاومة الحمل ، أما خلال نصف الذبذبة السالب فيكون الثنائي منحاز عكسياً ولا يسمح للتيار بالمرور خلاله إلى مقاومة الحمل . هذا هو السبب إن الفولتية على مقاومة الحمل (R_L) عبارة عن إشارة نصف موجيه كما مبين في الشكل (1-c). علما أن الشكل (1-b) هو موجة الادخال الجيبية المتناوبة .



الشكل (1) موحد نصف موجة

ملاحظـــــــة: إن العلاقـــــة بـــــين قيمتـــــي جـــــذر متوســـــط التربيـــــع والـــــذروة

$$Vrms = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_P = V_{rms} * \sqrt{2}$$

قيمة المعدل و تردد الإخراج:

إن قيمة المعدل (average value) لجهد الخرج لموحد نصف موجة (**القيمة المستمرة**) لإشارة نصف موجية هي:

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi}$$

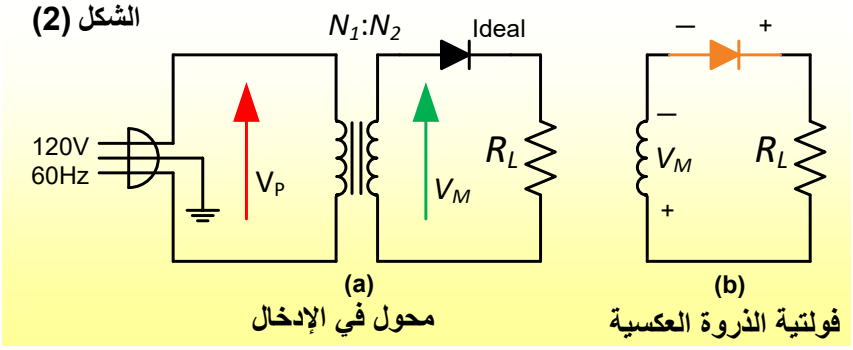
حيث أن π تساوي تقريبا (3.14) . نلاحظ في الشكل (1-c) حيث تكون فترة إشارة الإخراج (زمن الذبذبة)(**Period {T}**) نفس فترة إشارة الإدخال . فكل ذبذبة في الإدخال تنتج ذبذبة واحده في الإخراج وهذا هو السبب في إن تردد الإخراج في موحد نصف الموجه يساوي تردد الإدخال .

$$f_{out} = f_{in}$$

المحول و فولتية الذروة العكسية:

إن فوائد استخدام المحول (transformer) في مدخل الأجهزة الالكترونية وكما موضح في الشكل (2-a)

- رفع أو **خفض** الفولتية
- يقوم بعزل الدائرة عن المصدر الخارجي مما يقلل احتمال الإصابة بصدمة كهربائية .



الشكل (2)

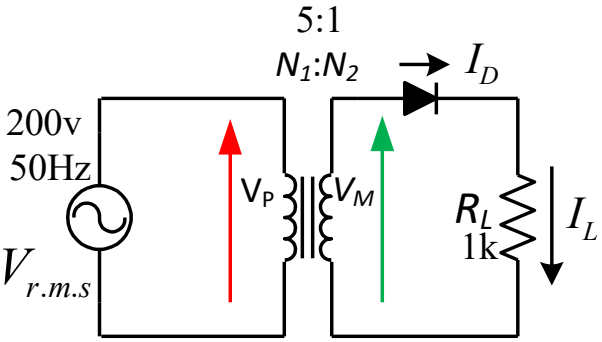
فولتية الذروة العكسية (peak inverse voltage) PIV وهي الفولتية العظمى التي يجب أن يتحملها الثنائي خلال الجزء العكسي (النصف السالب) من الموجة دون ان ينهار.

$$PIV = V_m$$

القيمة	الإدخال V_{in}	الإخراج V_{out}
العظمى V_P	V_m	V_m
الفعالة $V_{r.m.s}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$
المستمرة $V_{D.C}$	0	$\frac{V_m}{\pi}$
العظمى إلى العظمى V_{P-P}	$2V_m$	V_m
التردد f	$\frac{1}{T}$	$\frac{1}{T}$
المعدل الزمني للتكرار/ ثا	$f_{out} = f_{in}$	

مثال٤: في دائرة موحد نصف الموجة إذا كانت فولتية المصدر 200v/50Hz ونسبة لف المحولة 5:1 احسب القيمة المستمرة لفولتية الإخراج .

الحل:



$$V_{r.m.s} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \Rightarrow [V_p = V_{rms} * \sqrt{2}]$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_P}{V_M} \Rightarrow V_m = \frac{V_P * N_2}{N_1}$$

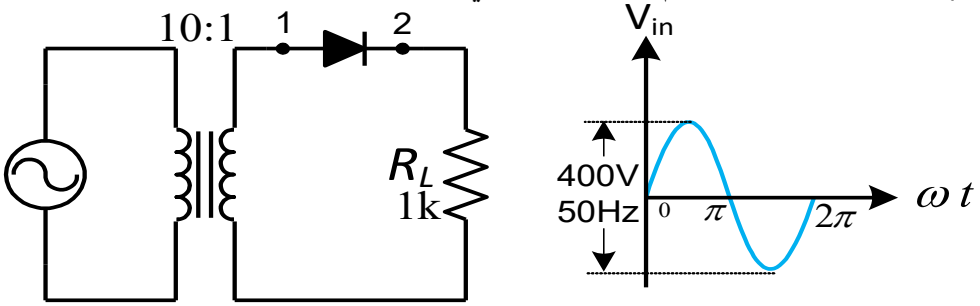
$$\left[V_m = \frac{V_{rms} * \sqrt{2}}{N_1}\right]$$

$$V_m = \frac{200 * \sqrt{2}}{5} = 56.56volt$$

$$V_{DC(out)} = \frac{V_m}{\pi} = \frac{56.56}{3.14} = 18volt$$

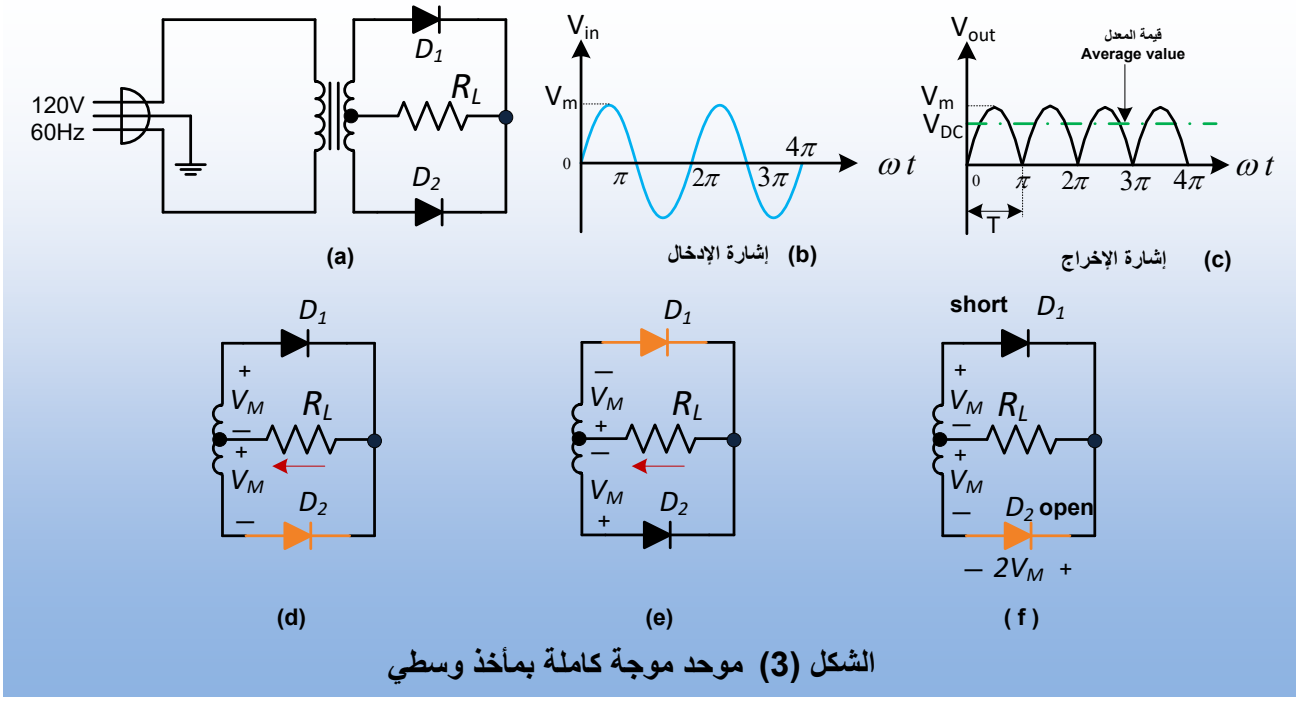
سؤال واجب : في دائرة موحد نصف الموجة المبينة في الشكل أدناه ، ***المطلوب:***

فولتية الذروة في النقطة (1) ، قيمة الفولتية المستمرة ($V_{d.c}$) والتيار المستمر($I_{d.c}$)على مقاومة الحمل(R_L) ، تردد الإخراج (f_{out}) وزمن الموجة T، ارسم شكل الموجة في النقطتين 1&2.



موحد الموجة الكاملة ذو محولة المأخذ الوسطي (Full-Wave Centre-tapped Rectifier)

الشكل (3) يبين موحد بمأخذ وسطي



الشكل (3) موحد موجة كاملة بمأخذ وسطي

خلال نصف الذبذبة الموجب لفولتية الملف الثانوي يكون الثنائي العلوي (D_1) منحاز أماميا . و يكون الثنائي السفلي (D_2) منحاز عكسيا . لذلك يمر تيار في الثنائي العلوي ومقاومة الحمل والنصف العلوي من الملف . لاحظ الشكل (3-d).

وفي خلال نصف الذبذبة السالب لفولتية الملف الثانوي يكون الثنائي العلوي(D_1) منحاز عكسيا . ويكون الثنائي السفلي (D_2) منحاز أماميا ولذلك سيمر تيار خلال الثنائي السفلي ومقاومة الحمل والنصف السفلي من الملف ، الشكل (3-e) ، ويكون تيار الحمل بنفس الاتجاه ، وهذا السبب في إن فولتية الحمل هي الإشارة الموجية الكاملة (full-wave) لاحظ الشكل (3-c)

قيمة المعدل وتردد الإخراج لموحد بمأخذ وسطي :

إن قيمة الفولتية المعدلة أو المستمرة لإشارة الموجة الكاملة (full-wave) هي : $V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}$

تكون فترة إشارة الإخراج لموحد الموجة الكاملة نصف فترة الإدخال لاحظ الشكل (3-c) وبعبارة أخرى فان كل ذبذبة إدخال تنتج ذبذبتين في الإخراج وهذا هو سبب كون تردد الإخراج في موحد الموجة الكاملة يساوي ضعف تردد الإدخال . $f_{out} = 2f_{in}$

فولتية الذروة العكسية لموحد بمآخذ وسطي (PIV)

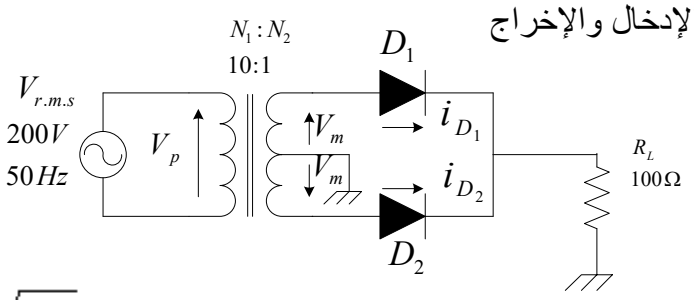
إن الفولتية العكسية على الثنائي المنحاز عكسي تساوي ($2V_m$) أي $PIV = 2V_m$

القيمة	V_{in} الإدخال	V_{out} الإخراج
العظمى V_P	V_m	V_m
الفعالة $V_{r.m.s}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$
المستمرة $V_{D.C}$	0	$\frac{2V_m}{\pi}$
العظمى إلى العظمى V_{P-P}	$2V_m$	V_m
التردد f	$\frac{1}{T_{in}}$	$\frac{1}{T_{out}}$
المعدل الزمني للتكرار/ ثا	$f_{out} = 2f_{in}$	

مثاله : موحد بمأخذ وسطي يتغذى من مصدر فولتية جيبية مقدارها 200v وترددها 50Hz عن طريق محولة نسبة اللف فيها (10:1) . ربط مع حمل مقداره (100 Ω) , ارسم الدائرة الكهربائية ثم جد :

فولية وتيار الحمل المستمرة , التيار المعدل في كل ثنائي , تردد إشارة الإخراج , قيمة PIV
أرسم شكل إشارتي الإدخال والإخراج

