الفصل الرابع : ثنائي زنر

(4 . 1) تركيب ثنائي زنر ورمزه

(4 . 2) خصائص ثنائي زنر

(4 . 3) الدائرة المكافئة لثنائي زنر

(4 . 4) المعامل الحراري لثنائي زنر

(4 . 5) القدرة المبددة وهبوط القدرة لثنائي زنر بسبب ارتفاع درجة الحرارة

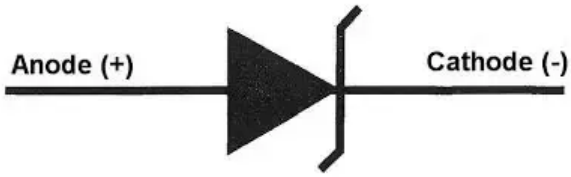
(4 . 6) تطبيقات ثنائي زنر

ذكرنا سابقاً انه يجب ان لا يعمل الثنائي الاعتيادي المنحاز عكسياً في منطقة الانهيار ، الا ان هناك نوع خاص من الثنائيات يتم تصميمه للعمل في منطقة الانهيار وهو ثنائي زنر (Zener Diode) ويستعمل ثنائي زنر بكثرة في الدوائر الالكترونية .

(4 . 1) تركيب ثنائي زنر ورمزه

في الاغلب يستخدم السليكون في صناعة ثنائي زنر الذي يرمز له كما في الشكل (1) ، ويشابه تركيب هذا الثنائي تركيب الثنائي الاعتيادي ، فهو عبارة عن وصلة شبه موصل موجب – سالب (pn junction) لكن الاختلاف يكون في نسبة التشويب حيث تكون هذه النسبة في ثنائي زنر اكبر مما هو في الثنائي الاعتيادي .

ان ثنائي زنر مصمم للعمل في منطقة الانهيار ، ويمكن التحكم في فولتية الانهيار من خلال التحكم في نسبة التشويب لحظة صناعة الثنائي ، حيث تقل فولتية الانهيار كلما زادت هذه النسبة فيمكن الحصول على فولتيات انهيار تتراوح بين (1.5 V) واكثر من (200V) .



شكل (1) رمز ثنائي زنر

في هذا الثنائي هنالك نوعان من الانهيار هما :

<u>اولاً : الانهيار التهدمي (Avalanche Breakdown)</u>

تناولنا في الفصل الثاني ظاهرة الانهيار التهدمي الذي يظهر في الثنائي الاعتيادي المنحاز عكسياً ، حيث تعمل فولتية التحييز العكسية على تعجيل حاملات الشحنة الاقلية في منطقة الاستنزاف ومتى ما كانت الفولتية العكسية المسلطة عالية بما يكفي فان حاملات الشحنة الاقلية المتحركة ستتمكن من تحرير الكترونات تكافؤية والالكترونات المتحررة تتعجل بدورها لتحرر المزيد من الالكترونات التكافؤية وبالنتيجة نحصل على عدد كبير من الالكترونات المتحركة وتسمى تلك الظاهرة بالانهيار التهدمي ، في حالة ثنائي زنر فان نفس هذه الظاهرة تحدث ولكن بفولتيات انهيار اقل نسبيا حيث تحدث هذه الظاهرة لفولتيات اكبر تقريباً من (6V) ، في حالة الثنائي الاعتيادي فان الانهيار يحدث عادة لفولتيات اعلى من (50V) وهذا عائد لاختلاف نسبة التشويب بين الثنائي الاعتيادي وثنائي زنر .

