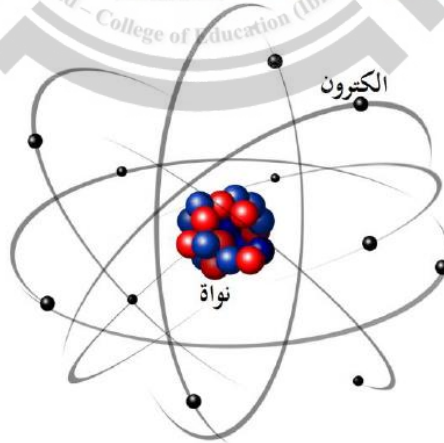


## الفصل الأول: مقدمة عامة عن فيزياء اشباه الموصلات

- التركيب الذري
- نظرية الحزم و مستويات الطاقة في المواد الصلبة
- تصنيف المواد
- أشباه الموصلات و علاقة فجوة الطاقة
- التوصيل في المواد الصلبة
- توزيع الإلكترونات و منسوب مستوى فيرمي
- اشباه الموصلات النقية
- التطعيم
- شبه الموصل من نوع n-type
- شبه الموصل من نوع p-type
- كثافة الشحنات في أشباه الموصلات المشوبة n-type و p-type

### 1. التركيب الذري Atomic Structure

ان جميع المواد مكونة من ذرات، وكل ذرة مكون من نواة تتركز فيها كتلة الذرة وتضم بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة (باستثناء ذرة الهيدروجين إذ تحتوي نواتها على بروتون واحد فقط)، وتدور حول النواة جسيمات متناهية في الصغر تسمى الإلكترونات وذات شحنة سالبة تساوي عددية شحنة البروتون وبمدارات محددة (دائرية أو قطع ناقص). وكما هو موضح بالشكل (1-10). في الحالة الاعتيادية يكون عدد الإلكترونات مساوية لعدد البروتونات وبالتالي تكون الذرة متعادلة كهربائياً.



شكل (1-1) مخطط للتركيب الذري

أن الإلكترونات التي تكون في مدارات ابعده عن النواة تمتلك طاقة اكبر وهي بنفس الوقت الأقل ارتباطاً مع الذرة بالمقارنة مع الإلكترونات في المدارات الأقرب، وهذا بسبب كون قوة التجاذب بين النواة الموجبة والإلكترون تنناقص كلما زادت المسافة بين الإلكترون والنواة.

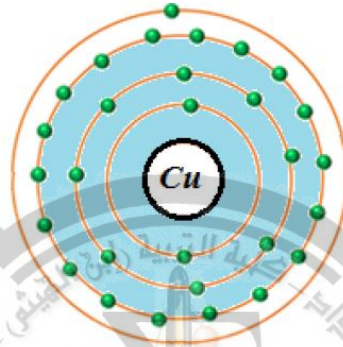
تسمى الإلكترونات الأعلى طاقة والمتواجدة في الغلاف الخارجي الأبعد للنواة والتي تكون الأقل ارتباطاً بالنواة بالإلكترونات التكافؤ (Valence electron) والغلاف الخارجي الأبعد يسمى

غلاف التكافؤ (Valence shell). ان الكترونات التكافؤ هي التي تسهم في التفاعلات الكيميائية والروابط بين الذرات ضمن المادة وكذلك هي التي تحدد الخواص الكهربائية للمادة. أن اقصى عدد من الإلكترونات (Ne) يمكن أن تتواجد في غلاف معين لذرة ما تعطى بالمعادلة:

$$Ne = 2n.....(1)$$

حيث  $n$  هو تسلسل الغلاف.

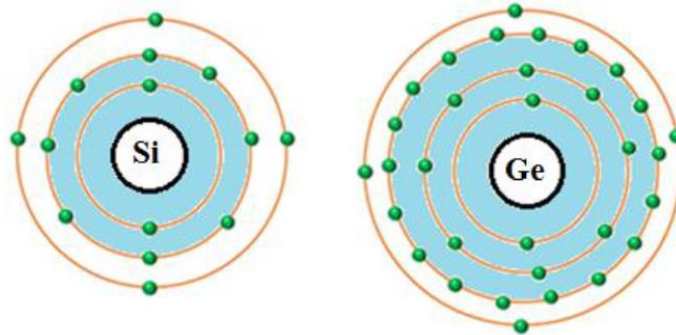
لتوضيح أهمية غلاف التكافؤ يعرف قلب (core) ذرة ما بأنه النواة وكل الأغلفة الداخلية المحيطة بها، فعلى سبيل المثال تحتوي ذرة النحاس Cu على 29 الكترون بالشكل (1-2).



شكل (1-2) مخطط لذرة النحاس

يلاحظ من الشكل أن لقلب ذرة النحاس شحنة صافية مقدارها شحنة بروتون واحد وذلك لأنها تحتوي على 29 بروتون و 28 الكترون في الأغلفة الداخلية الثلاث، وحيث أن الكترون التكافؤ في مدار بعيد نسبية عن قلب الذرة لذلك يكون ارتباط الكترون التكافؤ في حالة ذرة النحاس ضعيف جدا وبالتالي فان أي قوة خارجية يمكنها بسهولة أن تحرر الكترون التكافؤ من ذرة النحاس وعند تسليط أي جهد كهربائي بسيط يتحرك الإلكترون من ذرة نحاس إلى أخرى ولهذا السبب يعتبر النحاس موصل جيد للكهرباء.

ان افضل الموصلات مثل الفضة ، النحاس والذهب تمتلك الكترون تكافؤ واحد ، بينما افضل العوازل تمتلك ثمان الكترونات تكافؤ (إذ أن غلاف التكافؤ يتشبع بثمان الكترونات) اما أشباه الموصلات فلها خواص كهربائية تقع بين الموصلات والعوازل، أي أن افضل أشباه الموصلات تمتلك اربع الكترونات تكافؤ ومن امثلتها السليكون Si والجرمانيوم Ge وكما هو موضح بالشكل (1-3).

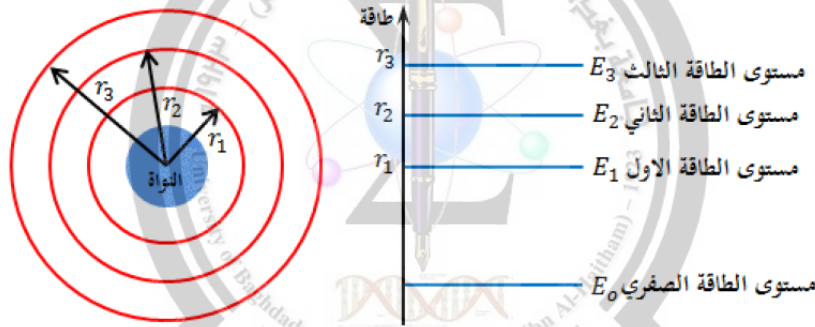


شكل (1-3) مخطط لذرة السليكون وذرة الجرمانيوم

في الشكل (3-1) نلاحظ الكترونات التكافؤ لذرة الجرمانيوم تقع في الغلاف الرابع بينما الكترونات التكافؤ الأربعة للسليكون تقع في الغلاف الثالث الأقرب للنواة. وهذا يعني أن الكترونات التكافؤ للجرمانيوم أعلى طاقة من مثيلاتها في ذرة السليكون وبالتالي فإن الكترونات التكافؤ للجرمانيوم سوف تحتاج إلى طاقة أقل للإفلات من مجال جذب نواتها. وهذا يجعل الجرمانيوم أقل استقراراً في درجات الحرارة العالية، وذلك هو سبب أساسي لجعل السليكون المادة شبه الموصلة الأكثر استعمالاً في الوقت الراهن. علماً أن هناك سبب آخر وهو وفرة السليكون بكثرة في الطبيعة إذ يعد العنصر الثاني بعد الأوكسجين وفرة في الطبيعة، إلا أن صعوبة استخراج عنصر السليكون من مركباته ومن ثم تنقيته كانت وراء انتشار استعمال الجرمانيوم في بدايات عصر الكترونيات أشباه الموصلات وبعد التغلب على تلك المشكلات التقنية أصبح السليكون العنصر الأكثر استعمالاً في تصنيع نباتات أشباه الموصلات.

## 2. نظرية حزم الطاقة في المواد الصلبة: Energy Bands Theory in Solids

في حالة ذرة مفردة معزولة فإن مدار الإلكترون يتأثر فقط بالشحنات الموجودة في الذرة المعزولة، وفي هذه الحالة تكون مستويات الطاقة محددة لكل مدار مسموح للإلكترون وكما موضح بالشكل (4-1).