الحل :



$$V_{r.m.s} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

$$V_P = V_{r.m.s} * \sqrt{2} = 200 * \sqrt{2} = 282.8v$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_P}{V_m} \Rightarrow V_m = \frac{V_P * N_2}{N_1} = \frac{282.8*1}{10} = 28.2v$$

$$V_m = V_{in} = \frac{V_m}{2} = 14.14v$$ الفولتية على نصف الملف الثانوي

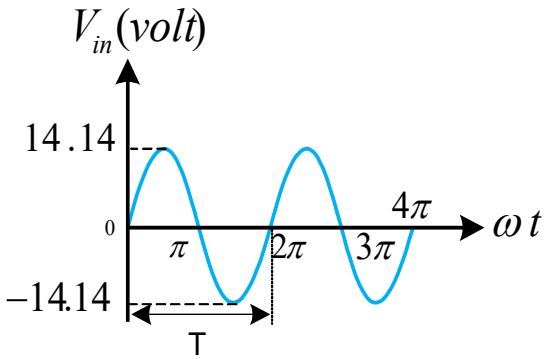
$$V_{D.C} = \frac{2V_m}{\pi} = \square \frac{2*14.14}{3.14} = 9v$$

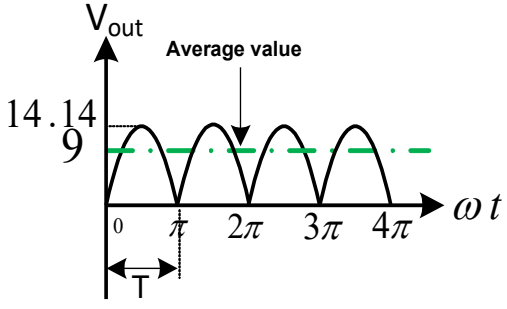
$$I_{D.C} = \frac{V_{D.C}}{R_L} = \frac{9}{100} = 0.09A = 90mA$$

$I_D = 0.5\ I_{DC} = \frac{90}{2} = 45mA$

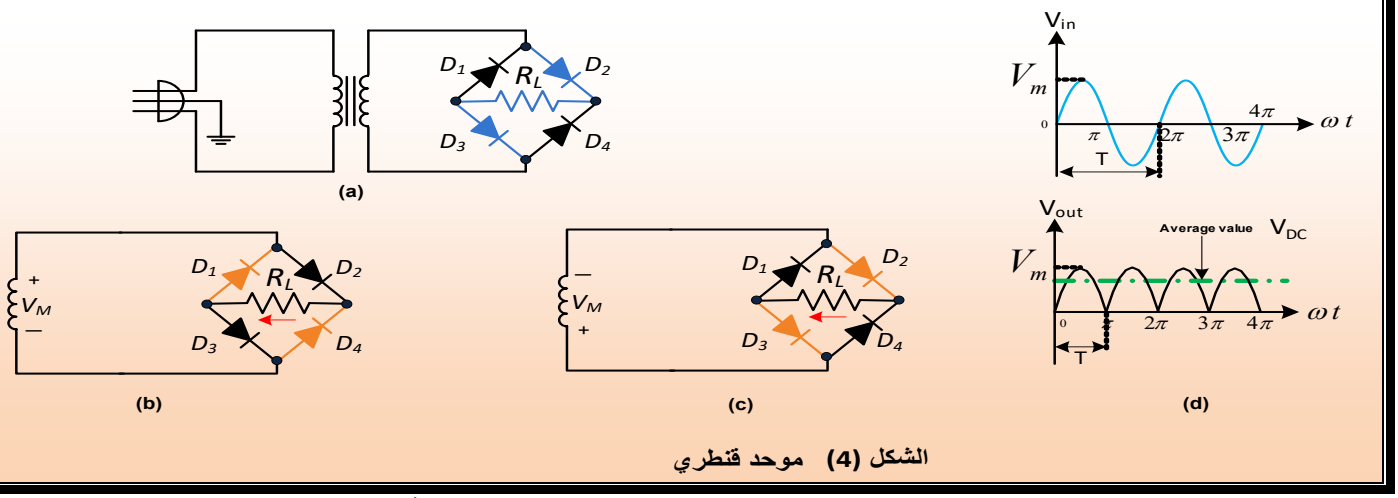
$$f_{out} = 2f_{in} = 2*50 = 100Hz$$

PIV= 2Vm $= 2*14.14 = 28.28v$





موحد الموجة الكاملة القنطرى (Full-wave Bridge Rectifier) :



الشكل (4) موحد قنطري

في النصف الموجب لموجة الإدخال V_{in} فإن D2&D3 يكونان في حالة انحياز أمامي و D4&D1 يكونان في حالة انحياز عكسي فيمر تيار في D3&D2 ومقاومة الحمل R_L , وهذا ينتج نصف موجة موجب لفولتية الإخراج V_{out} .

أما في النصف السالب لموجة الإدخال V_{in} فإن D4&D1 يكونان في حالة انحياز أمامي و D3 &D2 يكونان في حالة انحياز عكسي وهذا ينتج أيضا نصف موجة موجب لفولتية الإخراج V_{out} بسبب مرور تيار الحمل i_L بنفس المسار الذي سلكه خلال النصف الموجب لموجة الإدخال V_{in} . وعليه ستكون موجة الإخراج V_{out} الكلية مشابهة تماما لدائرة موحد المأخذ الوسطي . الشكل (4)

** إن قيمة المعدل أو القيمة المستمرة لفولتية الاخراج هي : $$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}$$

** أما تردد الإخراج فهو ضعف تردد الإدخال : $$f_{out} = 2f_{in}$$

** أما قيمة فولتية الذروة العكسية فهي : $$PIV = V_m$$

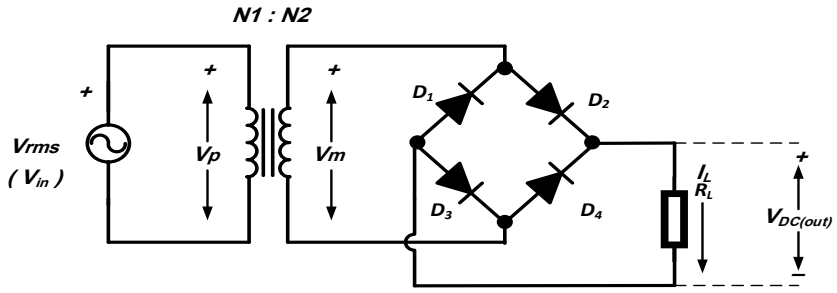
مقارنة بين دوائر التوحيد

عامل المقارنة	موحد نصف الموجة	موحد الموجة الكاملة ذو المأخذ الوسطي	موحد الموجة الكاملة القنطري
عدد ثنائيات القدرة اللازمة	**1**	**2**	**4**
ضرورة المحولة	**نوعا ما**	**ضرورية ومن نوع التفرع الوسطي**	**غير ضرورية**
الفولتية المستمرة للإخراج	$\frac{V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$
القيمة العظمى لفولتية الإخراج	**مثاليا** V_m **بالتقريب الثاني** $V_m - V_b$	V_m $V_m - V_b$	V_m $V_m - 2V_b$
القيمة الفعالة $V_{r.m.s}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$
فولتية الذروة العكسية (PIV) لكل ثنائي	V_m	$2V_m$	V_m
التردد Frequency	$f_{out} = f_{in}$	$f_{out} = 2f_{in}$	$f_{out} = 2f_{in}$

مثال٦: في دائرة الموحد القنطري , إذا كانت الفولتية العظمى على الملف الثانوي للمحولة **68 V** .

المطلوب : إيجاد التيار المستمر في مقاومة الحمل 100 Ω وكذلك التيار المستمر في كل ثنائي في حالة التقريب الأول والثاني . علما أن *الثنائيات* مصنوعة من ***السليكون*** .

الحل :



في التقريب الأول (المثالي) :

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 * 68}{3.14} = 43.3\ \text{V}$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L} = \frac{43.3}{100} = 0.433A = 433\ mA$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{1}{2} I_{DC} = \frac{433}{2} = 216.5\ mA$$

في التقريب الثاني :

الفولتية الي تنتج التيار المار في الثنائي هي :

$$V'_m = V_m - 2V_b = 68 - (2 * 0.7) = 66.6v$$

$$V_{DC} = \frac{2V'_m}{\pi} = \frac{2 * 66.6}{3.14} = 42.42v$$

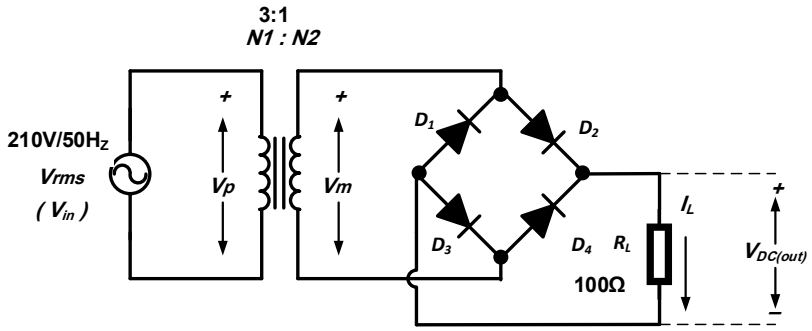
$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L} = \frac{42.42}{100} = 0.424A = 424.2mA$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{1}{2} I_{DC} = \frac{424.2}{2} = 212.1mA$$

مثال ٧ : في دائرة الموحد القنطري , إذا كانت فولتية المصدر (210v/50Hz) ونسبة تحويل المحولة (N1:N2=3:1)ومقاومة الحمل (100 Ω) . ارسم الدائرة ثم جد :

١. التيار المستمر في كل ثنائي .
٢. القدرة الفعالة المستهلكة في الحمل .
٣. ارسم شكل فولتية ألإخراج مبينا عليها القيمة العظمى والزمن (T_{out}) .

الحل :



$$V_p = V_{r.m.s} * \sqrt{2} = 210 * \sqrt{2} = 296.98v$$

$$V_m = \frac{V_P * N2}{N1} = \frac{296.98 * 1}{3} = 98.99v$$

$$V_{D.C} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 * 98.99}{3.14} = 63v$$

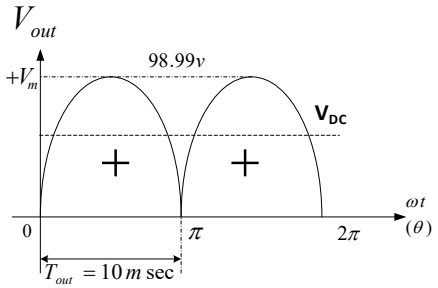
$$I_{D.C} = \frac{V_{D.C}}{R_L} = \frac{63}{100} = 0.63A$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{I_{DC}}{2} = \frac{0.63}{2} = 0.315A$$

$$V_{r.m.s}(out) = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{98.99}{\sqrt{2}} = 70v$$

$$P_L(r.m.s) = \frac{V^2{}_{r.m.s}(out)}{R_L} = \frac{(70)^2}{100} = 49watt$$

$$T_{out} = \frac{1}{f_{out}} = \frac{1}{2 * f_{in}} = \frac{1}{2 * 50} = \frac{1}{100} = 10ms$$

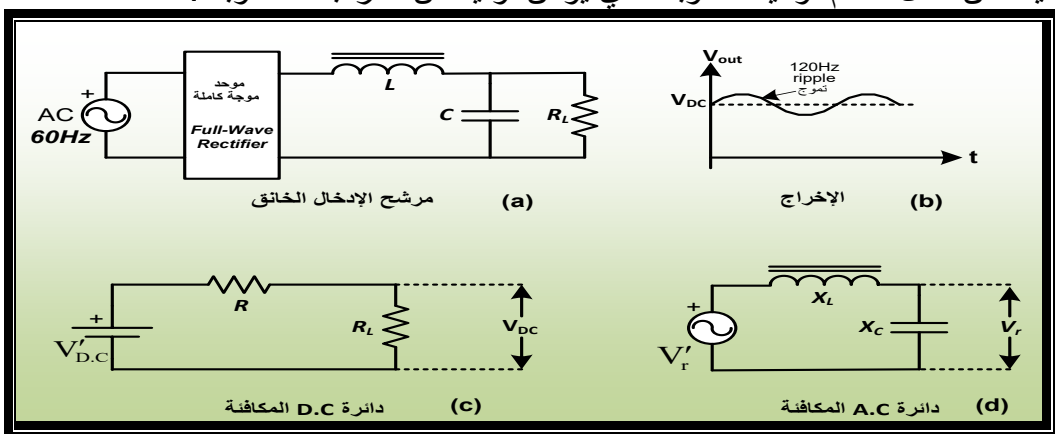


الترشيح (Filtering)

إن استخدام الفولتية المستمرة النبضية مقتصر على شحن البطاريات وتحريك المحركات المستمرة وعلى تطبيقات قليلة أخرى . أما ما نحتاجه فعلاً فهي فولتية مستمرة ثابتة القيمة تشبه فولتية البطارية ، وللحصول على ذلك يجب أن نرشح filter أو ننعم smooth التغيرات المتناوبة .