<u>ثانياً : انهيار زنر (Zener Breakdown)</u>

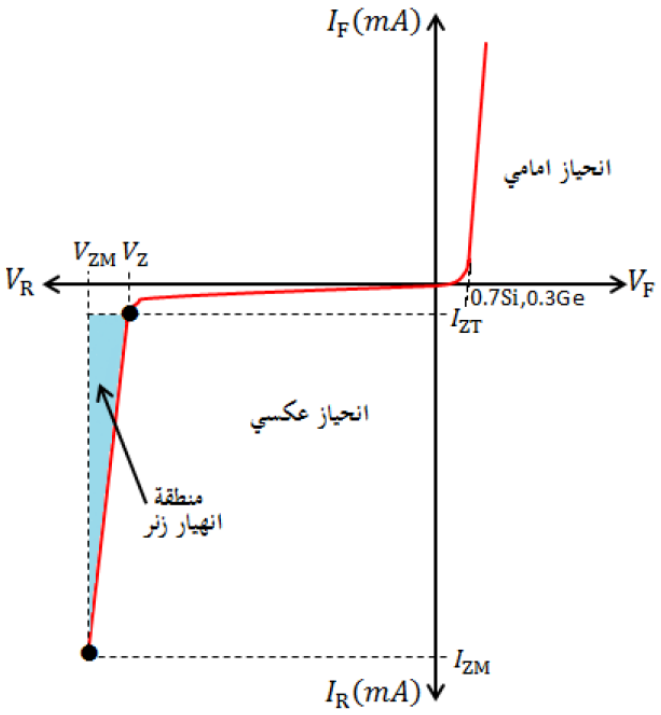
يحدث هذا النوع من الانهيار عندما يشوب ثنائي ما بغزارة (كما هو في ثنائي زنر) ، حيث تكون طبقة الاستنزاف ضيقة جداً وبالتالي يكون المجال الكهربائي بين طرفيها عالياً جدا ، وعندما تصل شدة المجال الى

حوالي (300000V / cm) فان تلك الشدة تكفي لسحب الكترونات من مدارات التكافؤ فتتكون الكترونات حرة في منطقة الاستنزاف ، ان توليد الالكترونات الحرة بهذه الطريقة تدعى انهيار زنر (كما تسمى ايضا بانبعاث المجال العالي High Field Emission) .

ان انهيار زنر هو الذي يسود في فولتيات انهيار اقل من (4V) بينما تسود ظاهرة الانهيار التهدمي في فولتيات انكسار تزيد عن (6V) . في البداية كان الاعتقاد بان ظاهرة انهيار زنر هي الوحيدة الموجودة في انهيار الثنائيات ، ولهذا شاع استعمال ثنائي زنر قبل اكتشاف ظاهرة الانهيار التهدمي وبقيت جميع الثنائيات المصنوعة للعمل في منطقة الانهيار تدعى ثنائيات زنر بغض النظر عن نوع الانهيار الذي يحدث فيها .

(4 . 2) خصائص ثنائي زنر

الشكل (2) يمثل منحني الخواص لثنائي زنر . يلاحظ من هذا الشكل ان منحني خواصه في منطقة الانحياز الامامي لا يختلف عن منحني خواص الثنائي الاعتيادي . اما في حالة الانحياز العكسي فنلاحظ ان التيار العكسي يكون صغيرا لحد الاهمال حتى تصبح فولتية التحييز العكسية قريبة من فولتية الانهيار (V_Z) فتحدث عندها زيادة ملحوظة في التيار ويرمز للتيار الذي يبدأ فيه الانهيار بالرمز (I_{ZT}) . ان الانهيار في ثنائي زنر يكون له انحناءة حادة جداً تعقبه زيادة عمودية تقريبا بالتيار ويلاحظ ان الفولتية على طرفيه تبقى ثابتة تقريبا وتساوي (V_Z) في معظم منطقة الانهيار ، علماً ان هنالك قيمة قصوى للتيار العكسي يمكن ان يتحمله ثنائي زنر دون ان يتسبب بتلفه ويرمز له بالرمز (I_{ZM}) .