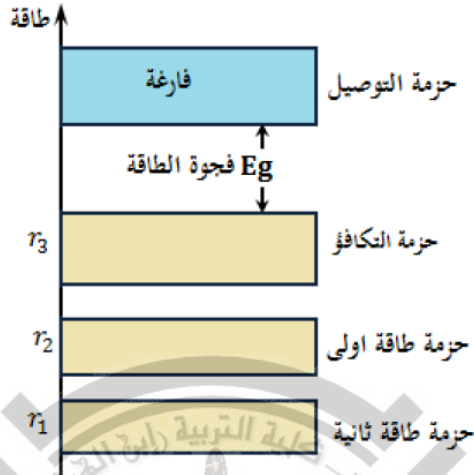


شكل (4-1) مخطط مستويات الطاقة لذرة مفردة معزولة

أن ما ذكر بخصوص الذرة المعزولة لا ينطبق في حالة الذرات المكونة للمادة الصلبة، فمعظم المواد الصلبة تكون ذراتها قريبة جداً من بعضها حيث تؤثر النواة الواحدة على الكترونات الخاصة وكذلك على الكترونات المجاورة، وقد وجد أن معظم المعادن وأشباه الموصلات بلورية التركيب (Crystalline Structure) حيث تصطف مكوناتها الذرية وبدقة أكثر الأيونات) في نظام هندسي معين ومتكرر في نسق ثلاثي الأبعاد تسمى البلورة (Crystal)، وتبعاً لهذا البناء البلوري نجد أن الانوية تكاد تكون مثبتة في عقد (nodes) في حين تتداخل الكترونات الذرات المتجاورة في الفراغ بين الانوية، ونتيجة لهذا التداخل تتغير مستويات الطاقة. ويكون هذا التغير صغيرة بالنسبة لمستويات الأغلفة الداخلية البعداً النسبي عن الانوية المجاورة) في حين أن مستويات الطاقة الخاصة بالأغلفة الخارجية تتغير تغيراً ملموساً، حيث تتشارك أكثر من نواة هذه الإلكترونات بينها، وحسب مبدأ الاستبعاد لبولي والذي ينص على (لا يمكن أن يكون الإلكترونين في ذرة ما نفس الحالات الكمية الأربعة)، يحدث انقسام في مستويات الطاقة للذرات المتجاورة.

أن انقسام مستويات الطاقة يكون بعدد الذرات الموجودة، وحيث أن المواد الصلبة تمتاز بتركيز عالي للذرات فالسنتيمتر المكعب الواحد ( $\text{cm}^3$ ) يحوي تقريبا ( $N \approx 10^{23}$ ) ذرة تقريبا، وبالنتيجة يكون لدينا  $N$  من مستويات الطاقة لكل غلاف، ويكون الفرق في قيمة الطاقة المستويات الغلاف الواحد بسيطة جدا، بحيث تبدو المستويات الغلاف الواحد كأنها مستمرة وتسمى حزمة الطاقة (Energy band).

الشكل (1-5) يوضح مخطط لحزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق ( $-273^\circ\text{C}$ ).



شكل (1-5) مخطط حزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة الصفر المطلق

يلاحظ من الشكل كذلك انه بمستوى أعلى من حزمة التكافؤ توجد حزمة التوصيل (Conduction band) التي تمثل المجموعة الأعلى طاقة وذات أنصاف الأقطار التي تحقق طبيعة الإلكترون كجسيم وكموجة. أن المدارات في حزمة التوصيل كبيرة بالقدر الذي يجعل جذب النواة للإلكترون ضعيفة جدا وبعبارة أخرى لو رفع الكتلون إلى داخل حزمة التوصيل لاستطاع التحرك بحرية من ذرة إلى أخرى ولهذا السبب تسمى الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل بالإلكترونات الحرة (free electrons).

عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون حزمة التوصيل فارغة وهذا يعني أنه لا توجد طاقة كافية عند أي الكتلون لكي ينتقل إلى مدار حزمة التوصيل. وتسمى المنطقة التي تفصل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل بفجوة الطاقة (Energy gap) وتسمى أيضا فجوة الطاقة الممنوعة (Forbidden Energy gap) وذلك لعدم احتوائها على حالات طاقة مسموحة بها.

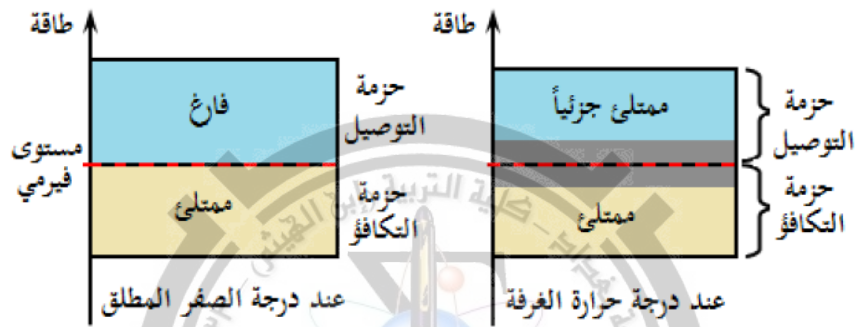
### 3. تصنيف المواد حسب نظرية الحزم

بالاعتماد على نظرية حزم الطاقة يمكن تصنيف المواد الصلبة حسب توصيليتها الكهربائية إلى:

#### A. مواد موصلة (Conductors)

الشكل (1-6) يوضح مخططة نموذجية لحزم الطاقة في المواد الموصلة. يلاحظ أن مستويات الطاقة قد رسمت بشكل مستمر في حزمة التكافؤ بحيث ظهرت هذه الحزمة متداخلة مع حزمة التوصيل وبالتالي لم يعد هناك وجود لفجوة الطاقة. ان اختفاء فجوة الطاقة في البلورات الموصلة يعني ان أي الكتلون تكافؤي سوف يكون حرة في التجوال خلال البلورة وكذلك التحرك استجابة للمجال الكهربائي عند وجوده فيه وهذا هو السبب في عده موصلا.

تتوزع الإلكترونات في الحزم حسب مبدأ الاستبعاد لباولي وعند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الإلكترونات التحرك خلال البلورة وذلك لأنها جميعاً مرتبطة بشدة إلى ذراتها وبالتالي تملأ حزمة التكافؤ من أوطأ مستوى طاقة فيها إلى أعلى مستوى طاقة فيها والذي يسمى مستوى فيرمي (Fermi Level). أي أن حزمة التوصيل في المواد الموصلة تكون فارغة عند درجة حرارة الصفر المطلق إذ لا توجد طاقة كافية عند أي الكترولون لكي ينتقل في مدار حزمة التوصيل. عند ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق فإن الطاقة الحرارية التي سوف تكتسبها الإلكترونات ستمكن بعضها منها من الإفلات من ذراتها والانتقال إلى حزمة التوصيل فيحدث تداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل ، وعند تسليط فرق جهد عبر الموصل فإن مجالاً كهربائياً يتولد داخل الموصل يعمل على تعجيل الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل وتوليد تيار كهربائي. الشكل (1-6) يوضح مخطط لحزم الطاقة للمواد الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وكذلك في درجة حرارة الغرفة (300°C) حيث يحدث تداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل.

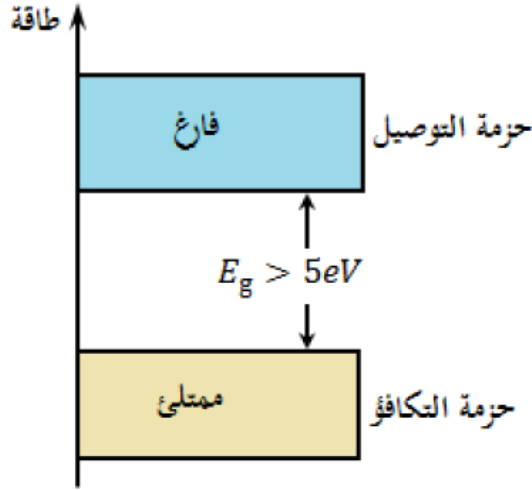


شكل (1-6) مخطط حزم الطاقة للمواد الموصلة

بشكل عام تزداد مقاومة المواد الموصلة بزيادة درجة الحرارة وذلك لأن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من معدل التصادمات التي تحدث بين الإلكترون المتحرك والذرات المهتزة حول مواضع اتزانها في البلورة.

## B. المواد عازلة (Insulators)

الشكل (1-7) يوضح مخططة نموذجية لحزم الطاقة في المواد العازلة ، حيث يلاحظ أن حزمة التكافؤ تكون مفصولة عن حزمة التوصيل بفجوة طاقة كبيرة نسبياً (5eV أو أكثر)، في درجات الحرارة الاعتيادية لا تمتلك الإلكترونات في حزمة التكافؤ الطاقة التي تمكنها من الانتقال إلى حزمة التوصيل وبالتالي فإنه يمكن القول أن بلورة المادة العازلة تتميز بامتلاكها فجوة طاقة كبيرة نسبياً وتكون حزمة التكافؤ فيها مملوءة بالإلكترونات بينما تكون حزمة التوصيل فارغة.