مرشح الإدخال الخانق Choke-input filter

الشكل (a) يبين موحد (مقوم) موجة كاملة يغذي ملفاً خانقاً choke (ملف محاثة ذو قلب حديدي) ومتسعة ومقاومة حمل . الموجة الخارجة من الموحد لها مركبتان إحداهما مركبة مستمرة (مرغوب فيها) ومركبة متناوبة (غير مرغوب فيها) . يسمح الملف الخانق للمركبة المستمرة بالمرور لان ***X_L تساوي صفر بالنسبة للتيار المستمر*** وبما إن المتسعة تمثل دائرة مفتوحة عند تردد مقداره صفر ولذلك فان كل التيار المستمر الخارج من الخانق يمر خلال المقاومة R_L . أما المركبة المتناوبة الخارجة من الموحد فلها تردد مقداره 120Hz ويقوم ***الخانق بحجز هذه المركبة المتناوبة لان X_L تكون كبيرة عند هذا التردد*** . كذلك تقوم المتسعة بتمرير أي مركبة متناوبة استطاعت المرور خلال الخانق لان ***X_C قليله بالنسبة للتيار المتناوب*** (دائرة قصر) بدلاً من المرور خلال R_L . وبذلك فان الخانق والمتسعة يعملان عمل مقسم فولتية متناوبة الذي يوهن أو يقلص المركبة المتناوبة .



الإخراج المستمر :

نلاحظ في الشكل (b) إخراج المرشح والذي يبين مركبة مستمرة كبيرة وأخرى متناوبة صغيرة . تحسب المركبة المستمرة بالمعادلة :

$$V_{DC} = \frac{R_L}{R + R_L} * V'_{DC}$$

حيث إن V_{DC} الفولتية المستمرة على مقاومة الحمل R_L

R مقاومة الخانق المستمرة

V'_{DC} هي الفولتية المستمرة الخارجة من موحد الموجة الكاملة .

إن مقاومة الحمل ومقاومة الخانق يشكلان مقسم فولتية عند تردد مقداره صفر لاحظ الشكل (c) حيث تكون R اصغر بكثير من R_L لذلك فان معظم الفولتية المستمرة تصل إلى الحمل .

تموج الإخراج :

إن تردد الإشارة المتناوبة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة مقداره (120Hz)، إن المركبة الموجودة فوق المركبة المستمرة والغير مرغوب فيها تدعى التموج ripple . ويمكن حساب قيمة فولتية التموج V_r بالمعادلة :

$$V_r = 5.28(10^{-7}) * \frac{V_P}{LC}$$

عامل التموج Ripple Factor:

إن عامل التموج هو رقم يستخدم للمقارنة بين أجهزة القدرة ويعرف كنسبة مئوية وكما يلي :

$$r = \frac{V_r}{V_{DC}} * 100\%$$

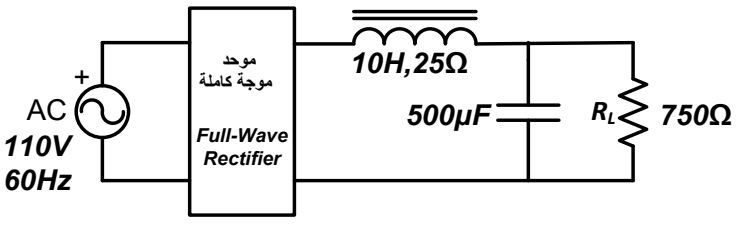
كلما كانت قيمة **r** اصغر كان ذلك الجهاز أفضل

المحاثة الحرجة : تعرف المحاثة الحرجة **Critical Inductance** بالمحاثة الصغرى التي تعطي ترشيحا جيداً .
وتحسب قيمة المحاثة الحرجة لمقوم موجة كاملة عند تردد دخل مقداره (60Hz) بالمعادلة :

$$L_{critical} \cong \frac{R_L}{1000}$$

وكلما كبرت المحاثة عن تلك القيمة كان الترشيح جيد.

مثال ٨ : في الدائرة التالية , احسب عامل التموج المئوي إذا كانت قيمة الفولتية العظمى الخارجة من الموحد هي 25.7v .

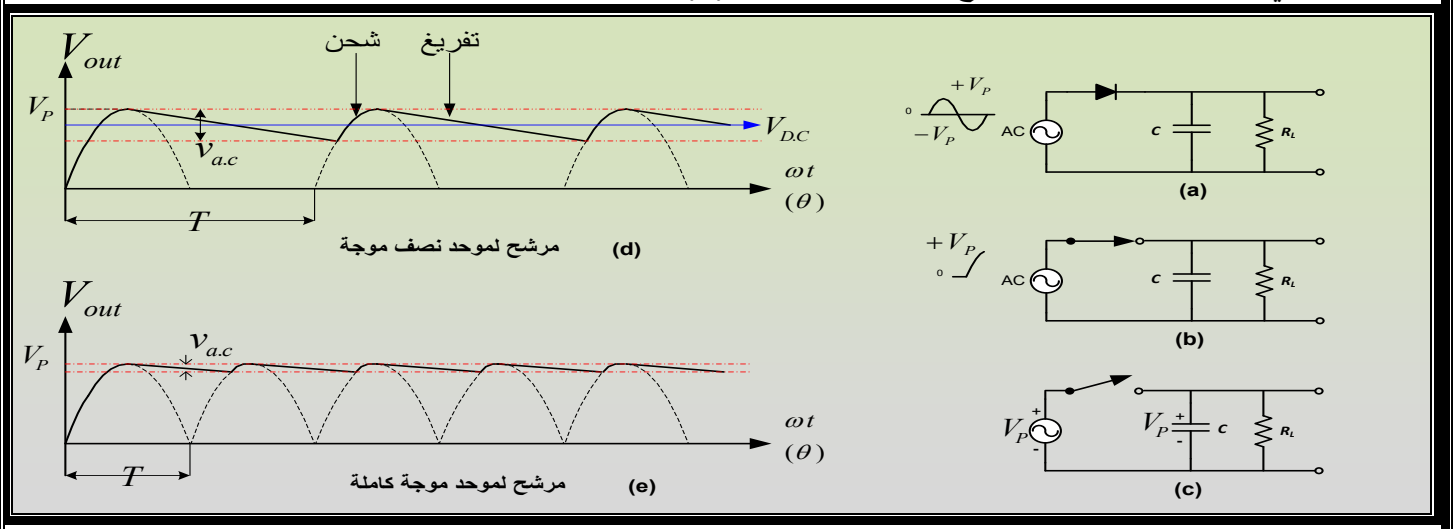


الحل :

$$V_r = 5.28 * 10^{-7} \frac{V_P}{LC} = 5.28 * 10^{-7} \frac{25.7}{10 * 500 * 10^{-6}}$$
$$= 0.00271volt = 2.71 * 10^{-3} volt$$
$$V_{D.C}^{'} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 * 25.7}{3.14} = 16.4v$$
$$V_{D.C} = \frac{R_L}{R_L + R} V_{D.C}^{'} = \frac{750}{750 + 25} * 16.4 = 15.9volt$$
$$\%r = \frac{V_r}{V_{D.C}} * 100 = \frac{2.71 * 10^{-3}}{15.9} * 100 = 0.017\%$$

مرشح الإدخال السعوي Capacitor-input filter

إن مرشح الإدخال السعوي يعتمد على كشف الذروة بدلاً من كشف القيمة المعدلة كما في مرشح الإدخال الخانق . الشكل(a) يبين مرشح إدخال سعوي ،نلاحظ استخدام المتسعة عوضا عن الملف الخانق وبالتالي يتغير عمل المرشح من كشف القيمة المعدلة إلى كشف الذروة . في خلال ربع الذبذبة الأول من فولتية الإدخال يكون الثنائي في وضع انحياز أمامي ، ويظهر مثاليا كأنه مفتاح مغلق لاحظ الشكل (b) .



الشكل (d) يبين شكل موجة الإخراج لمرشح الإدخال السعوي مع موحد نصف موجة ولفولتية ذروة V_p . إن فولتية إشارة الخرج هذه ثابتة تقريبا واختلافها الوحيد عن الفولتية المستمرة ألصرفه هي التموج الصغير الناتج عن شحن وتفريغ المتسعة ، وكلما كان التموج صغيرا كان ذلك أفضل .

إن المرشح السعوي يسمى أيضا **كاشف الذروة**

إن موحد موجة كاملة (قنطري أو بمأخذ وسطي) مربوط مع متسعة ينتج تقويم ذروة أفضل لان المتسعة تنشحن مرتين لاحظ الشكل (e) لذا يكون التموج اصغر وتقترب فولتية الإخراج المستمرة من فولتية الذروة ، لذلك تكون موحدات ذروة الموجة الكاملة أكثر استعمالا . وفي دوائر الموجة الكاملة ذات التردد (60Hz) تكون فترة الإخراج

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{120} = 8.33ms$$

وللحصول على ثابت زمن طويل يجب أن يكون ***($R_L * C$)*** أكبر بكثير من **(8.33ms)** على الأقل بعشر مرات وهذا يعني أن

$$R_L * C \geq 83.3ms$$

وعندما يتحقق هذا الشرط يمكن استخدام التقاريب التالية على موحدات الموجة الكاملة

$$\%\, r = \frac{v_r}{V_{D.C}} * 100\ \%$$

حيث

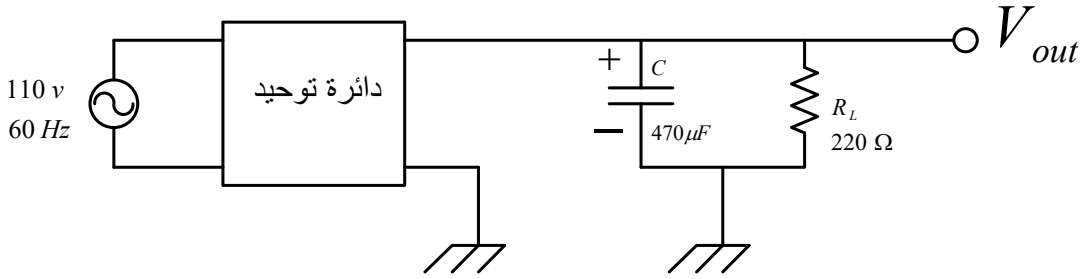
فولتية التموج الفعالة $v_r = \frac{0.0024\ V_m}{R_L C}$ (فولت)

الفولتية المستمرة $V_{D.C} = (1 - \frac{0.00417}{R_L C}) V_m$ (فولت)

المتسعة الصغرى : هي اصغر قيمة لسعة المتسعة التي تعطي ترشيحاً جيداً وتحسب بالمعادلة

$$C_{\min} = \frac{0.24}{r * R_L}$$

مثال ٩ : في الدائرة المرسومة أدناه , إذا كانت القيمة العظمى للفولتية الخارجة من الموحد هي 30v .
احسب عامل التموج المئوي r % .



الحل : لما كان تردد الإدخال 60Hz فهذا يعني أن تردد الإخراج 120Hz و T له يساوي 8.33 msec
أي أن ***10T*** يساوي ***83.33ms*** .

$$R_L * C = 220 * 470 * 10^{-6} = 0.103 \text{ sec}$$

وعليه فإن الشرط $R_L C \geq 10T$ قد تحقق لأن **103.4 msec > 83.33 msec**

$$V_r = \frac{0.0024 * 30}{0.103} = 0.699 volt$$

$$V_{D.C} = (1 - \frac{0.00417}{0.103}) * 30 = 28.8 volt$$

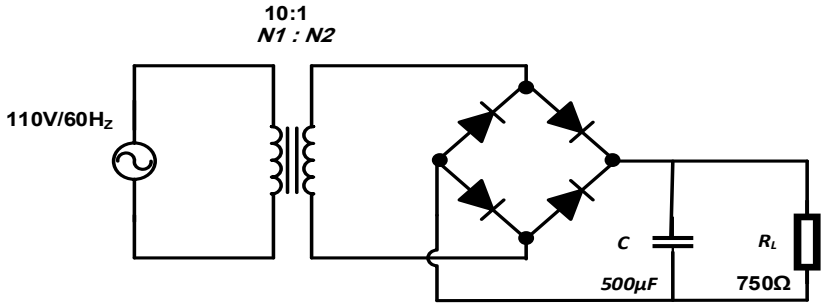
$$\%r = \frac{V_r}{V_{D.C}} * 100 = \frac{0.699}{28.8} * 100 = 2.43\%$$

ملاحظة : في المثال السابق إذا كانت R_L = 10KΩ , ما مقدار القيمة الصغرى لمتسعة الترشيح التي نحتاجها لكي نضمن عامل تموج قدره 2% ؟

$$C_{\min} = \frac{0.24}{rR_L} = \frac{0.24}{2 * 10 * 10^3} = 12 * 10^{-6} F = 12\mu F$$

مثال ١٠ :