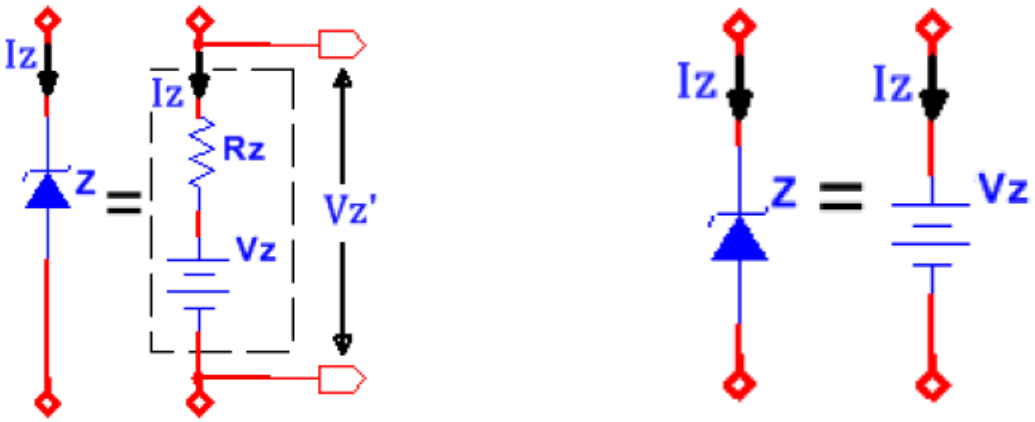


شكل (2) منحني خواص ثنائي زنر

(4 . 3) الدائرة المكافئة لثنائي زنر

يمكن اعتبار ثنائي زنر العامل في منطقة الانهيار (تقريب مثالي) كبطارية ذات فولتية مقدارها فولتية الانهيار V_Z كما موضح بالشكل (3 أ) . للحصول على نتائج اكثر دقة نأخذ بنظر الاعتبار انحدار منطقة

الانهيار ، لان منطقة الانهيار ليست عمودية تماما لوجود ممانعة صغيرة لثنائي زنر والشكل (3 ب) يوضح التقريب الثاني لثنائي زنر .



(ب) تقريب ثاني (أ) تقريب مثالي

شكل (3) الدائرة المكافئة لثنائي زنر

عند اخذ ممانعة زنر بنظر الاعتبار فان فولتية زنر الكلية تعطى بالعلاقة :

$$V_Z' = V_Z + I_Z R_Z \qquad (1)$$

(4 . 4) المعامل الحراري لثنائي زنر

يعرف المعامل الحراري لثنائي زنر بانه التغير المئوي في فولتية الانهيار لثنائي زنر لكل درجة مئوية واحدة ويرمز له بالرمز (T_C) ، اي ان :

$$T_C = \frac{(\Delta V_Z \ / V_{Z0})}{\Delta T} \times 100\% \qquad (2)$$

حيث (ΔV_Z) هو التغير في فولتية انهيار زنر ويعطى بالعلاقة $\Delta V_Z = V_{Z1} - V_{Z0}$

و (ΔT) هو التغير في درجة الحرارة ويعطى بالعلاقة $\Delta T = T_1 - T_0$

وتمثل (T_0) درجة الحرارة المعتمدة عند تعيين فولتية انهيار زنر (V_{Z0}) (والتي تكون في الغالب عند درجة حرارة الغرفة) بينما تمثل (T_1) درجة الحرارة التي تكون فيها فولتية انهيار زنر (V_{Z1}) . ومن علاقة المعامل الحراري يمكننا التعبير عن التغير في فولتية انهيار زنر بالعلاقة :

$$\Delta V_Z = T_C \times \Delta T \times V_{Z0} \qquad (3)$$

ان المعامل الحراري لثنائي زنر يكون سالب لفولتيات انهيار اقل من 4 فولت (انهيار زنر) ، بينما يكون هذا المعامل موجب لفولتيات انكسار اكبر من 6 فولت (انهيار تهدمي) ، وتتغير اشارة المعامل الحراري من السالب الى الموجب بين 4 فولت و 6 فولت .

مثال 1 : اذا علمت ان المعامل الحراري لثنائي زنر هو ($0.004\%/^\circ C$) وجهد انهياره يساوي 12 فولت عند درجة حرارة ($25^\circ C$) ، اوجد التغير في فولتية زنر وفولتية زنر عند درجة حرارة ($110^\circ C$) ؟

الحل : من معطيات المثال لدينا $T_C = 0.004\%/^\circ C , V_{Z0} = 12V , T_0 = 25^\circ C , T_1 = 110^\circ C$

ان التغير في فولتية انهيار زنر يعطى بالعلاقة :

$$\Delta V_Z = T_C \times \Delta T \times V_{Z0}$$

بالتعويض نحصل على :

$$\Delta V_Z = (0.004 / 100) / ^\circ C \times (110 - 25)\ ^\circ C \times 12V = 0.041V$$