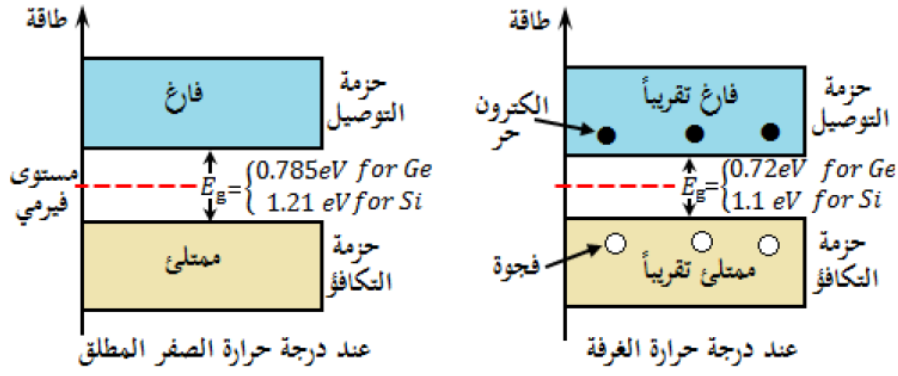
شكل (1-7) مخطط حزم الطاقة للمواد العازلة

يتضح مما سبق عدم وجود شحنات حرة في المواد العازلة حيث تكون إلكتروناتها مقيدة في أماكنها بقوى ذرية وجزئية كبيرة جداً، وعند تسليط فرق جهد على هذه المواد فإن المجال الكهربائي المتولد سوف يعمل فقط على إزاحة هذه الإلكترونات قليلاً عن مواضع اتزانها الأصلية. في حالات خاصة وعند تسليط فرق جهد كهربائي عالي جداً بحيث تكتسب الإلكترونات التكافؤ طاقة أكبر من فجوة الطاقة فيحدث انتقال للإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل فيسري تيار كهربائي في العازل وفي هذه الحالة يقال أن مقاومة العازل انهارت بتأثير المجال الكهربائي العالي.

أن تأثير ارتفاع درجة الحرارة على مقاومة المواد العازلة طفيف جداً ، إذ أن زيادة درجة الحرارة تقلل بصورة طفيفة جداً من مقاومة المادة العازلة إلا أن قيمة المقاومة لا تزال عالية.

### C. مواد شبه موصلة (Semiconductors)

لا يختلف مخطط الطاقة لأشباه الموصلات عن نظيره في العوازل إلا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في أشباه الموصلات في حدود واحد الكيلو فولت (1eV)، وتتميز المواد شبه الموصلة بكونها عازلة تماماً عند درجة حرارة الصفر المطلق حيث تكون حزمة التوصيل فارغة (أي لا توجد طاقة كافية عند أي الكيلو لكي ينتقل إلى حزمة التوصيل) وفجوة الطاقة تكون (0.785eV) للجرمانيوم و(1.21eV) للسليكون عند الصفر المطلق وعند ارتفاع درجة الحرارة تنتقل بعض الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل وكذلك تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة فمثلاً عند درجة حرارة الغرفة تكون فجوة الطاقة (0.72 eV) للجرمانيوم و(1.1eV) للسليكون. وبزيادة درجة الحرارة يزداد عدد الإلكترونات المنتقلة إلى حزمة التوصيل وبالتالي تزداد التوصيلية أي أن مقاومة شبه الموصل تقل بارتفاع درجة الحرارة (ويقال عندها أن للمواد شبه الموصلة معامل حراري سالب negative temperature coefficient) وعند درجات الحرارة العالية جداً تصبح المادة شبه الموصلة ذات توصيلية عالية أي تصبح مادة موصلة. وفي درجة حرارة الغرفة لا تكون المادة شبه الموصلة عازلة جيدة كما لا تكون موصلة جيدة ولهذا تدعى شبه موصل. الشكل (1-8) يوضح مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وفي درجة حرارة الغرفة.



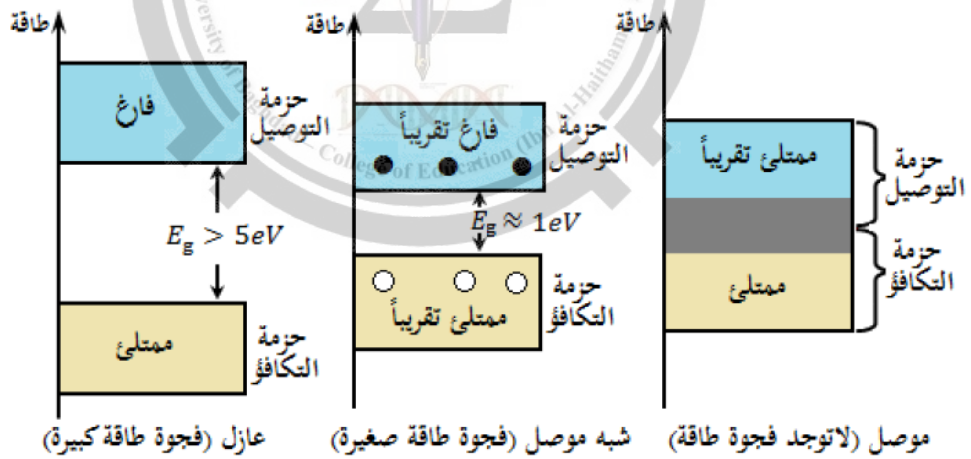
شكل (1-8) مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة

ان قيمة فجوة الطاقة لمادة معينة تعتمد على طبيعة المادة وكذلك على درجة الحرارة حيث تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة المطلقة (T). وحسب العلاقتان التجريبيتان:

$$\text{Si, } E_g = 1.21 - 3.6 \times 10^{-4} XT \text{ (eV)}$$

$$\text{Ge, } E_g = 0.785 - 2.23 \times 10^{-4} XT \text{ (eV)}$$

الشكل (9-1) يوضح حزم الطاقة للمواد العازلة، شبه الموصلة و الموصلة في درجة حرارة الغرفة.



شكل (1-9) مقارنة لحزم الطاقة للمواد: العازلة، شبه الموصلة و الموصلة في درجة حرارة الغرفة

#### 4. توزيع الإلكترونات و منسوب مستوى فيرمي (Fermi level)

ان احتمالية [f (E)] أي الكترون للتواجد في مستوى معين من الطاقة (E) في حالة الاتزان الحراري في درجة حرارة معينة (T) تعطى بدلالة دالة توزيع فيرمي-ديراك

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/k_B T}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

حيث (E) هي طاقة فيرمي وقيمتها تعتمد على طبيعة المادة ودرجة الحرارة.  $k_B$  ثابت بولتزمان وقيمته (  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$  ), T : درجة الحرارة بالكلفن. من دالة فيرمي - ديراك نلاحظ انه في حالة الصفر المطلق

فانه:

$$f(E) = \begin{cases} 0 & \text{for } E > E_f \\ 1 & \text{for } E < E_f \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3)$$

من النتيجة الأخيرة نجد انه في حالة درجة حرارة الصفر المطلق فإن مستويات الطاقة الأعلى من طاقة فيرمي تكون فارغة تماما [  $f(E) = 0$  ] بينما مستويات الطاقة الأقل من طاقة فيرمي تكون مملوءة تماما [  $f(E) = 1$  ] ومن ذلك يمكننا أن نعرف طاقة فيرمي (Fermi energy) بانها أعلى قيمة للطاقة يمكن أن يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق. كما يمكننا أن نلاحظ من دالة فيرمي ديراك انه في حالة درجة الحرارة الأكبر من الصفر المطلق ( $T \neq 0$ ) وكانت ( $E = E_f$ ) فان:

$$f(E) = 1/2$$

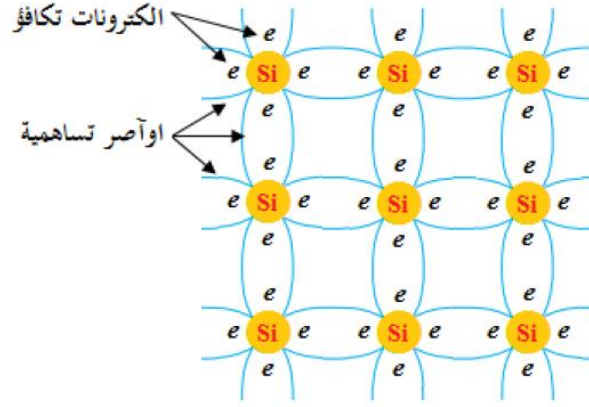
من النتيجة السابقة يمكن أن نعرف مستوى فيرمي (Fermi level) بأنه مستوى الطاقة الذي تكون احتمالية إشغاله من الكترون مساوية ل (50%).