في الدائرة الموضحة بالشكل أدناه اوجد عامل التموج ؟



$$R_L * C = 750 * 500 * 10^{-6} = 0.375 \text{ sec} = 375 \text{ msec}$$

$375 \text{ ms} > 83.3 \text{ ms}$ اذن تحقق الشرط

$$V_P = \sqrt{2} * 110 \approx 155 \text{ V}$$

$$\frac{V_P}{V_m} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow V_m = \frac{N_2}{N_1} * V_P$$

$$V_m = \frac{1}{10} * 155 = 15.5 \text{ V}$$

$$V_{DC} = \left(1 - \frac{0.00417}{R_L * C}\right) * V_m = \left(1 - \frac{0.00417}{0.375}\right) * 15.5 = 15.327 \text{ V}$$

$$V_r = \frac{0.0024}{R_L * C} * V_m = \frac{0.0024}{0.375} * 15.5 \approx 0.1 \text{ V}$$

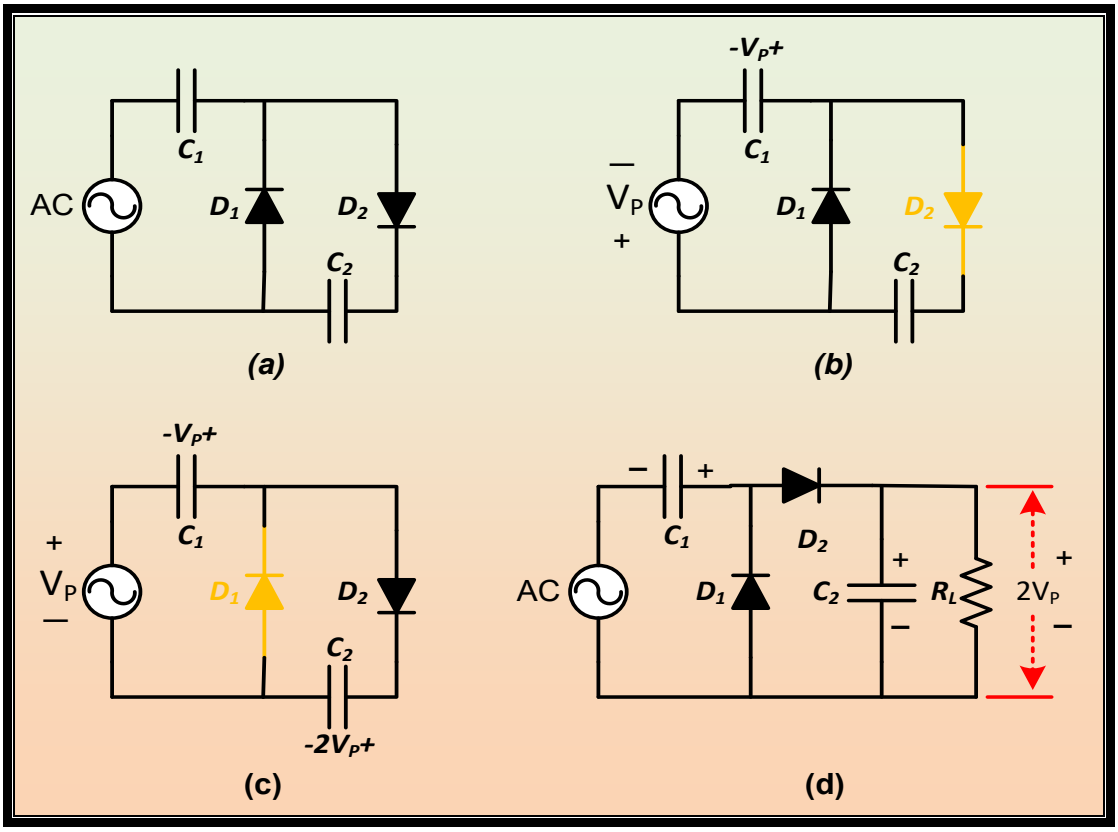
$$r\% = \frac{Vr}{V_{DC}} * 100\% = \frac{0.1}{15.327} * 100\% = \mathbf{0.647\%}$$

مضاعفات الفولتية المستمرة (D.C Voltage Multipliers)

إن مضاعفات الفولتية تجمع في تركيبها وفي مبدأ عملها كل من الموحدات والمرشحات حيث تتألف دوائرها من ثنائيات القدرة ومتسعات الترشيح, وتكون مناسبة للاستخدامات التي تحتاج إلى فولتيات مستمرة عالية الجهد قليلة التيار مثل تجهيز أنبوب الأشعة المهبطية . ومنها مضاعف الفولتية إلى الضعف والى الثلاثة أضعاف والى الأربعة أضعاف , وفي حال زيادة المقاطع لأكثر من أربعة يصبح تنظيم الفولتية ردئ .

مضاعف الفولتية إلى الضعف Voltage doubler

تتألف هذه الدائرة من متسعتين وثنائيي قدرة كما في الشكل (a) ، عند الذروة السالبة يكون (D_1) منحاز أمامياً أما **(D_2)** فيكون منحاز عكسياً ، وهذا يؤدي إلى شحن المتسعة **C_1** إلى فولتية الذروة ***V_p*** وبالقطبية المبينة بالشكل (b) ، عند الذرو الموجبة يكون **(D_1)** منحاز عكسيا ويكون الثنائي **(D_2)** منحاز أماميا كما في الشكل (c) وبما أن المصدر والمتسعة **C_1)** مربوطان على التوالي ، ستنشحن المتسعة **(C_2)** إلى ***(2Vp)*** وبعد عدة ذبذبات تبلغ الفولتية على **(C_2)** المقدار ***(2Vp)*** ويمكن إعادة رسم دائرة مضاعف الفولتية إلى الضعف مع ربط مقاومة الحمل ، لاحظ الشكل (d) مع مراعاة قيمة مقاوم الحمل كلما كانت كبيرة بقيت فولتية الإخراج تساوي تقريباً ***(2Vp)*** ، وهكذا تكون فولتية الإخراج ضعف ذروة فولتي الإدخال مع بقاء تيار الحمل خفيفاً وثابت الزمن طويل .

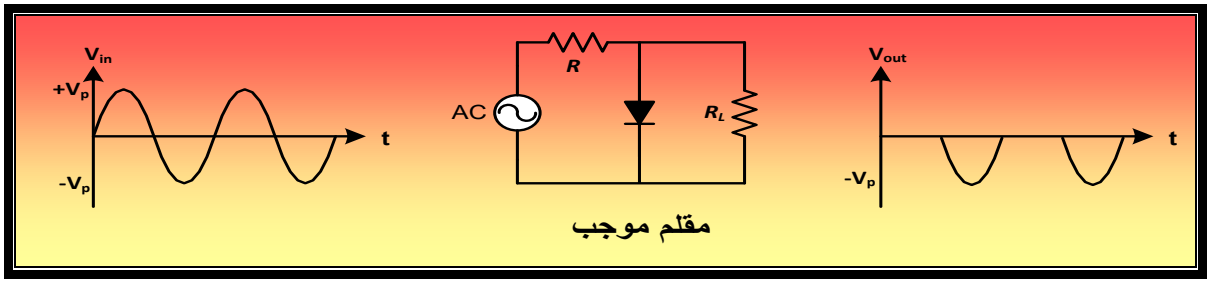


المقلم Clippers

في بعض المنظومات الالكترونية نرغب أحيانا بإزالة فولتيات الإشارة فوق أو تحت مستوى فولتية معين ،وباستخدامنا الثنائيات المقلمة يمكننا الحصول على الإزالة .

المقلم الموجب Positive Clipper

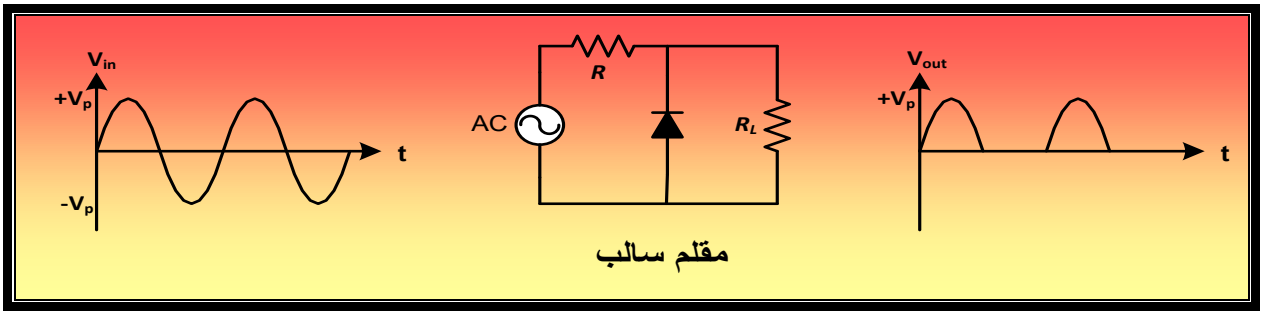
هي تلك الدائرة التي تزيل الأجزاء الموجبة من الموجة والمبينة بالشكل والذي نلاحظ فيه إن جميع الأجزاء الموجبة لإشارة الإدخال قد أزيلت في إشارة الإخراج . خلال نصف الذبذبة الموجب لفولتية الإدخال يكون الثنائي منحاز أماميا ويعمل كمفتاح مغلق كتقريب أولي ، الفولتية على دائرة قصر تساوي صفر. لذلك تكون فولتية الإخراج تساوي صفر لكل نصف ذبذبة موجب لإشارة إدخال الدائرة . كل الفولتية قد هبطت على المقاومة R



خلال نصف الذبذبة السالب لإشارة الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسيا وكأنه مفتاح مفتوح وبالتالي تعمل الدائرة كمقسم فولتية $V_{out} = \frac{R_L}{R + R_L} V_P$ تكون RL اكبر بكثير من R عادة ولذلك $V_{out} \cong -V_P$

المقلم السالب Negative Clipper

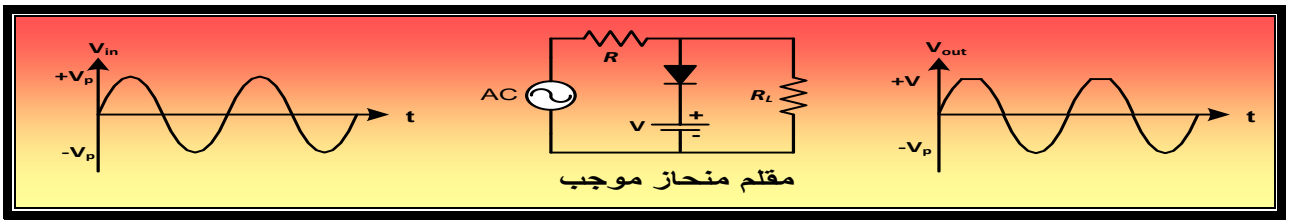
لو عكسنا أقطاب الثنائي الموضح في الشكل السابق ، سنلاحظ بأن الثنائي سيوصل في الأنصاف السالبة لموجة الإدخال حيث انه يقوم بإزالة جميع الإشارة تحت مستوى الصفر كما في الشكل



مقلم سالب

المقلم المنحاز Biased clipper

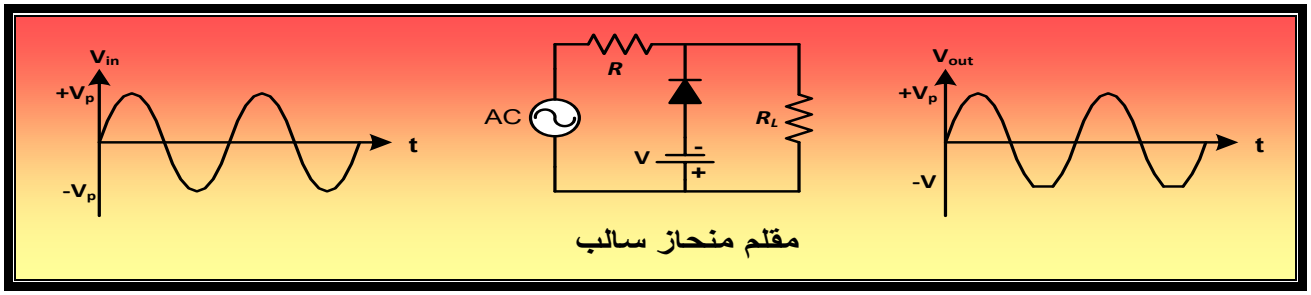
في بعض التطبيقات قد تحتاج مستوى تقليم مختلف عن الصفر . باستخدامنا المقلم المنحاز نستطيع تحريك مستوى التقليم إلى مستوى موجب أو سالب . يبين الشكل التالي مقلم منحاز موجب ولكي يكون الثنائي في حالة توصيل يجب على فولتية الإدخال أن تكون اكبر من **(+V)** . وعندما تكون فولتية الإدخال **(V_{in})** اكبر من **(+V)** يعمل الثنائي مثالياً عمل مفتاح مغلق وتساوي فولتية الإخراج **(+V)** ويبقى مستوى فولتية الإخراج **(+V)** طالما زادت فولتية الإدخال عن مستوى **(+V)**



مقلم منحاز موجب

عندما تقل فولتية الإدخال عن **(+V)** يصبح الثنائي مفتاح مفتوح وبذلك تصبح الدائرة مقسم فولتية . وبما أن قيمة مقاومة الحمل **R_L** اكبر بكثير من **R** لذلك فان معظم فولتية الإدخال تظهر في الإخراج .