من النتيجة الاخيرة ان التغير في فولتية زنر هو موجب ، اي انه في هذه الحالة فان فولتية انهيار زنر قد زادت بارتفاع درجة الحرارة ويمكن حساب فولتية انهيار زنر عند درجة حرارة ($110^{\circ}C$) من العلاقة

$$\Delta V_Z = V_{Z1} - V_{Z0} \rightarrow V_{Z1} = V_{Z0} + \Delta V_Z = 12V + 0.041V = 12.041V$$

(4 . 5) القدرة المبددة وهبوط القدرة لثنائي زنر بسبب ارتفاع درجة الحرارة

ان تبديد القدرة (Power Dissipation) في ثنائي زنر الذي يعمل في منطقة الانهيار يساوي حاصل ضرب فولتية انهياره في التيار المار خلاله ، اي ان : $P_Z = V_Z I_Z$ فمثلا لو كان ($V_Z = 12V$) و ($I_Z = 10mA$) فان : $P_Z = 12V \times 10mA = 12V \times 10 \times 10^{-3}A = 0.12W$

ان لكل ثنائي زنر اقصى قيمة للقدرة المبددة (P_{ZMAX}) يمكن ان يتحملها الثنائي دون ان يتلف ، وعليه لو كانت القدرة المبددة اقل من هذه القيمة فان ثنائي زنر لن يعطب . ان ثنائيات زنر التجارية لها مدى تحمل قدرة يتراوح بين ($0.25W$) الى اكثر من ($50W$) . غالبا ما تبين استمارة المعلومات مقدار اقصى تيار يتحمله ثنائي زنر دون تجاوز مدى تحمل القدرة ، ويرمز لأقصى تيار يمكن ان يتحمله ثنائي زنر بالرمز I_{ZM} والعلاقة التي تربط بين اقصى تيار واقصى قدرة مبددة هي : $I_{ZM} = P_{ZMAX} / V_Z$.

ان اقصى قدرة مبددة في ثنائي زنر تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة عادة ما يتم تعيين اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة معينة وغالباً ما تكون ($50^{\circ}C$) ، وعند ارتفاع درجة الحرارة عن ($50^{\circ}C$) فان القدرة المبددة تهبط بسبب ارتفاع درجة الحرارة .

(4 . 6) تطبيقات ثنائي زنر

لثنائي زنر العديد من التطبيقات في الدوائر الالكترونية ، وسوف نقتصر في دراستها على اهم تطبيقين وهما :

<u>اولاً : استعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية (Voltage Regulator)</u>

تستعمل دوائر تنظيم الفولتية للحصول على فولتية اخراج مستمرة ثابتة القيمة بصرف النظر عن التغير في فولتية الادخال او التغير في قيمة مقاومة الحمل وتعتبر المرحلة الاخيرة من مراحل مجهز القدرة المستمرة . ان مقاومة الحمل المربوطة على مجهز القدرة قد تكون مقاومة مفردة او مقاومة مكافئة لعدة دوائر مربوطة على التوازي ، وفي الحالتين فان مقاومة الحمل تكون متغيرة ويمكن ان تتغير من قيمة صغيرة الى قيمة كبيرة . وتعطى معادلة تنظيم الفولتية بالصيغة :

$$V_R = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \qquad (4)$$

حيث V_R النسبة المئوية لتنظيم الفولتية .

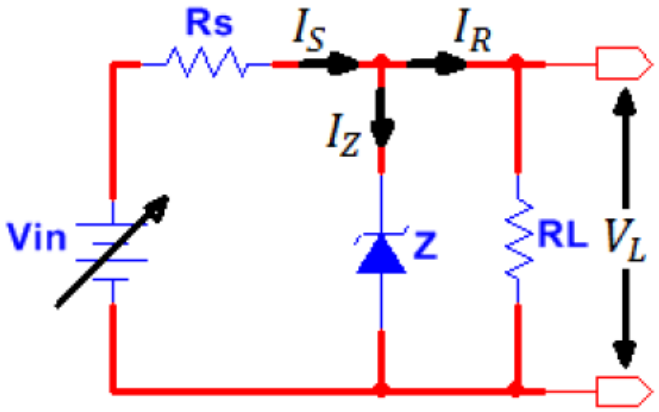
V_{NL} فولتية الاخراج المستمرة عند عدم وجود حمل ($R_L = R_{LMAX} = \infty$) .