## 5. أشباه الموصلات النقية (Intrinsic Semiconductors)

المواد شبه الموصلة النقية (Intrinsic semiconductor material) هي مواد شبه موصلة منقاه بعناية للتقليل من الشوائب والعيوب البلورية لأقصى حد ممكن ، ومن امثلتها السليكون النقي والجرمانيوم النقي. أن أشباه الموصلات هي مواد رباعية التكافؤ حيث يحتوي غلاف التكافؤ على أربعة الكترونات. عندما ترتبط ذرات شبه الموصل النقي لتشكل البلورة فانها ترتبط فيما بينها بأواصر تساهمية (Covalent Bonds). على سبيل المثال تمتلك ذرة السليكون أربعة الكترونات تكافؤية في غلافها التكافؤي، ولتشكيل بلورة السليكون تتحد ذرات السليكون بطريقة بحيث تحتوي في مداراتها التكافؤية ثمانية الكترونات ( لماذا) ولكي يتم ذلك فان كل ذرة سيلكون تضع نفسها بين أربعة ذرات سليكون أخرى. ان كل جار يساهم بالكترون مع الذرة المركزية وبذلك تكون الذرة المركزية قد التقطت أربعة الكترونات جامعة ثمانية

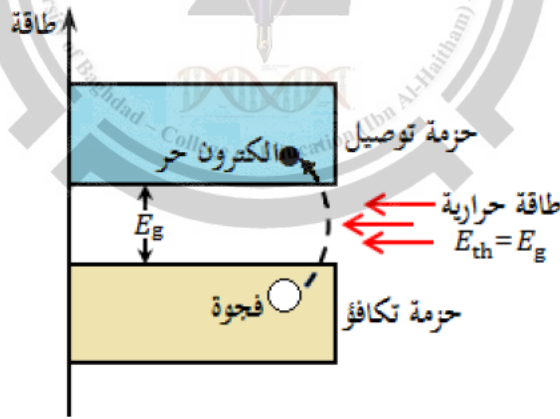
الكترونات في مدارها التكافؤي. و تمثل كل أصرة بزوج من خطين حيث يمثل كل خط الكترون مساهم كما هو موضح بالشكل (1-10). في درجة حرارة الصفر المطلق تكون جميع الإلكترونات مقيدة بأواصر تساهمية ولا توجد أي الكترونات حرة وبالتالي تكون مادة شبه الموصل النقي عازل تام في درجة حرارة الصفر المطلق ( $-273^\circ\text{C}$ ).





شكل (1-10) تمثيل الأواصر التساهمية لبلورة السليكون

عند ارتفاع درجة الحرارة عن الصفر المطلق فإن بلورة شبه الموصل النقي تبدأ بالاهتزاز الميكانيكي ومتى ما كانت الطاقة الحرارية المكتسبة تساوي أو أكبر من فجوة الطاقة فإن الأصرة التساهمية تنكسر وينتج عن ذلك توليد الكترون حر Free electron وفجوة Hole مكان (الالكترون فارغ) وتسمى هذه العملية عملية توليد زوج الكترون-فجوة (electron-hole pair) ان أي الكترون يكتسب طاقة خارجية وينتقل من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل يترك فجوة في حزمة التكافؤ، وكما هو موضح بالشكل (1-11). إن الفجوة تتصرف كشحنة موجبة (positive charge) حيث أن فقدان الإلكترون من ذرة ما يولد أيون موجب، والفجوة المتولدة سوف تعمل على جذب واقتناص أي الكترون قريب منها. أن احتواء المادة شبه الموصلة على الفجوات يعد اختلاف حاسم بين المواد الموصلة وشبه الموصلة. أن امتلاك المواد شبه الموصلة للفجوات تجعلها قادرة على القيام بالعديد من الوظائف التي لا تتمكن من تأديتها المواد الموصلة.



شكل (1-11) تمثيل العملية تولد زوج الكترون فجوة

أن الطاقة الحرارية المكتسبة من قبل مادة شبه الموصل النقي ستولد عدد متساوي من الإلكترونات الحرة والفجوات. الإلكترونات الحرة المتولدة ستتحرك بصورة عشوائية داخل البلورة ونتيجة لذلك فإن بعضاً من تلك الإلكترونات الحرة سوف تقترب من الفجوات وتصبح تحت تأثير جذبها الكهربائي وتلتحم معها وتدعى هذه العملية بإعادة الالتحام (Recombination) ونتيجة لذلك يختفي الإلكترون الحر والفجوة ويعد تشكيل أصرة تساهمية.

أن إعادة الالتحام تحصل في شبه الموصل لذلك فكل فجوة تملأ أخيرة بالكترون حر إلا في حالة وجود ضخ مستمر لطاقة حرارية حيث تنتج باستمرار أزواج الكترون - فجوة جديدة . أن

متوسط الزمن بين ولادة واختفاء زوج الكترون-فجوة) يدعى زمن البقاء (Life time) وهو يتراوح عادة بين بضعة نانو ثانية (nsec) إلى عدة ملي ثانية (msec) و يعتمد ذلك على مدى مثالية التركيب البلوري وعلى عوامل أخرى.

عند تسليط فرق جهد على طرفي شبه موصل نقي، يتولد نوعان من التيار داخلها، الأول هو من الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل المتولدة حرارية والتي تتجه باتجاه معاكس الاتجاه المجال الكهربائي المسلط باتجاه القطب الموجب للبطارية)، ويسمى التيار الناتج بتيار الإلكترون (electron current)، النوع الثاني من التيار يحدث في حزمة التكافؤ، حيث توجد الفجوات المتولدة حرارية، وكذلك فإن الكترونات التكافؤ لا تزال مرتبطة بذراتها ولا تستطيع التحرك بحرية كما هو الحال الإلكترونات التوصيل، ولكن بإمكان الكترونات التكافؤ أن تتحرك التسقط في أقرب فجوة وينتج عن ذلك تغير بسيط في مستوى طاقتها، وهي بذات الوقت تترك في المكان الذي تحركت منه فجوة جديدة والتي بدورها تجذب الكترون تكافؤ آخر فيظهر وكأن الفجوة تختفي من مكان لتظهر في مكان آخر وباتجاه المجال الكهربائي المسلط باتجاه القطب السالب)، ونتيجة لذلك ينشأ تيار يسمى تيار الفجوة (hole current).

أن التيار الكلي المار في شبه الموصل النقي نتيجة لتسليط فرق جهد يساوي مجموع تيار الإلكترونات الحرة وتيار الفجوات أي أن:

$$I = I_{electron} + I_{hol} \quad \dots\dots\dots(4)$$

في حالة شبه الموصل النقي يكون عدد الإلكترونات الحرة الناتجة من توليد زوج الكترون فجوة مساوية لعدد الفجوات دائمة ويكون مستوى فيرمي قريبة جدا من منتصف فجوة الطاقة عند درجة الحرارة المعنية.

عند درجات الحرارة الاعتيادية تكون مواد أشباه الموصلات في حالتها النقية مواد رديئة التوصيل وذلك لمحدودية عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ الناتجة من عمليات توليد أزواج الكترون - فجوة) وبالتالي يكون التيار الناتج عنها لا يصلح لكثير من التطبيقات العملية. علما انه من الممكن زيادة توصيلية المادة شبه الموصل من خلال زيادة درجة الحرارة، غير أن ذلك غير مرغوب به وذلك لصعوبة السيطرة على الخواص الكهربائية لأشباه الموصلات من خلال تسخينها.

في حالة تسليط مجال كهربائي خارجي على بلورة شبه الموصل النقي تكتسب حاملات الشحنة (الإلكترونات الحرة والفجوات) طاقة إضافية تضاف إلى طاقتها الحرارية، ونتيجة للتأثير المجال الخارجي تتعجل حاملات الشحنة وتصل سرعتها بعد فترة إلى قيمة ثابتة تسمى سرعة الانجراف (drift velocity) تعطى بالعلاقة:

$$\left. \begin{aligned} v &= \mu E \\ v_h &= \mu_h E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

حيث (  $v_e$  ) و (  $v_h$  ) هي سرعة الانجراف لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات، (  $E$  ) شدة المجال الخارجي المسلط، (  $\mu_e$  ) و (  $\mu_h$  ) هي حركية الإلكترون والفجوة على الترتيب وهي قيمة ثابتة تعتمد على طبيعة المادة. من تعريف التيار الكهربائي (المعدل الزمني لانتقال الشحنة) لدينا:

$$\Delta I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots(6)$$

من تعريف كثافة الشحنة الحجمية  $\rho$  (الشحنة لوحدة الحجم) لدينا:

$$\rho = \frac{\Delta q}{\Delta V} \Rightarrow \Delta q = \rho \Delta V, \quad \Delta V = \Delta S \Delta x$$

حيث  $\Delta S$  هي مساحة المقطع العرضي التفاضلي،  $(\Delta x)$  هي الإزاحة التفاضلية التي قطعها حاملات الشحنة، بالتعويض عن الشحنة في المعادلة (1-6) نحصل على:

$$\Delta I = \rho \Delta S \frac{\Delta x}{\Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

من تعريف الكثافة السطحية للتيار الدينا:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

بالاستفادة من المعادلة (1-7) يمكننا التعبير عن الكثافة السطحية للتيار بالصيغة:

$$J = \rho v \dots\dots\dots(8)$$

حيث تمثل  $(v)$  سرعة الانجراف،  $(\rho)$  الكثافة الشحنة الحجمية، من المعادلة الأخيرة يمكننا التعبير عن الكثافة السطحية للتيار الناشئ من كلا نوعي حاملات الشحنة بالصيغة:

$$J_e = \rho_e v_e$$

$$J_h = \rho_h v_h$$

ان كثافة الشحنة الحجمية  $(\rho)$  (الشحنة الكلية لوحدة الحجم يمكن التعبير عنها بدلالة حاصل ضرب شحنة الإلكترون  $(q)$  في الكثافة العددية  $(n)$  لحاملات الشحنة  $(\rho = qn)$  وبالتعويض في العلاقتين الأخيرتين نحصل على:

$$\left. \begin{aligned} J_e &= qn v_e \\ J_h &= qp v_h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

حيث تمثل  $(n)$  و  $(p)$  الكثافة العددية (تركيز) لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات على الترتيب.