الان .. لو عكسنا الثنائي وكذلك عكسنا البطارية كما في الشكل التالي:

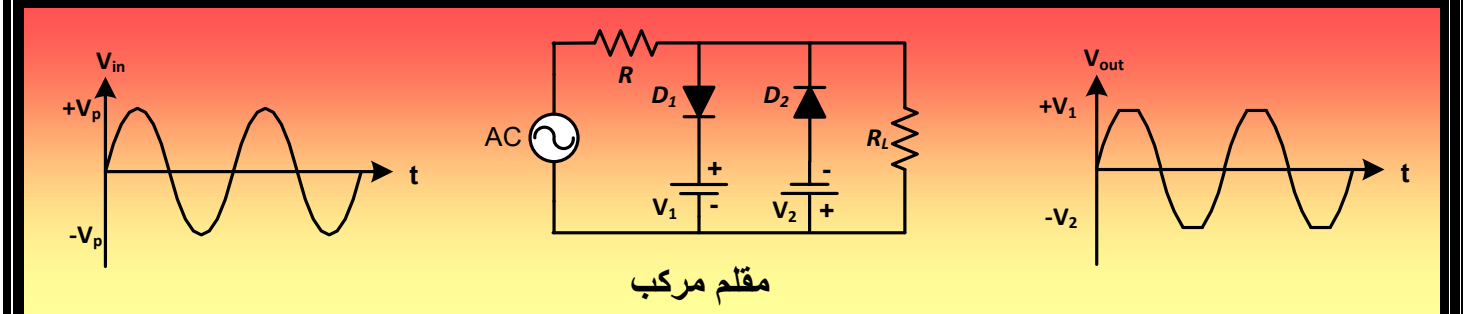


مقلم منحاز سالب

في هذه الحالة نحصل على مقلم منحاز سالب والذي تعمل دائرته عكس عمل دائرة المقلم المنحاز الموجب حيث يكون تحديد فولتية القطع في الجزء السالب **(-V)**

المقلم المركب Compound Clipper

وهو عملية جمع مقلم منحاز موجب و مقلم منحاز سالب ، كما في الشكل



مقلم مركب

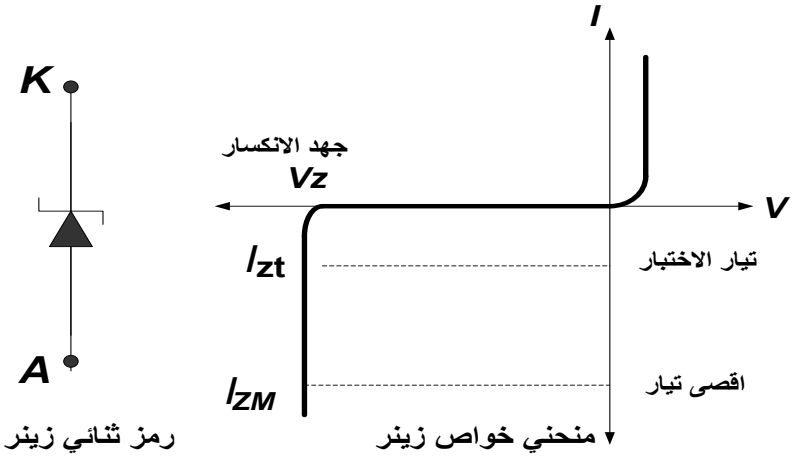
يتحول الثنائي D_1 إلى حالة التوصيل عندما تكون فولتية الإدخال اكبر من $(+V_1)$ ولهذا فان فولتية الإخراج تساوي $(+V_1)$ عندما تكون (V_{in}) اكبر من $(+V_1)$ ، ومن جهة أخرى وعندما تكون فولتية الإدخال V_{in} أكثر سالبيه من $(-V_2)$ يتحول الثنائي (D_2) إلى حالة التوصيل ولذلك فان فولتية الإخراج تساوي $(-V_2)$ طالما كانت فولتية الإخراج أكثر سالبيه من V_2 ، وعندما تقع V_{in} بين $(-V_2)$ و $(+V_1)$ لا يوصل أي من الثنائيين وبما أن R_L اكبر بكثير من R ولذلك فان معظم فولتية الإدخال تظهر عبر الإخراج . في حالة أن أشارة الإدخال كانت كبيرة أي أن V_p أكبر بكثير من مستويي القطع (الموجب و السالب) ستظهر موجة الإخراج تشابه الموجة المربعة .

ثنائي زينر Zener diode

هو عبارة عن ثنائي (وصلة p-n)مصنعة من مادة السليكون ويختلف عن الثنائي الاعتيادي كونه مصمم للعمل في منطقة الانكسار ، ولذلك يسمى أحيانا بثنائي الانكسار **breakdown diode** ويعتبر ثنائي زينر العمود الفقري لمنظمات الفولتية voltage regulators . ويمكن التحكم في قيمة جهد الانكسار وذلك بتغيير مستوى التطعيم حيث تتراوح فولتيات الانكسار من(**2v**) إلى (**200v**)

منحنى الخواص لثنائي زينر

نلاحظ من الشكل أن ثنائي زينر له نفس خواص ثنائي القدرة في حالة الانحياز الأمامي أما في حالة الانحياز العكسي فان تيار الثنائي يكون ضعيف جدا لحد الإهمال حتى نصل فولتية الانكسار **Vz** . وعند الوصول إلى جهد الانكسار يزداد التيار بسرعة دون زيادة ملحوظة في الفولتية وتبقى ثابتة تقريبا وتساوي **Vz** في معظم منطقة الانكسار . استمارة المصنع تبين عادةً قيمة ***Vz*** عند تيار معين هو تيار الاختبار ***(I_{ZT})***



ممانعة زينر Zz

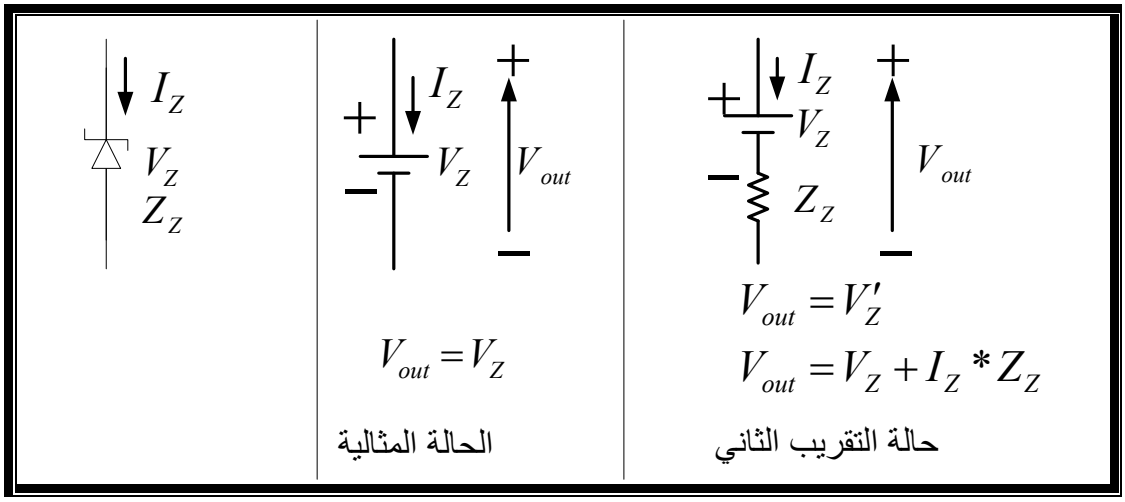
عندما يعمل زينر في منطقة الانكسار فان زيادة صغيرة في الفولتية تنتج زيادة كبيرة في التيار .وهذا يعني أن ممانعة زينر صغيرة (بالأوم)، ويمكن حساب هذه الممانعة بالمعادلة التالية :

$$Zz \approx \frac{\Delta v}{\Delta i}$$

تقاريب زينر (الدائرة المكافئة لثنائي زينر)

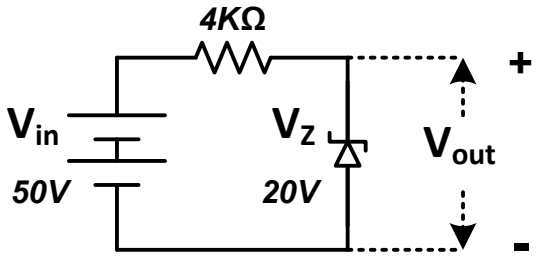
هناك تقريبان لثنائي زينر عندما يعمل في منطقة الانكسار هما:

1- التقريب الأول (الحالة المثالية) , 2- التقريب الثاني . وكما مبين في الرسم أدناه :



مثال ١١: في الدائرة أدناه احسب فولتية الخرج إذا كانت (**Vz =20 V**) و(**Zz = 10 Ω**)

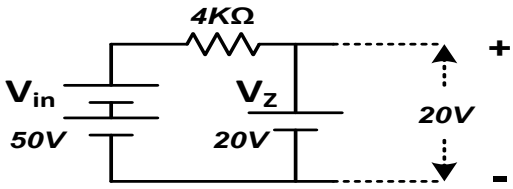
a- باستخدام التقريب المثالي للزينر ، b- باستخدام التقريب الثاني للزينر



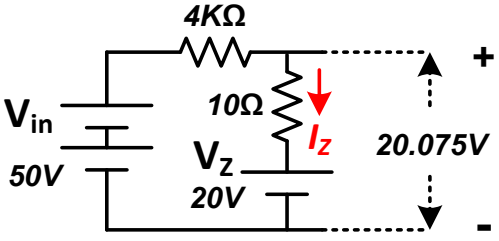
a - مثاليا

في التقريب المثالي يعمل ثنائي زينر كبطارية ذات فولتية مقدارها Vz

$$Vout = Vz = 20v$$



b - في حالة التقريب الثاني



$$Iz = \frac{Vin - Vz}{Rs} = \frac{50-20}{4*10^3} = 0.0075A = 7.5mA$$

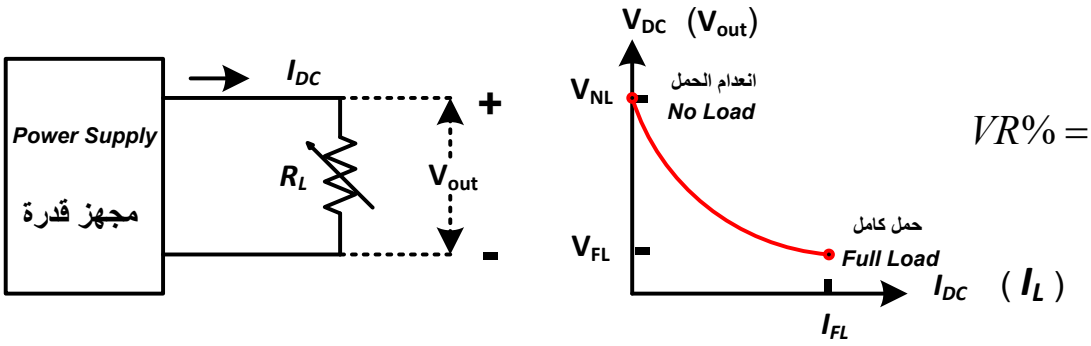
$$Vout = Vz + Iz * Zz$$

$$Vout = 20 + 0.0075 * 10 = 20.075v$$

تنظيم الفولتية Voltage Regulation

المقصود بتنظيم الفولتية هي المحافظة على قيمة ثابتة تقريبا لفولتية الإخراج عند تغير تيار الحمل (تغير مقاومة الحمل) أو فولتية المصدر أو كليهما .

إن مقاومة الحمل R_L المربوطة على مجهز قدرة عادةً تكون متغيره ويمكن أن تتغير من قيمة صغيرة $R_{L(min)}$ إلى قيمة عالية $R_{L(max)}$ لاحظ الشكل ، تيار الحمل (I_{DC}) يمر خلال مقاومة الحمل R_L المتغيرة . ، ولغرض إجراء مقارنة بين مجهزات القدرة نستخدم رقم الاستحقاق المسمى تنظيم الفولتية **VR**.



$$VR\% = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} * 100\%$$

حيث أن **VR%** - تنظيم الفولتية بالمائة

V_{NL} - فولتية الإخراج المستمرة عند عدم وجود حمل

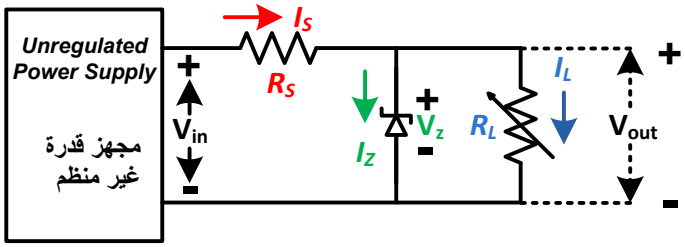
V_{FL} - فولتية الإخراج المستمرة عند حمل كامل

❖ **عدم وجود حمل يعني تيار حمل يساوي صفر يعني (R_L=∞) ، أما الحمل الكامل يعني أعظم تيار حمل يعني R_L قيمتها صغيرة .**

ملاحظة : إن قيمة **(VR)** تقترب من الصفر لمجهزات القدرة المصممة بصورة جيدة وذلك لان فولتية الحمل الكامل تقل قليلاً عن فولتية عدم وجود حمل .