V_{FL} فولتية الاخراج المستمرة عند حمل كامل ($R_L = R_{LMIN}$) .

في مجهز القدرة المصمم بصورة جيدة تقل فولتية الحمل الكامل قليلاً عن الفولتية في حالة عدم وجود الحمل ($V_R \approx 0$) ، وهذا يعني انه كلما كان (V_R) قليلاً كان مجهز القدرة افضل .

الشكل (4) يمثل ابسط انواع دوائر تنظيم الفولتية والذي استعمل فيها ثنائي زنر (من اهم تطبيقات ثنائي زنر) لكون هذا الثنائي يتميز بثبوت نسبي للفولتية على طرفيه عندما يكون عاملاً في منطقة الانهيار . تسمى هذه الدائرة بمنظم زنر ، حيث يربط الحمل على التوازي على طرفي ثنائي زنر اما مقاومة تحديد التيار (R_S) فوظيفتها تحديد التيار المار بهذا الثنائي لكي لا يتجاوز الحد الاقصى المسموح به (I_{ZMAX}) .

كتقريب اول يمكن اعتبار ثنائي زنر العامل في منطقة الانهيار كبطارية جهدها (V_Z) ، ولان الحمل مربوط على التوازي مع هذا الثنائي فان الجهد على الحمل سيكون ثابتاً ايضاً .



شكل (4) دائرة منظم زنر

من الشكل (4) يمكن ايجاد العلاقة الخاصة بالتيار المار في المقاومة (R_S) بالاستعانة بقانون كيرشوف الثاني (المجموع الجبري لفروق الجهد حول اي دائرة كهربائية مغلقة يساوي صفر) :

$$I_S = \frac{V_{in} - V_L}{R_S} \qquad (5)$$

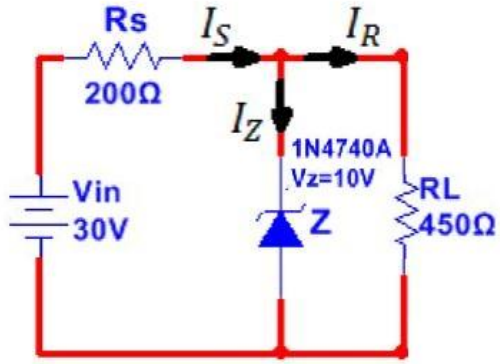
يتفرق (I_S) عند ارتباط ثنائي زنر مع مقاومة الحمل وحسب قانون كيرشوف الاول (المجموع الجبري للتيارات الداخلة والخارجة عند اي نقطة في دائرة كهربائية مغلقة يساوي صفر) حيث يمكن التعبير عن تيار ثنائي زنر بالعلاقة :

$$I_Z = I_S + I_L \qquad (6)$$

وبإهمال ممانعة زنر الصغيرة يكون ($V_L = V_Z$) وبالتالي ($I_L = V_L / R_L$) . هذه العلاقات كافية للتحليل الاولي في دائرة منظم زنر وللحصول على دقة افضل نأخذ ممانعة زنر (R_Z) بنظر الاعتبار عندها يمكن ان نعبر عن فرق الجهد على طرفي الحمل بالعلاقة :

$$V_L = V_Z + I_Z R_Z \qquad (7)$$

مثال 2 : الشكل التالي يوضح دائرة منظم زنر ، اوجد فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل ، تيار مقاومة تحديد التيار ، وتيار ثنائي زنر ؟



الحل : من معطيات المثال لدينا $V_{in} = 30V$ و $R_S = 200\Omega$ و $V_Z = 10V$ و $R_L = 450\Omega$ لذلك

$$V_L = V_Z = 10V$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10V}{450\Omega} = 0.02222A = 22.22mA$$