أن كثافة التيار السطحي الكلية المارة في مادة شبه الموصل النقي تكون عبارة عن مجموع تيارتي الإلكترونات الحرة والفجوات، أي أن:

$$J = J_e + J_h \dots\dots\dots(10)$$

بالتعويض عن كثافة التيار للإلكترونات الحرة والفجوات من المعادلة (9) في المعادلة (10) نحصل على:

$$J = q(nv_e + pv_h) \dots\dots\dots(11)$$

بالتعويض عن سرعتي الانجراف للإلكترونات الحرة والفجوات التي حصلنا عليها من المعادلة (8 - 1) في المعادلة الأخيرة نحصل على:

$$J = q(n\mu_e + p\mu_h)E \dots\dots\dots(12)$$

في حالة شبه الموصل النقي فان لكل الكترولون توصيل يتولد من عملية تكوين الكترولون - فجوة يرافقه فجوة أي أن عدد الإلكترونات الحرة لوحدة الحجم في شبه الموصل النقي يساوي عدد الفجوات لوحدة الحجم أي أن:

$$n = p = n$$

حيث (n) تمثل عدد حالات الشحنة لوحدة الحجم في شبه الموصل النقي. من ذلك يمكننا كتابة العلاقة (12) بالصورة:

$$J = qn (\mu_e + \mu_h)E \dots\dots\dots(13)$$

ينص قانون أوم ( Ohm ' s Law ) على أن النسبة بين كثافة التيار إلى شدة المجال الكهربائي هو مقدار ثابت ولا يعتمد على المجال المسبب لسريان التيار، لذا يعبر عن قانون أوم رياضياً بالصيغة:

$$J = \sigma E \dots\dots\dots(14)$$

حيث  $\sigma$  مقدار ثابت يعتمد على طبيعة المادة ويسمى بالتوصيلية (Conductivity). بالمقارنة بين العلاقة (13) والعلاقة الواردة في قانون أوم (14) يمكننا استنتاج العلاقة التالية:

$$\sigma = qn (\mu_e + \mu_h) \dots\dots\dots(15)$$

العلاقة الأخيرة تعطي التوصيلية لمادة شبه الموصل النقي بدلالة كل من شحنة الإلكترون والكثافة العددية لحاملات الشحنة وحركية كل من الإلكترونات الحرة والفجوات.

ان الكثافة العددية لحاملات الشحنة في شبه الموصل النقي تعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة وتعتمد كذلك على طبيعة المادة وتعطى بالعلاقة:

$$n = A_0 T^3 e^{-(E_g/k_B T)} \dots\dots\dots(16)$$

حيث (A<sub>0</sub>) هو مقدار ثابت يعتمد على طبيعة المادة، (T) درجة الحرارة، (k<sub>B</sub>) ثابت بولتزمان.

بالإضافة إلى التيار الانجراف الناتج عن تسليط مجال كهربائي خارجي فإنه يمكن أن توجد هناك تيار آخر ناشئ عن اختلاف تركيز حاملات الشحنة في مادة شبه الموصل يسمى تيار الانتشار (Diffusion Current)، هذا النوع من التيار لا يوجد في المواد الموصلة وحدوثه في مواد أشباه الموصلات ناتج لعدم انتظام كثافة حاملات الشحنة في مادة شبه الموصل، أن كثافة التيار الانتشار يتناسب طرديا مع انحدار التركيز في مادة شبه الموصل، ففي حالة شبه الموصل من النوع السالب يمكن التعبير عن كثافة تيار الانتشار ( $J_{Dn}$ ) بالصيغة:

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn}{dx} \dots\dots\dots(17)$$

حيث ( $D_n$ ) ثابت يسمى معامل الانتشار ويعطى بعلاقة أينشتاين: ( $D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_e$ )

اما كثافة تيار الفجوات الناتجة عن انتشار الفجوات فتتناسب طرديا مع انحدار تركيز الفجوات في مادة شبه الموصل الموجب وتعطى بالعلاقة:

$$J_{Dp} = -eD_p \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots(18)$$

حيث ( $D_p$ ) هو معامل انتشار الفجوات ويعطى بعلاقة أينشتاين: ( $D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_h$ )

في حالة تسليط مجال كهربائي على مادة شبه موصلة فان التيار الناشئ سيكون عبارة عن مجموع تيار الانجراف وتيار الانتشار لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات، يمكننا التعبير عن التيار الناشئ عن حركة الإلكترونات الحرة في شبه الموصل بالصيغة:

$$J_n = qn_i \mu_e E + qD_n \frac{dn}{dx} \dots\dots\dots(19)$$

وبنفس الطريقة يمكننا التعبير عن التيار الناشئ عن حركة الفجوات بالصيغة:

$$J_p = qn_i \mu_h E - qD_n \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots(20)$$

اما التيار الكلي المار في شبه الموصل فيكون عبارة عن مجموع تيار الإلكترونات وتيار الفجوات ويعبر عنه بالصيغة:

$$J = J_n + J_p = qEn_i(\mu_e + \mu_h) + q \left( D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right) \dots\dots\dots(21)$$

**مثال (1-2):** أوجد توصيلية شريحة من مادة السليكون في درجة حرارة الغرفة (300K)، علما بان حركية الإلكترونات والفجوات في تلك الظروف كانت ( $\mu_e = 0.15 \text{ m}^2/V.S$ )، ( $\mu_h = 0.05 \text{ m}^2/V.S$ ) وتركيز حاملات الشحنة ( $n_i = 1.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ).

**الحل:**

$$\sigma = qn (\mu_e + \mu_h)$$

$$\sigma = 1.6 \times 10^{-19} \times (1.5 \times 10^{16}) \times (0.15 + 0.05)$$

$$\sigma = 4.8 \times 10^{-4} (\Omega.m)^{-1}$$

## التطعيم (التشويب) Doping

هو إضافة ذرات من الشوائب (ليست رباعية التكافؤ) إلى بلورة شبه الموصل النقي من أجل زيادة عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل أو لأجل زيادة عدد الفجوات في حزمة التكافؤ. عندما تطعم بلورة شبه الموصل النقي تسمى شبه موصل مطعم أو شبه موصل غير نقي (extrinsic semiconductor). تسمى الذرات الشائبة المضافة بالذرات المشوبة (Impurity atoms) لتمييزها عن ذرات شبه الموصل (السليكون أو الجرمانيوم) السائدة في التركيب البلوري.

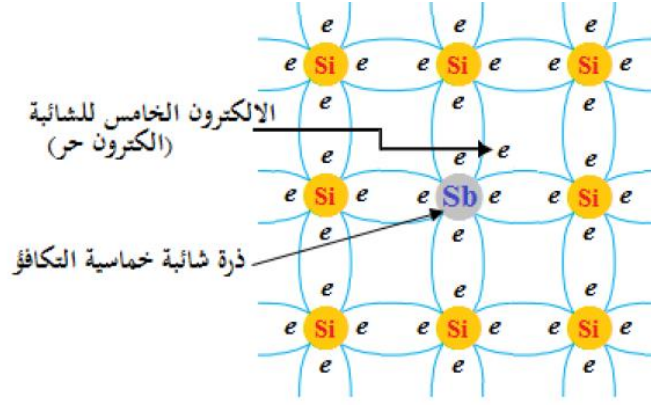
إن إضافة ذرات شائبة إلى أشباه الموصلات النقية بنسب قليلة تعمل على زيادة التوصيلية لهذه المواد فمثلا اذا أضيفت الشوائب بنسبة ذرة واحدة من الشوائب إلى مئة مليون ( $10^8$ ) ذرة جرمانيوم فان ذلك يكفي لزيادة التوصيلية بمقدار من (10 - 15) مرة. كذلك فان إضافة الذرات الشائبة إلى أشباه الموصلات النقية تعطينا إمكانية التحكم في كثافة الإلكترونات الحرة الموجودة في شبه الموصل أو كثافة الفجوات فيه وبصورة مستقلة. تضاف الشوائب عادة بنسبة ذرة شائبة واحدة لكل ( $10^8$ ) ذرة شبه موصل نقيه وتقل النسبة عن ذلك أو تزيد حسب الخصائص المطلوبة للنبيطة المنتجة.

يوجد نوعان من الشوائب، الأول يعمل على زيادة التوصيلية بزيادة عدد الإلكترونات في حزمة التوصيل وتكون من عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري (خماسية التكافؤ)، والنوع الثاني تعمل على زيادة عدد الفجوات في حزمة التكافؤ وتكون ضمن عناصر المجموعة الثالثة (ثلاثية التكافؤ) ولهذا السبب فان شبه الموصل المشوب يصنف إلى نوعين رئيسيين وذلك حسب نوع الشوائب المضافة اليه.

### أ- شبه موصل من النوع (n - type Semiconductor)

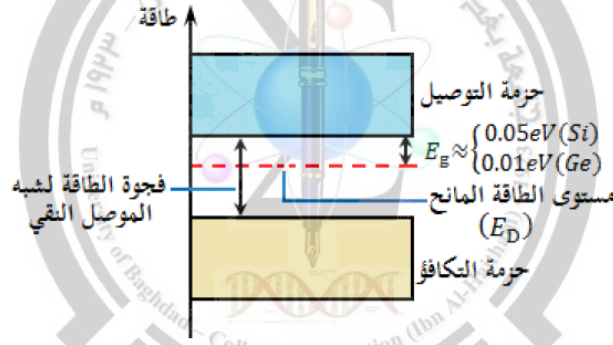
الزيادة عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل في مادة شبه الموصل النقي تتم إضافة شوائب (ذرات) خماسية التكافؤ (غلافها التكافؤي يحتوي على خمسة الكترونات مثل الزرنيخ (Arsenic) As ، الفسفور (Phosphorus) P)، البزموت (Bismuth) Bi و الأنتيمون (Antimony) Sb).