منظم زينر Zener regulator

يستخدم ثنائي زينر كإحدى الطرق لغرض تنظيم الفولتية ،لاحظ الشكل ، حيث أن الفولتية الخارجة من مجهز قدرة غير منظم تستخدم كفولتية إدخال ***(V_{in})*** لمنظم زينر و طالما ***V_{in}*** اكبر من ***Vz*** فان ثنائي زينر يعمل في منطقة الانكسار ، المقاومة ***Rs*** تمنع تيار زينر من تجاوز قيمة التحمل العظمى ***I_{ZM}*** .



قيمة التيار المار خلال المقاومة ألمحدده يمكن حسابه بالقانون

$$Is = \frac{Vin - Vout}{Rs}$$

إن التيار Is يتجزأ عند نقطة ارتباط مقاومة الحمل **(R_L)** مع ثنائي زينر، وحسب قانون كيرشوف ***$I_S = I_Z + I_L$***

وعند إهمال ممانعة زينر الصغيرة ***$V_{out} \approx Vz$***

$$I_L = \frac{V_{out}}{R_L}$$

وعند حسابات أدق يجب الأخذ بنظر الاعتبار ممانعة زينر ***$V_{out} = Vz + Iz\ Zz$***

المقاومة ألمحدده القصوى

لأجل أن يحافظ منظم زينر على فولتية الاخراج ثابتة يجب أن يكون هناك تيار زينر لجميع فولتيات المصدر وتيارات الحمل . **إن أسوء حالة تحدث عندما تكون فولتية المصدر عند اقل قيمه وتيار الحمل عند أعظم قيمه** لان تيار زينر يهبط إلى اقل قيمة . ولغرض الحصول على قيمة المقاومة المحددة القصوى المتوالية المسموح بها :

$$R_{S(\max)} = \frac{V_{in(\min)} - V_{out}}{I_{L(\max)}}$$

حيث أن : $R_{s(max)}$ - اكبر مقاومة محددة مسموح بها

$V_{in(min)}$ - اصغر فولتية مصدر ممكنة

V_{out} - تساوي تقريبا فولتية زينر Vz

$I_{L(max)}$ - اكبر تيار حمل ممكن

❖ وفي حالة استخدام مقاومة اكبر من $R_{s(max)}$ فان منظم زينر سيتوقف عن التنظيم لفولتيات المصدر المنخفضة ولتيارات الحمل العالية .

مثال ١٢: في دائرة منظم زينر , احسب قيمة المقاومة R_S مع رسم الدائرة إذا كانت :

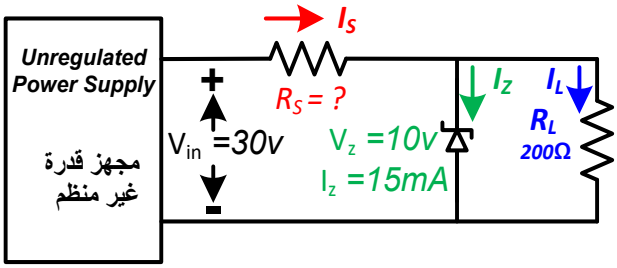
$V_{in} = 30\ V$, $V_Z = 10\ V$, $I_Z = 15mA$, $R_L = 200\Omega$

الحل:

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{10}{200} = 0.05A = 50mA$$

$$I_S = I_Z + I_L = 15 + 50 = 65mA$$

$$R_S = \frac{V_{in} - V_Z}{I_S} = \frac{30-10}{65*10^{-3}} = 307.6\Omega \approx 300\Omega$$



مثال ١٣:

منظم زينر له فولتية إدخال تتغير من V (20 →15) وتيار حمل يتغير من (20mA → 100mA) ، احسب قيمة مقاومة التوالي المحددة إذا كانت (Vz =10 V) من اجل إبقاء فولتية الحمل ثابتة تحت جميع الظروف ؟

الحل:

إن أسوأ حالة يمر فيها المنظم عند أصغر فولتية مصدر و أعظم تيار حمل

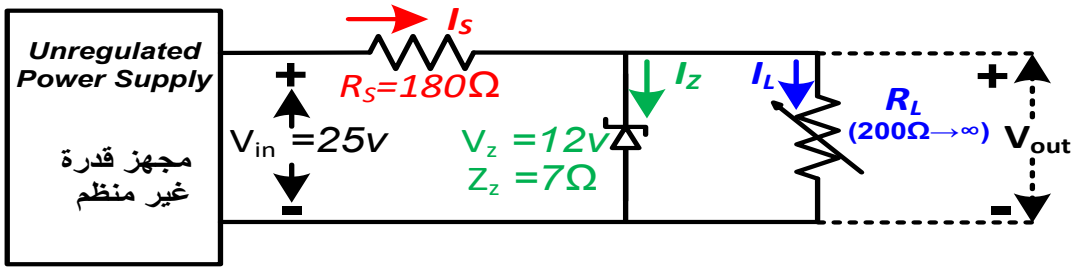
$$R_{S(max)} = \frac{V_{in(min)} - V_{out}}{I_{L(max)}}$$

$$Vout \cong Vz = 10v$$

$$R_{S(max)} = \frac{15 - 10}{100 * 10^{-3}} = 50\Omega$$

ولذلك يجب اختيار (Rs<50Ω) لكي يعمل المنظم

مثال ١٤ : احسب عامل تنظيم الفولتية VR % للدائرة المرسومة أدناه : وهل قيمة R_S مناسبة ؟



الحل: بما أن المصدر ذو فولتية ثابتة فهذا يعني أن :

$$I_S(\min) = I_S(\max) = I_S = \frac{V_{in} - V_Z}{R_S} = \frac{25-12}{180} = 72mA$$

$$I_L(\min) = \frac{V_Z}{R_L(\max)} = \frac{12}{\infty} = 0mA$$

$$I_L(\max) = \frac{V_Z}{R_L(\min)} = \frac{12}{200} = 60mA$$

$$I_Z(\min) = I_S - I_L(\max) = 72 - 60 = 12mA$$

$$I_Z(\max) = I_S - I_L(\min) = 72 - 0 = 72mA$$

$$V_{out}(\min) = V_Z + I_Z(\min) * Z_Z = 12 + 12*10^{-3} * 7 = 12.1volt$$

$$V_{out}(\max) = V_Z + I_Z(\max) * Z_Z = 12 + 72*10^{-3} * 7 = 12.5volt$$

$$\%V_R = \frac{V_{out}(\max) - V_{out}(\min)}{V_{out}(\min)} * 100 = \frac{12.5 - 12.1}{12.1} * 100 = 3.3\%$$

وهو عامل تنظيم الفولتية , وهو المطلوب أولا .

وأما المطلوب الأخر : نعم قيمة R_S مناسبة لأنها أقل من قيمة $R_S(\max)$ التي سوف نجدها من العلاقة التالية :

$$R_S(\max) = \frac{V_{in}(\min) - V_Z}{I_L(\max)} = \frac{25-12}{60*10^{-3}} = 216\Omega$$

$$R_S < R_S(\max)$$ أي أن

HW: في دائرة منظم زينر, أوجد العامل المئوي لتنظيم الفولتية مع رسم الدائرة إذا كانت :

V_{in} = 30 V , R_S = 500 Ω , V_Z = 10 V , Z_Z = 10 Ω , R_L = (1KΩ → ∞)

الترانزستورات ثنائية القطبية

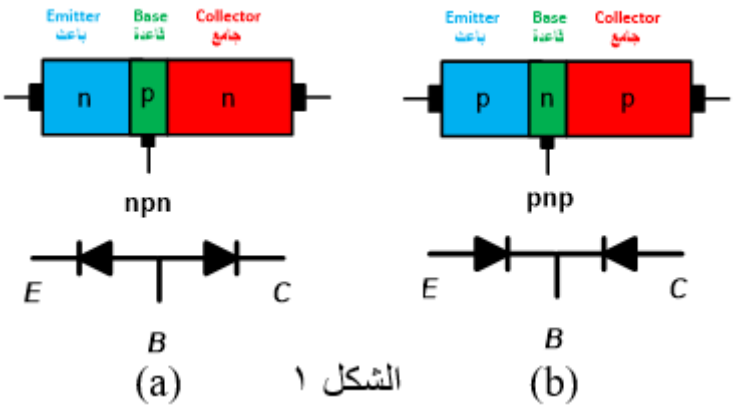
Bipolar Transistors

أصل كلمة ترانزستور مشتقة من الكلمتين (TRANSFER – RESISTOR) بمعنى مقاوم التحويل وهو من أهم العناصر الالكترونية الأساسية . حيث تم إنتاج أول ترانزستور عام ١٩٥١ حيث فتح المجال أمام تصنيع الدوائر المتكاملة وبتطور الأخير أنتج المعالج الدقيق في عام ١٩٧١ . حيث أصبحت الأخيرة أساسا لبناء الحاسبات الالكترونية وانتشارها الواسع كما تراه في الوقت الحاضر .

يعرف **الترانزستور** على انه **عنصر الكتروني ثلاثي الطبقة ثنائي القطبية أي تشترك الالكترونات والفجوات في عمله لإنتاج التيارات المختلفة فيه وله ثلاث اطراف خارجية هي (الباعث والقاعدة والجامع).**

مناطق الترانزستور :

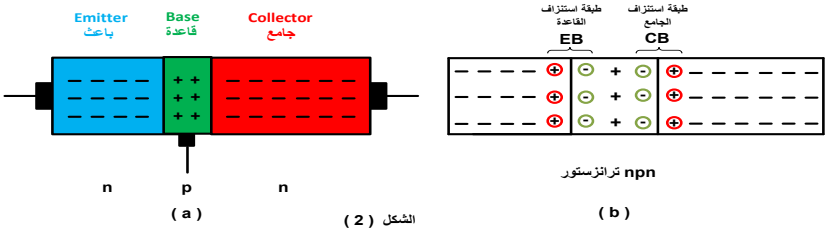
يبين الشكل (1a) بلورة نوع npn وقد **طعم الباعث Emitter بغزارة ، وان عمله هو حقن أو بعث الالكترونات إلى القاعدة Base وتكون رقيقه وخفيفة التطعيم وتقوم بتمرير معظم الالكترونات المحقونة إلى الجامع Collector والذي يكون تطعيمه بين تطعيم الباعث الغزير و تطعيم القاعدة الخفيف ويكون هو الأكبر بين المناطق الثلاث وعليه أن يبدد حرارة أكثر مما يبدده الباعث و القاعدة**



الترانزستور **عبارة عن ثنائيين متعاكسين** ، ندعو الثنائي الواقع إلى اليسار بثنائي الباعث-القاعدة وندعوه للبساطة **ثنائي الباعث** emitter diode ، أما الثنائي الواقع على اليمين فيسمى ثنائي الجامع-القاعدة وللسهولة **ثنائي الجامع** collector diode . أما الاحتمال الأخر للترانزستور فهو الترانزستورpnp المتمم للترانزستور npn وهذا يعني اتجاه التيارات والفولتيات في الترانزستور pnp عكس اتجاه التيارات والفولتيات في الترانزستور npn .

الترانزستور الغير المنحاز :

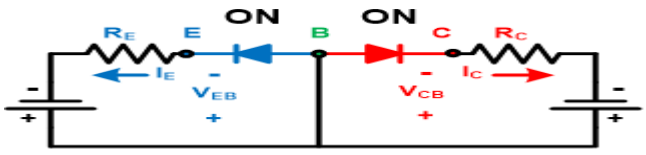
يبين الشكل (2a) الحاملات الغالبية قبل تحرك أي منها عبر الوصلتين . إن الالكترونات الحرة تنتشر عبر الوصلتين مما تؤدي إلى تكوين طبقتي استنزاف كما في الشكل (2b) لكل طبقة استنزاف يكون الجهد الحاجز (0.7v) للترانزستورات السليكونية ويساوي (0.3v) في ترانزستورات الجرمانيوم .



طرق انحياز الترانزستور :

١. انحياز أمامي - أمامي (FF) :(Forward-Forward)

إن هذا الانحياز والموضح في الشكل (3a) سمي أمامي - أمامي لأن ثنائي الباعث و ثنائي الجامع منحازان أماميا ، إن الحاملات تعبر الوصلتين وتجري نازلة خلال القاعدة إلى سلك التوصيل الخارجي .