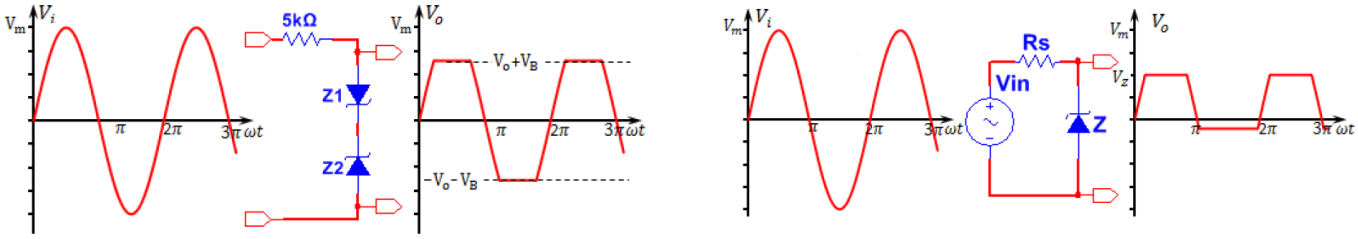
$$I_S = \frac{V_{in} - V_L}{R_S} = \frac{30V - 10V}{200\Omega} = 0.1A = 100mA$$

$$I_Z = I_S + I_L = 100mA - 22.22mA = 77.78mA$$

عادة ما يكون منظم الفولتية على شكل دائرة متكاملة تحتوي على ثلاثة اطراف ويمتاز هذا المنظم بسهولة الاستعمال والاعتمادية العالية وتنظيم افضل .

ثانياً : استعمال ثنائي زنر في تحديد (تقليم) الفولتية

يمكن استعمال ثنائي زنر في دوائر تحديد (تقليم) الفولتية ويتيح ذلك الاستغناء عن البطارية المستخدمة في دوائر التحديد المعتمدة على ثنائي التقويم مما يوفر تكلفة اقل وحجم اصغر . والشكل (5) يوضح دائرة محدد فولتية الموجب وكذلك محدد الفولتية المركب .



دائرة محدد الفولتية الموجب دائرة محدد الفولتية المركب

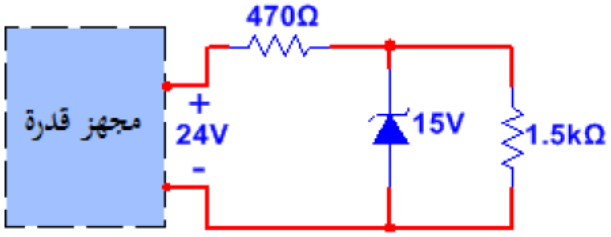
شكل (5) دائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي زنر

اسئلة ومسائل الفصل الرابع

س1 : قارن بين كل من : أ – ثنائي زنر وثنائي التقويم . ب – الانهيار التهدمي وانهيار زنر .

س2 : ما هي الميزة التي تجعل من ثنائي زنر العنصر الاساسي في دوائر تنظيم الفولتية .

س3 : المعامل الحراري لثنائي زنر هو (0.004%/˚C) وجهد انهياره (14V) عند درجة (25˚C) ، اوجد التغير الفولتية وفولتية زنر عند ارتفاع درجة الحرارة الى (120˚C) .

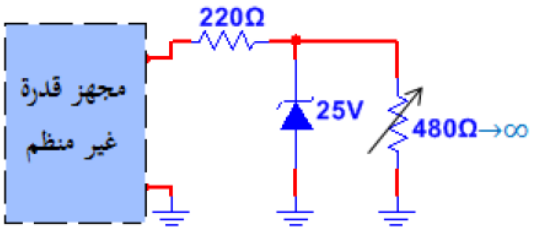


س4 : في الشكل المجاور اوجد :

1 – فرق الجهد على طرفي الحمل في حالة عدم توصيل ثنائي زنر بالدائرة .

2 – فرق الجهد على طرفي الحمل بعد توصيل ثنائي زنر بالدائرة .

3 – التيارات I_S و I_L و I_Z .



س5 : في الشكل المجاور احسب :

1 – التيار المار في مقاومة التحديد .

2 – اصغر واعظم تيار حمل .

3 – اصغر واعظم تيار زنر .