على سبيل المثال في حالة إضافة ذرة شائبة خماسية التكافؤ مثل ذرة الأنتيمون إلى بلورة السليكون فانها سوف تزيح ذرة شبه موصل نقيه وتحل محلها ضمن التركيب البلوري الجديد، وعندها فان أربعة الكترونات تكافؤية من ذرة الأنتيمون تساهم بأربعة أواصر تساهمية مع ذرات السليكون المجاورة ويبقى الإلكترون الخامس لذرة الأنتيمون معلقا بالذرة الأم الأنتيمون) دون أن يدخل ضمن الأواصر التي تربط الذرات وكما موضح بالشكل (1-12).



شكل (1-12) مخطط لعملية إضافة شائبة خماسية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

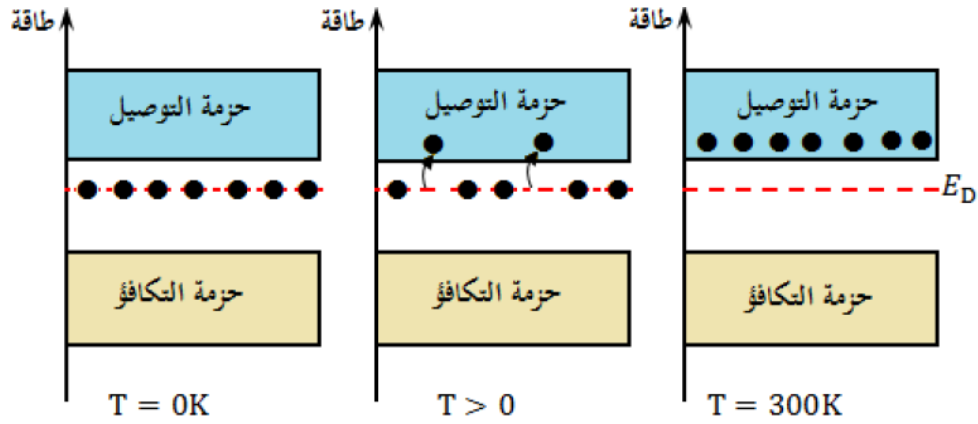
أن ذلك الإلكترون الخامس يكون شبه طليق حيث تكفي طاقة صغيرة بحدود (  $0.05 \text{ eV}$  ) للسليكون و (  $0.01 \text{ eV}$  ) للجرمانيوم لينتقل إلى حزمة التوصيل (حيث يعتمد مقدار الطاقة المطلوبة على طبيعة شبه الموصل النقي والشائبة المضافة)، وتعبير آخر فإن إضافة شوائب خماسية التكافؤ يضيف مستوى طاقة جديد ( $E_D$ ) يدعى مستوى الطاقة المانح ( Donor energy level ) ضمن فجوة الطاقة للبلورة وبالقرب من حزمة التوصيل وهو يمثل مستوى الطاقة للذرات الشائبة كما موضح بالشكل (1-13).



شكل (1-13) مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة خماسية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

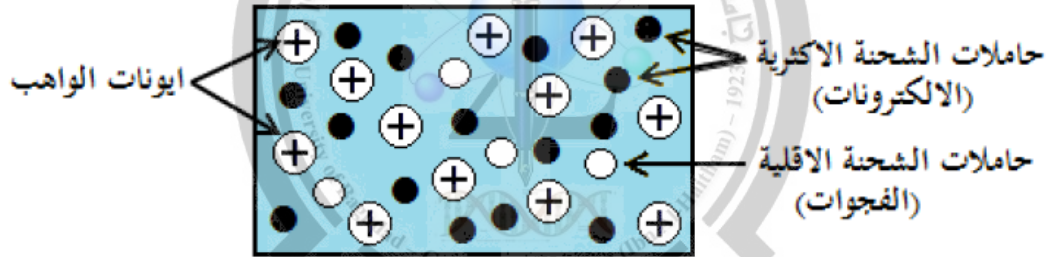
في درجة حرارة الغرفة تكون الطاقة الحرارية المكتسبة كافية لانتقال الإلكترون الخامس من مستوى الطاقة المانح إلى مستوى التوصيل، أي أنه في درجة حرارة الغرفة فإن لكل ذرة شائبة مضافة سيكون هناك إلكترون حر في حزمة التوصيل. و بالنتيجة يمكننا التحكم في عدد الإلكترونات الحرة (وبالتالي توصيلة مادة شبه الموصل النقي) من خلال التحكم بنسبة كمية ذرات الشائبة المضافة. ولذلك تسمى الذرات الشائبة المضافة في هذه الحالة بالذرات الواهبة (Donors).

أن ظهور الإلكترونات الفائضة في حزمة التوصيل نتيجة لإضافة شوائب خماسية التكافؤ لا يرافقه ظهور الفجوات في حزمة التكافؤ، وذلك لأن تلك الإلكترونات لا تنتقل من حزمة التكافؤ كما يحدث ذلك في مادة شبه الموصل النقي بل انها تنتقل من مستويات طاقة واقعة أسفل حافة حزمة التوصيل (المستوى المانح) كما موضح بالشكل (1-14).



شكل (1-14) مخطط لحزم الطاقة لشبه موصل من النوع السالب

ينبغي الإشارة هنا انه في درجات الحرارة الأعلى من الصفر المطلق تستمر الطاقة الحرارية المكتسبة في توليد أزواج الكترون-فجوة) ولكن ضمن درجات الحرارة الاعتيادية يكون عدد الإلكترونات الحرة المضافة من جراء عملية التشويب اكبر بكثير من عند الفجوات الناتجة من عمليات توليد الكترون - فجوة) ولذلك تسمى الإلكترونات الحرة في شبه الموصل من النوع n بحاملات الشحنة الاكثريية (majority carrier) وتسمى الفجوات بحاملات الشحنة الاقلية (minority carriers) ويكون غالبية التيار المتولد نتيجة لحركة الإلكترونات الحرة ولهذا السبب تسمى مادة شبه الموصل المشوبة بذرات خماسية التكافؤ بشبه موصل من النوع السالب كما هو موضح بالشكل (1-15).



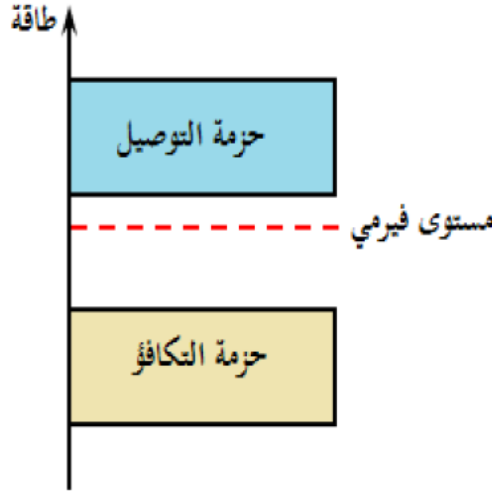
شكل (1-15) مخطط لحاملات الشحنة الاكثريية والاقلية لشبه موصل من النوع السالب

أن مادة شبه الموصل من النوع n اجمالاً تعتبر متعادلة كهربائية (كما هو الحال في شبه الموصل النقي) بصرف النظر عن مقدار التشويب وذلك لان الشائبة الخماسية متعادلة كهربائية بالأساس وكذلك ذرات شبه الموصل النقي وبالتالي فان التركيب الذي يضم الاثنين معا لا بد أن يكون متعادلا كذلك، والإلكترون الخامس المضاف يكون ضعيف الارتباط بذرته وفي حالة ابتعاده عن ذرته ويصبح الإلكترون حراً يساهم في عملية التوصيل بينما ذرتها الأم تصبح ايونة موجبة ولا تساهم في عملية التوصيل لانها مرتبطة بشدة ضمن التركيب البلوري.

على سبيل المثال ، عند درجة حرارة الغرفة فان مادة السليكون النقية تمتلك الكترون حر واحد الكل ( $10^{12}$ ) ذرة سليكون في حالة الجرمانيوم الكترون واحد لكل ( $10^9$ ) ذرة [ وفي حالة إضافة شوائب بنسبة شائبة لكل ( $10^7$ )، فان تركيز حاملات الشحنة (الإلكترونات) سوف يزيد بنسبة ( $10^5$ ) مرة.

ان مستوى فيرمي في حالة شبه الموصل من النوع n سوف ينزاح مقترباً من حزمة التوصيل وكلما زادت نسبة التشويب اقترب مستوى فيرمي من حزمة التوصيل اكثر كما هو موضح بالشكل (1-16).