الدائرة المكافئة لانحياز امامي – امامي (FF)

٢. انحياز عكسي - عكسي (RR) :Reverse -Reverse

نلاحظ في هذا الانحياز إن الثنائيان منحازان عكسيا وبذلك تسري تيارات ضعيفة جدا والمتكونة من تيار التشبع المنتج حراريا وتيار التسرب السطحي ويمكن إهمال هذه التيارات العكسية لصغرها

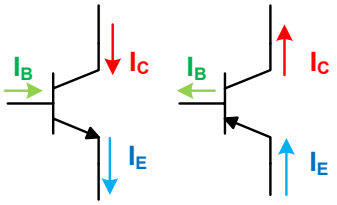
٣. انحياز أمامي - عكسي (Forward-Reverse (FR) :

أي **نحيز ثنائي الباعث أماميا ونحيز ثنائي الجامع عكسيا.** إن أكثر من (95%) من الكترونات الباعث المحقونة إلى القاعدة تعبر إلى الجامع واقل من (5%) تسقط في فجوات القاعدة وتسير خارجة من سلك توصيل القاعدة .

تيارات الترانزستور :

الشكل (6) يبين رموز واتجاهات تيارات الترانزستورات نوع npn وpnp ، حيث أن اتجاه تيار الباعث يتبع نفس اتجاه السهم الموجود على الرمز الخاص بالترانزستور وتياري القاعدة والجامع الاتجاه العكسي .

$$I_E = I_C + I_B$$



الشكل (6)

ألفا dc : (α_{dc})

هو النسبة بين تيار الجامع إلى تيار الباعث . وكما ذكرنا سابقا بان (95%) من الكترونات الباعث تصل إلى الجامع وهذا يعني أن تيار الجامع يساوي تقريبا تيار الباعث وكلما كانت القاعدة ارق واخف تطعيم كان تيار الجامع اقرب أكثر إلى تيار الباعث .

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$ فمثلا لو قسنا ($I_C = 4.9mA$) و($I_E = 5mA$) $\longrightarrow \alpha_{dc} = \frac{4.9}{5} = 0.98$

بيتا dc : (β_{dc})

هو النسبة بين تيار الجامع إلى تيار القاعدة

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

في معظم الترانزستورات اقل من (5%) من الكترونات الباعث المنبعثة تلتحم مع فجوات القاعدة منتجة تيار القاعدة I_B ولذلك يكون β_{dc} اكبر من (20) ، وهو يتراوح (50-200) وقد تصل إلى (1000) .
يطلق على β_{dc} اسم كسب التيار المستمر ويرمز له في نظام الثوابت الهجينة h_{FE}

العلاقات بين α_{dc} و β_{dc} :

اثبت العلاقة

$$\alpha_{dc} = \frac{\beta_{dc}}{1+\beta_{dc}}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\frac{I_E}{I_C} = \frac{I_C}{I_C} + \frac{I_B}{I_C}$$

$$\frac{1}{\alpha_{dc}} = 1 + \frac{1}{\beta_{dc}}$$

$$\frac{1}{\alpha_{dc}} = \frac{\beta_{dc}+1}{\beta_{dc}}$$

$$\alpha_{dc} = \frac{\beta_{dc}}{1+\beta_{dc}}$$

$$\beta_{dc} = \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}}$$

$$I_B = I_E - I_C$$

$$\frac{I_B}{I_C} = \frac{I_E}{I_C} - \frac{I_C}{I_C}$$

$$\frac{1}{\beta_{dc}} = \frac{1}{\alpha_{dc}} - 1$$

$$\frac{1}{\beta_{dc}} = \frac{1-\alpha_{dc}}{\alpha_{dc}}$$

$$\beta_{dc} = \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}}$$

مقاومة امتداد القاعدة :

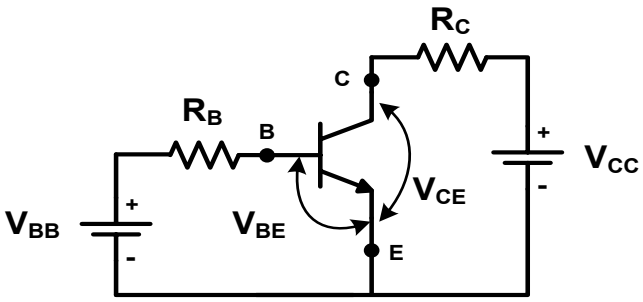
إن مقاومة القناة p تسمى مقاومة امتداد القاعدة ويرمز لها r'_b وتعتمد قيمة هذه المقاومة على عرض القناة p وعلى تطعيم القاعدة ونموذجيا تتراوح قيمتها بين Ω (50-150) وفي حالات نادرة تصل إلى (1000Ω) .

فولتيات الانكسار :

لقد علمنا من المواضيع السابقة بان الترانزستور عبارة عن ثنائيان . ولذلك بإمكان فولتية عكسية كبيرة على ثنائي الجامع أن تسبب انكسار . فعندما تكون V_{CB} كبيرة يحصل انكسار في ثنائي الجامع بسبب الانهيار أو ظاهرة التواصل . **ظاهرة التواصل** يعني أن طبقة استنزاف الجامع تزداد توسعا بحيث تصل إلى طبقة استنزاف الباعث وفي هذه الحالة تنبعث الكترونات الباعث مباشرة إلى طبقة استنزاف الجامع وهذا يؤدي إلى تيار جامع كبير وبالتالي تلف الترانزستور . ولذلك **يجب أن تبقى فولتية الجامع اقل من فولتية الانكسار** المبينة في استمارة المعلومات للمصنع .

الربط بطريقة الباعث المشترك (CE) Common Emitter :

إن الربط بطريقة الباعث المشترك يعني أن الباعث ومصدرا الفولتية يتصلان بنقطة مشتركة ، الشكل (8) . إن هذه الدائرة تسمى بربط الباعث المشترك (*CE*)



الشكل (8)

هناك ربط يسمى: ربط القاعدة المشتركة (**CB**) لان القاعدة ومصدري الفولتية مربوطة إلى نقطة مشتركة .

كذلك ربط يسمى: ربط الجامع المشترك (**CC**) لان الجامع ومصدري الفولتية مربوطة إلى نقطة مشتركة

مثال ١ :

إذا علمت أن لترانزستور ما تيار باعث ($I_E = 20mA$) ، ($\beta_{dc} = 100$) اوجد ؟

تيار الجامع **(I_C)** ، تيار القاعدة **(I_B)** ، **(α_{dc})**

$$\alpha_{dc} = \frac{\beta_{dc}}{1+\beta_{dc}} = \frac{100}{1+100} = \frac{100}{101} = 0.99$$

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

$$I_C = \alpha_{dc} * I_E = 0.99 * 20 = 19.8mA$$

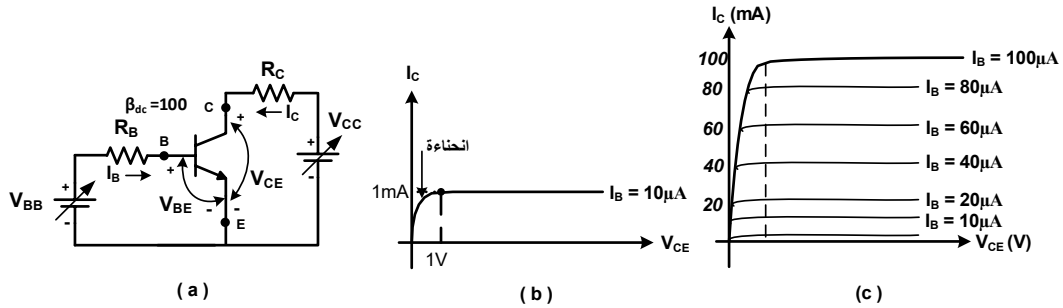
$$I_B = I_E - I_C = 20 - 19.8 = 0.2mA$$

منحنيات الترانزستور :

من الطرق التي تشرح تفاصيل عمل الترانزستور هي المنحنيات البيانية التي تربط بين تيارات الترانزستور و فولتياته .

منحنيات الجامع (منحنيات خواص الإخراج)

يمكننا الحصول على معلومات لمنحنيات الجامع بربط (CE) وذلك ببناء دائرة كما في الشكل (10a) .
إن الفكرة هي تغيير قيم المجهزين V_{BB} و V_{CC} بأسلوب معين للحصول على فولتيات وتيارات مختلفة للترانزستور .
إن طريقة العمل الاعتيادية هي إعطاء I_B قيمة معينة وإبقائها ثابتة في أثناء تغيير قيمة Vcc وبقياس قيم Ic وV_{CE} يمكننا الحصول على معلومات لرسم Ic مع V_{CE} ولغرض التوضيح نفرض أن (I_B =10μA) في الشكل (10a) ألخطوة التي تليها نغير V_{CC} ونقيس Ic و V_{CE} الناتجين ولو رسمنا المعلومات لحصلنا الشكل (10b) لاحظ بأننا اشرنا على المنحني بالكتابة(I_B=10μA) لأننا حصلنا على هذا المنحني بإبقاء I_B ثابتا على (10μA) خلال القياسات .

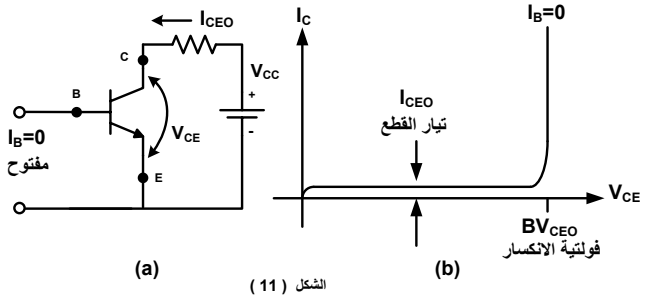


الشكل (10)

ولو بينا عدة منحنيات لقيم مختلفة من (I_B) على نفس المخطط البياني نحصل على منحنيات الجامع البيانية الموضحة بالشكل (10c) وبما أننا استخدمنا ترانزستور له (β_{dc} = 100) يكون تيار الجامع مائة مرة اكبر من تيار القاعدة لأية نقطة فوق المفصل لأي منحني .

تيار القطع وفولتية الانكسار :

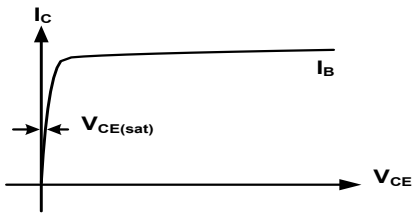
إن اخفض منحني من منحنيات الجامع بالشكل (10c) يقابل تيار قاعدة مقداره صفر أي وكأنه فتح سلك القاعدة الموصل لاحظ الشكل (11a) . ويسمى تيار الجامع عندما يكون طرف القاعدة مفتوحا **I_{CEO}** . وقد نتج قسم من I_{CEO} بسبب الحاملات المنتجة حراريا وكذلك بسبب تيار ألتسرب السطحي . لاحظ الشكل (11b)
وعند زيادة فولتية الجامع إلى قيم عالية سنصل إلى فولتية الانكسار **BV_{CEO}** .
ولأجل أن يعمل الترانزستور بصورة طبيعية **يجب أن تبقى V_{CE} اقل من BV_{CEO}**



الشكل (11)

فولتية تشبع الجامع :

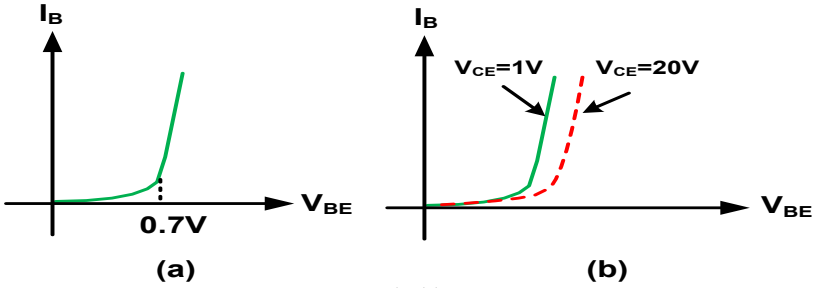
لأجل أن يعمل الترانزستور بصورة اعتيادية **يجب أن يكون ثنائي الجامع منحاز عكسيا** ويتطلب ذلك V_{CE} اكبر من أو في حدود الواحد فولت لاحظ الشكل (12) . ماذا تعني **$V_{CE(sat)}$** فهي قيمة الفولتية V_{CE} عند نقطة ما تحت الانحناءة وهي تساوي نموذجيا بضع أعشار من الفولت إن جزء المنحني الذي يقع تحت المفصل يسمى منطقة التشبع .



الشكل (12)

منحني القاعدة : (منحني خواص الإدخال)

من الشكل (10a) يمكننا الحصول على المعلومات I_B و V_{BE} لرسم منحني القاعدة (منحني خواص الإدخال) والمبين بالشكل (13a)



الشكل (13)

من المتوقع أن المنحني يشابه منحني ثنائي في الاتجاه الأمامي لان جزء القاعدة والباعث عبارة عن ثنائي . وعند رسم منحني قاعدة لفولتية جامع مختلفة يظهر لنا منحني جديد مختلف قليلا عن السابق لاحظ الشكل (13b).