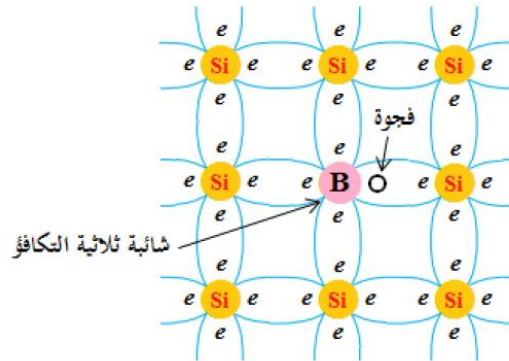
شكل (1-16) مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع السالب

### ب- شبه موصل من النوع p (p - type Semiconductor)

الزيادة عدد الفجوات في بلورة شبه الموصل يتم إضافة شوائب ثلاثية التكافؤ (غلافها الخارجي يحتوي على ثلاث إلكترونات تكافؤ) مثل الكاليوم (Ga) Gallium والاندسيوم (In) Indium والبورون (B) Boron. عند إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ مثل البورون إلى بلورة السليكون النقي فإنها سوف تزيح ذرة سليكون وتحل محلها، أن كل ذرة شائبة (بورون) ستكون محاطة بأربعة جيران (ذرات سليكون)، وبما أن كل ذرة ثلاثية التكافؤ قد جلبت معها ثلاثة إلكترونات في مدارها التكافؤي، لذلك ستنتقل سبعة إلكترونات فقط في مدارها التكافؤي (أربعة من ذرات الجوار وثلاثة منها) وبعبارة أخرى تظهر فجوة في كل ذرة شائبة ثلاثية التكافؤ كما هو موضح بالشكل (1-17).

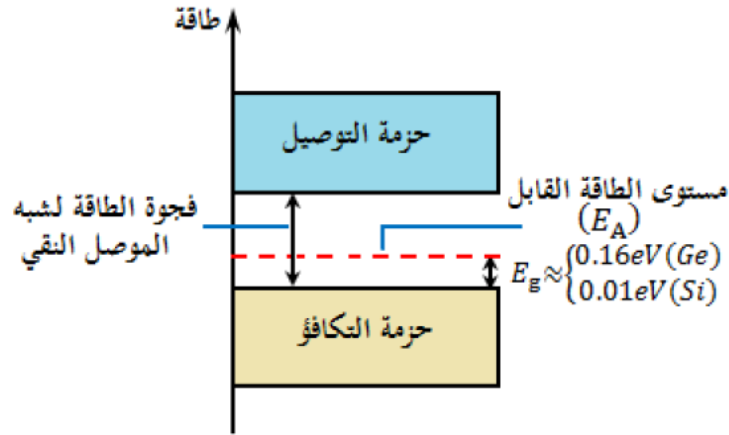
ان الفجوة الناشئة من التشويب ستكون محاطة بالإلكترونات العائدة لذرات شبه الموصل النقي (السليكون)، وتلك الإلكترونات تحتاج إلى طاقة قليلة جدا لكي تدخل في تلك الفجوة وعند انتقال الكترون معين لمليء تلك الفجوة فإنه يترك في محله (ذرة السليكون) فجوة جديدة ولذلك تدعى الذرات الشائبة ثلاثية التكافؤ بالذرات المتقبلة (Acceptors) لتقبلها الإلكترونات من ذرات البلورة الأصلية (بلورة شبه الموصل النقي). وكما هو الحال في الشوائب المانحة

فان الشوائب القابلة تكون مستوى طاقة جديد ( $E_A$ ) ضمن فجوة الطاقة وعلى مسافة قريبة جدا من حزمة التكافؤ يطلق عليها مستوى الطاقة القابل (Acceptor energy level) وتبلغ قيمته حوالي (0.01eV) بالنسبة للجرمانيوم (0.16 eV) بالنسبة للسليكون.



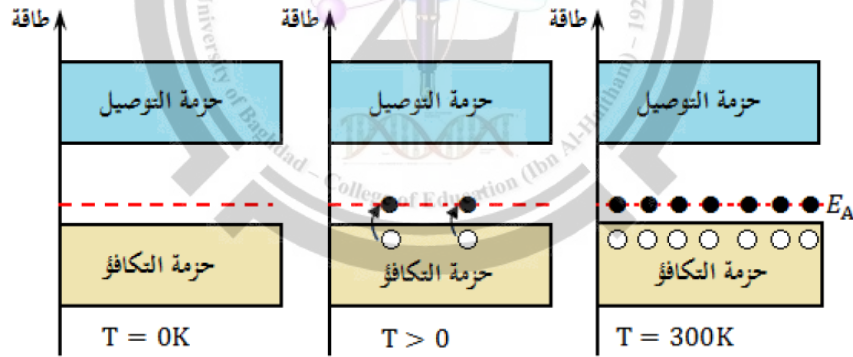
شكل (1-17) مخطط لعملية إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

الشكل (1-18) يمثل مخطط حزم الطاقة الشبه موصل من النوع p ويظهر فيه تأثير الشائبة القابلة المضافة على حزم الطاقة حيث ينشئ مستوى طاقة قابل ضمن فجوة الطاقة واعلى حزمة التكافؤ مباشرة.



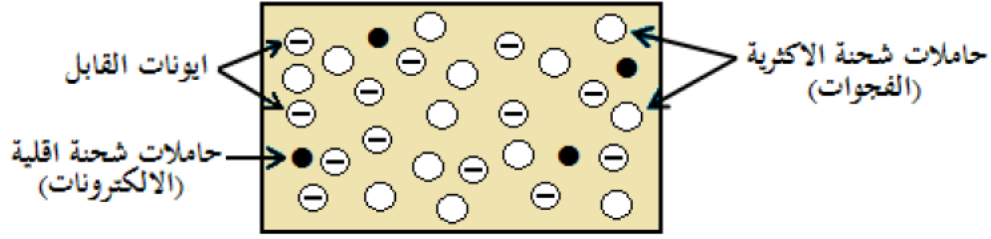
شكل (1-18) مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

ان وجود المستوى الطاقة القابل يسهل من عملية انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ اليه وان انتقال الإلكترون يؤدي إلى تخلف فجوة في حزمة التكافؤ من دون أن يرافق ذلك انتقال الكترون إلى حزمة التوصيل كما موضح بالشكل (1-19)، وبالتالي فان إضافة أي شائبة ثلاثية التكافؤ ستولد فجوة إضافية في حزمة التكافؤ وهذه الفجوات تساعد على سريان التيار (تيار الفجوات). وبالتالي يمكننا السيطرة على عدد الفجوات في حزمة التكافؤ من خلال التحكم بنسبة التشويب بالذرات القابلة.



شكل (1-19) مخطط لحزم الطاقة لشبه موصل من النوع الموجب

في درجة الحرارة الاعتيادية تحتوي المادة شبه الموصله من النوع P على عدد كبير من الفجوات الناتجة من عملية التشويب بالذرات القابلة، وبنفس الوقت تحتوي على عدد بسيط من الإلكترونات الحرة الناتجة من عمليات توليد زوج الكترون - فجوة). أي أنه في حالة شبه الموصل من النوع p تكون الفجوات هي حاملات الشحنة الأكثرية بينما تكون الإلكترونات هي حاملات الشحنة الأقلية كما هو موضح في الشكل (1-20) ويكون اغلب التيار ناتج عن الفجوات ولذلك تسمى مادة شبه الموصل المشوبة بذرات قابلة بشبه موصل من النوع الموجب.



شكل (1-20) مخطط لحاملات الشحنة الأكثرية والأقلية لشبه موصل من النوع السالب  
 أن بلورة شبه الموصل الموجب تكون أيضا متعادلة كهربائية. وعند اقتناص الذرة القابلة الاحد  
 الالكترونات التكافؤ المحيطة بها تتحول إلى أيون سالب ولا تساهم في عملية التوصيل  
 وينشئ في مكان الكترون التكافؤ المقتنص فجوة جديدة والتي بدورها تحاول اقتناص الكترون  
 تكافؤي آخر وهكذا ينشئ تيار الفجوات.

ان مستوى فيرمي في شبه الموصل من النوع p ينزاح مقتربا من حزمة التكافؤ وكلما زادت  
 نسبة التشويب يزداد اقتراب مستوى فيرمي من مستوى حزمة التكافؤ كما هو موضح بالشكل  
 (1-21).



شكل (1-21) مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع الموجب

أن إضافة الشوائب (خماسية أو ثلاثية التكافؤ) إلى مادة شبه الموصل النقي تؤدي إلى وجود  
 حاملات شحنة أكثرية وأخرى أقلية، وبالإضافة إلى ذلك فإن إضافة الشوائب تؤدي إلى انخفاض  
 نسبة حاملات الشحنة الأقلية الناتجة من عمليات توليد الكترون فجوة ، وهذا بدوره يؤدي إلى  
 زيادة نسبة حاملات الشحنة الأكثرية الناتجة من التشويب وعملية توليد أزواج الكترون-فجوة  
 الحرارية)، ولإيضاح ذلك نفرض أن عدد حاملات الشحنة المتولدة حرارية في مادة شبه  
 الموصل النقي قبل التشويب هي  $n_i$  و  $p_i$  ولنفرض أن معدل انتاج أزواج الكترون فجوة في  
 شبه الموصل النقي هي  $(g)$  ، في حالة الاتزان الحراري يكون عدد حالات الشحنة متساوية لكل  
 من الإلكترونات الحرة والفجوات المتولدة أي أن:

$$n = p \quad \dots\dots\dots (22)$$

أن معدل حدوث عمليات إعادة الالتحام يتناسب خطيا مع عدد الإلكترونات الحرة والفجوات  
 المتواجدة وفي حالة شبه الموصل النقي وعند الاتزان الحراري يكون معدل عمليات إعادة  
 الالتحام تكون مساوية لمعدل عمليات توليد أزواج الكترون- فجوة ، عندها يمكن التعبير عن  
 معدل عمليات إعادة الالتحام بالصيغة:

$$g = Rn p \quad \dots\dots\dots (23)$$

حيث R ثابت يسمى معامل إعادة الالتحام.