دوائر انحياز الترانزستور :

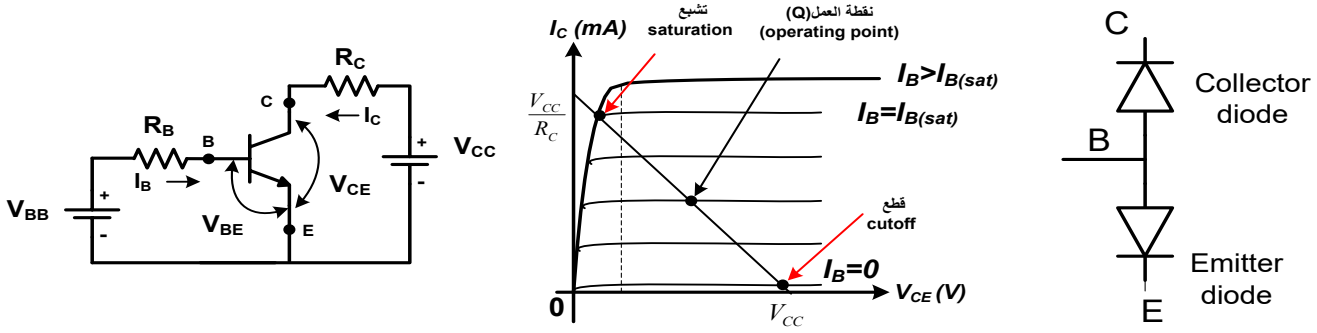
تعمل دوائر الترانزستور الخطية *linear* **بانحياز أمامي على ثنائي الباعث وانحياز عكسي على ثنائي الجامع** .

ومن الطرق الشائعة لتحييز الترانزستور للعمل الخطي :-

أ- **إنحياز القاعدة** . ب- **إنحياز مقسم الجهد** . ج- **إنحياز بالتغذية الخلفية للجامع** . د- **إنحياز الباعث** . . . .. وغيرها

انحياز القاعدة *Base-bias*

الشكل (1-a) عبارة عن مثال على إنحياز القاعدة



(a) Base bias إنحياز القاعدة

(b) Dc load line خط الحمل المستمر

الشكل (1)

حيث يحيز مصدر فولتية V_{BB} **ثنائي الباعث أماميا** خلال مقاوم محدد للتيار R_B .

الفولتية عبر R_B حسب قانون كيرشوف للفولتية هي: **$V_{BB} - V_{BE}$** ، وبذلك يكون تيار القاعدة حسب قانون اوم للتيار

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

حيث أن (**V_{BE} = 0. 7 V**) لترانزستورات السليكون و (**V_{BE} = 0.3 V**) لترانزستورات الجرمانيوم .

خط الحمل المستمر (dc load line)

في دائرة الجامع . يعمل مصدر الفولتية V_{CC} على تحييز ثنائي الجامع عكسيا خلال R_C .

بالاستعانة بقانون كيرشوف للفولتية $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$

في معظم الدوائر . تكون (V_{CC} , R_C) ثابتة و (V_{CE} , I_C) متغيرة

نستطيع إعادة ترتيب المعادلة السابقة للحصول على

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

هذه معادلة خطية تشبه $y = mx + b$

التي تمثل خطا مستقيم بانحدار مقداره m وتقاطع عمودي مقداره b على محور التيار والممثلة بالشكل (1b) حيث نرى أن التقاطع العمودي مقداره (Vcc/Rc)والتقاطع الأفقي مقداره (Vcc) وبانحدار يساوي (-1/Rc) . ويسمى هذا الخط بإسم خط الحمل المستمر (***dc load line***) لأنه يمثل جميع نقاط العمل الممكنة . إن **نقطة عمل الترانزستور** هي نقطة تقاطع خط الحمل المستمر مع تيار القاعدة ويرمز لها بنقطة (Q) .

القطع والتشبع cutoff and saturation

تعرف نقطة تقاطع خط الحمل المستمر بالمنحنى ($I_B = 0$) **بالقطع *cutoff*** .

في هذه النقطة , تيار القاعدة ($I_B = 0$) وتيار الجامع (I_C) صغير جدا (يوجد تيار التسرب I_{CEO} فقط) .

عند القطع , يخرج ثنائي الباعث من الانحياز الأمامي ويفقد الترانزستور عمله الطبيعي .

كتقريب دقيق , تكون فولتية الجامع إلى الباعث : $V_{CE(cutoff)} = V_{CC}$

إن تقاطع خط الحمل والمنحنى ($I_B = I_{B(sat)}$) يدعى بـ**التشبع *saturation***

في هذه النقطة , تيار القاعدة يساوي ($I_{B(sat)}$) وتيار الجامع (I_C) قيمة عظمى .

عند التشبع , يخرج ثنائي الجامع من الانحياز العكسي ويفقد الترانزستور عمله الطبيعي

كتقريب دقيق , يكون تيار الجامع عند التشبع :

$$I_{c(sat)} \approx \frac{V_{cc}}{R_c}$$

وأقل تيار قاعدة يحدث التشبع هو :

$$I_{B(sat)} = \frac{I_{c(sat)}}{\beta_{dc}}$$

الفولتية بين الجامع والباعث عند التشبع هي $V_{CE} = V_{CE(sat)}$ وقيمتها (نموذجيا) بضع أعشار من الفولت .

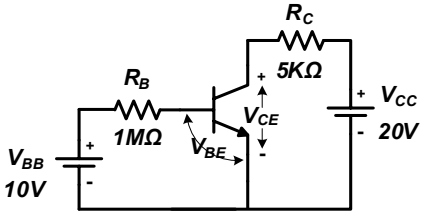
المنطقة الفعالة للترانزستور active region

وهي جميع نقاط العمل الواقعة بين القطع والتشبع حيث يكون ثنائي الباعث منحاز أمامي و ثنائي الجامع منحاز عكسي .

إن نقطة تقاطع تيار القاعدة مع خط الحمل المستمر هي **النقطة الهامدة (Q)** Q-point أو **نقطة العمل** في الشكل (1- b)

مثال ٢:

للترانزستور السليكوني في الدائرة أدناه ($\beta_{dc} = 100$)
احسب الفولتية بين الباعث والجامع V_{CE} ؟



الحل:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{10 - 0.7}{1*10^6} = 9.3\mu A$$

$$I_C = \beta_{dc} * I_B$$

$$I_C = 100 * 9.3\mu A = 0.93mA$$

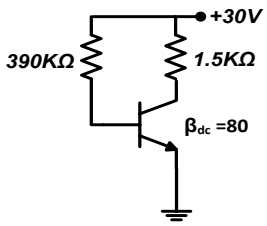
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C * R_C$$

$$V_{CE} = 20 - 0.93*10^{-3} * 5*10^3 = 15.4v$$

مثال ٣ :

مثال:

في الدائرة الموضحة أدناه ارسم خط الحمل المستمر وعين إحداثيات نقطة العمل(Q) ؟



الحل:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{30}{1.5*10^3} = 0.002\,A = 20mA$$

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC} = 30v$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{30 - 0.7}{390*10^3} = 0.0000715\,A$$

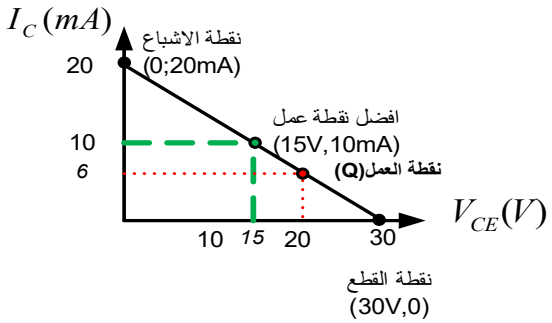
$$I_B = 71.5\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta_{dc} * I_B = 80 * 0.0000715 = 0.006008\,A$$

$$I_{CQ} \cong 6mA$$

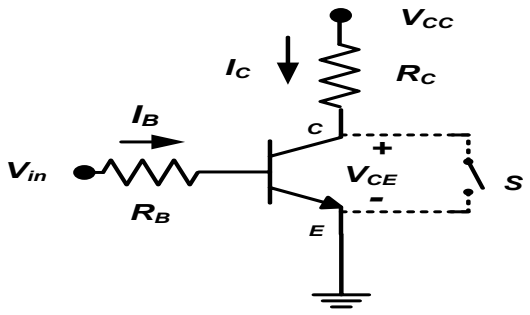
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} * R_C$$

$$V_{CEQ} = 30 - 0.006 * 1.5 * 10^3 = 30 - 9 = 21v$$



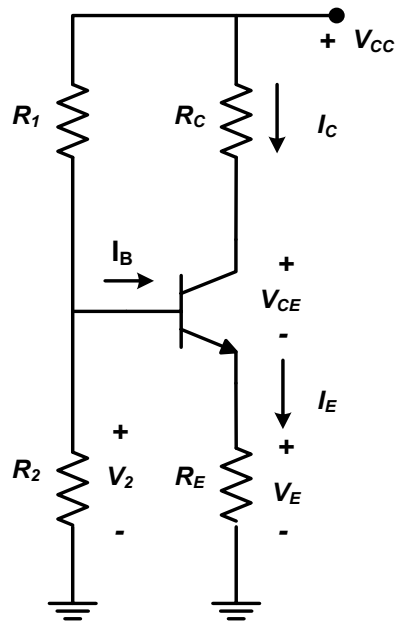
استخدام الترانزستور كمفتاح(Transistor as Switch)

عندما يعمل الترانزستور في منطقتي القطع والإشباع فانه يشابه عمل المفتاح وكما موضح في الشكل أدناه :



انحياز مقسم الفولتية Voltage-divider bias

يبين الشكل (2) انحياز مقسم الفولتية وهو الأوسع انتشارا. إن تسمية مقسم الفولتية جاءت من مقسم الفولتية المتكون من R_1 و R_2 إن **الفولتية على R_2 تعمل على جعل ثنائي الباعث منحاز أماميا** . **ويعمل المجهز Vcc على جعل ثنائي الجامع منحاز عكسيا**



الشكل (2)

إن عمل دائرة مقسم الفولتية يتلخص بما يلي

يكون تيار القاعدة صغيرا جداً مقارنة بالتيار في R_1 وبالتيار في R_2

وبذلك نستطيع تطبيق قانون مقسم الفولتية لإيجاد قيمة V_2 عبر المقاومة R_2 :

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

وحسب قانون كيرشوف للفولتية :

$$V_E = V_2 - V_{BE}$$

وبذلك يمكننا حساب قيمة تيار الباعث (I_E)

$$I_E = \frac{V_2 - V_{BE}}{R_E}$$

وان تيار الباعث يساوي تقريباً تيار الجامع

$$I_C \cong I_E$$ وهذا يمثل الاحداثي الصادي لنقطة العمل (Q)

أما الفولتية بين الجامع والأرض $V_C = V_{CC} - I_C R_C$

الفولتية بين الباعث والأرض $V_E = I_E R_E$

وبذلك تكون الفولتية بين الجامع والباعث

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

$$I_C \cong I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$ وهذا يمثل الاحداثي السيني لنقطة العمل (Q)

إن تيار تشبع الترانزستور في انحياز مقسم الفولتية يمكن حسابه كما يلي

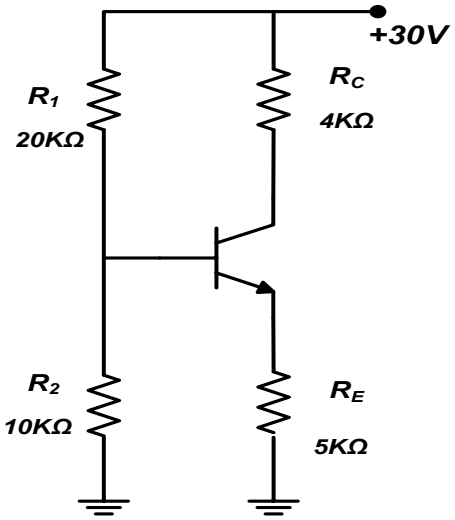
$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

أما فولتية القطع حيث لا يمر تيار في الجامع وبذلك تظهر فولتية المجهز على طرفي الجامع و الباعث

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC}$$

مثال ٤:

ارسم خط الحمل المستمر وعين نقطة العمل (Q) للدائرة المبينة أدناه ؟



لرسم خط الحمل المستمر نعين فولتية القطع و تيار التشبع

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC} = 30v$$

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$I_{C(sat)} = \frac{30}{(4+5)*10^3}$$

$$I_{C(sat)} = 0.00333A = 3.33mA$$

لتعيين نقطة العمل (Q)

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{CC} = \frac{10K}{20K + 10K} * 30v = 10v$$

$$I_E = \frac{V_2 - V_{BE}}{R_E} = \frac{10 - 0.7}{5*10^3} = 0.00186\,A = 1.86mA$$

$$I_{CQ} \cong I_E = 1.86mA$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 30 - 1.86*10^{-3} * (4+5)*10^3$$

$$V_{CEQ} = 13.3v$$