أن إضافة الشوائب لا يؤثر على معدلات توليد أزواج أو إعادة الالتحام، فإذا كان (n) و (p) هو عدد الإلكترونات الحرة والفجوات لوحدة الحجم على الترتيب بعد التشويب، عندها يمكن التعبير عن معدل عملية إعادة الالتحام بعد عملية التشويب بالصيغة:

$$g = Rnp \dots \dots \dots (24)$$

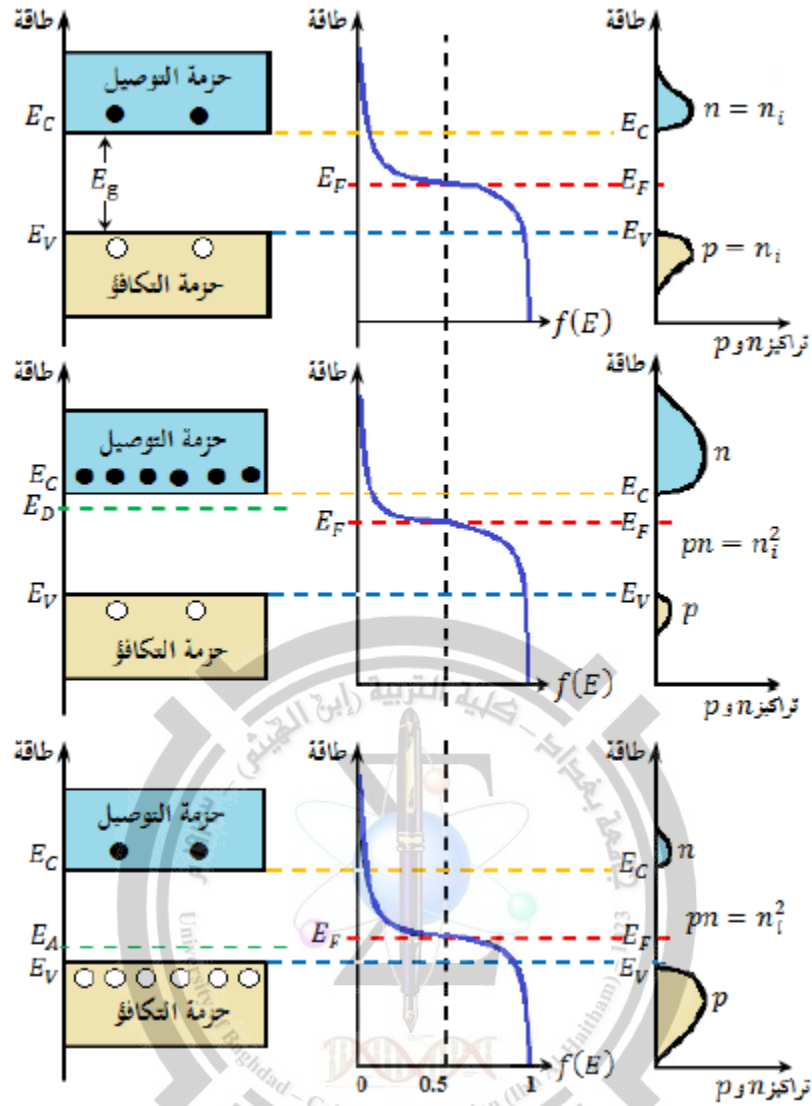
من العلاقات (22) و (23) و (24) نستنتج العلاقة التالية:

$$np = np = n^2 = p^2 \dots \dots \dots (25)$$

من العلاقة الأخيرة نلاحظ أن عملية التشويب تضيف من جهة حاملات شحنة أكثرية وهي بنفس الوقت تقلل من حاملات الشحنة الأقلية الناتجة من عمليات تكون الأزواج.

الشكل (1-22) يقدم مقارنة بين: مخطط حزم الطاقة، توزيع فيرمي ديراك المعرفة بالعلاقة (8)، وتركيز حاملات الشحنة في كل من شبه الموصل النقي وشبه الموصل من النوع السالب وشبه الموصل من النوع الموجب عند الاتزان الحراري.

عندما ترتفع درجة حرارة شبه الموصل الشائب الموجب أو السالب كثيرة عن درجة حرارة الغرفة فإن الإلكترونات والفجوات المتولدة من عمليات توليد زوج الكترون - فجوة) ستكون هي المهيمنة على الإلكترونات والفجوات الناتجة من عملية التطعيم (التشويب) وتصبح للمادة شبه الموصل المشوبة نفس الخصائص المادة شبه الموصل النقي مما يجعل مادة شبه الموصل المشوبة (الموجبة أو السالبة) تفقد خصائصها المميزة لها فلا تستطيع أن تقوم بأداء عملها بالصورة الصحيحة وبالتالي يجب تجنب النبائط المصنوعة من أشباه الموصلات المشوبة من الحرارة العالية.



شكل (1-22) حزم الطاقة، دالة التوزيع، وتركيز حاملات الشحنة لشبه الموصل: النقي، السالب، والموجب

## أسئلة الفصل الأول

- س1: عرف كل من: شبه الموصل النقي، شبه الموصل المشوب، شبه موصل موجب، شبه موصل سالب، إعادة الالتحام، زمن البقاء، التطعيم، طاقة فيرمي.
- س2: قارن بين كل من:  
أ-المواد الموصلة، المواد العازلة، المواد شبه الموصلة.  
ب-شبه الموصل من النوع الموجب وشبه الموصل من النوع السالب.
- س3: اثبت رياضياً ان طاقة فيرمي هي اعلى طاقة يمكن ان يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.
- س4: اذا علمت قيمة دالة الشغل للباريوم هي  $(2.5eV)$ ، فهل بالإمكان استعمال تلك المادة لعمل كاثود لخلية كهروضوئية تعمل بالضوء البنفسجي طول موجته  $(4300\text{Å})$ ؟
- س5: أوجد دالة الشغل لمادة مسخن يعمل عند درجة حرارة  $(2000)$  ويبعث تيار كثافته  $(0.11\text{Amp}/\text{cm}^2)$ ، علماً بان  $(A = 60.2 \times 10^4 \text{Amp} \cdot \text{K}^2/\text{m}^2)$ .
- س6: ملف تسخين من التنكستن يعمل بدرجة حرارة  $(2400^\circ\text{C})$ ، فاذا خفضت درجة الحرارة بمقدار  $(100^\circ\text{C})$  أوجد نسبة الانخفاض في الانبعاث الإلكتروني  $(\Phi = 4.517eV)$ .
- س7: مسخن من التنكستن على شكل ملف اسطواني طوله  $(4.5\text{cm})$  وقطره  $(0.02\text{cm})$  ويعمل عند درجة حرارة  $(2400\text{K})$ ، أوجد التيار الحراري المنبعث علماً بان:  
 $(A = 60.2 \times 10^4 \text{Amp} \cdot \text{K}^2/\text{m}^2)$  و  $(\Phi = 4.517eV)$ .
- س8: أوجد قيمة فجوة الطاقة لكل من السليكون والجرمانيوم عند درجة الحرارة  $(35^\circ\text{C})$ .
- س9: أوجد توصيلية شريحة من مادة الجرمانيوم في درجة حرارة الغرفة  $(300\text{K})$ ، علماً بان حركية الإلكترونات والفجوات هي  $(\mu_e = 0.36 \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$ ،  $(\mu_h = 0.17 \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$  وان تركيز حاملات الشحنة  $(n_i = 1.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3})$ .
- س10: اذا علمت ان المقاومة النوعية (مقلوب التوصيلية) للجرمانيوم النقي عند  $(27^\circ\text{C})$  هي  $(0.47\Omega \cdot \text{m})$  وكانت حركية الإلكترونات الحرة  $(\mu_e = 0.36 \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$  و حركية الفجوات  $(\mu_h = 0.17 \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$  أوجد كثافة حاملات الشحنة.

# الفصل الرابع

## ثنائي زنر وتطبيقاته

### (Zener Diode and its Applications)



- 1.4 تركيب ثنائي زنر
- 2.4 خصائص ثنائي زنر
- 3.4 الدائرة المكافئة لثنائي زنر
- 4.4 المعامل الحراري لثنائي زنر
- 5.4 هبوط القدرة لثنائي زنر بسبب ارتفاع درجة الحرارة
- 6.4 تطبيقات ثنائي زنر





ذكرنا سابقاً انه يجب تجنب عمل الثنائي العادي (ثنائي التقويم) في منطقة الانهيار (الانكسار) التهديمي، الا ان هناك نوع خاص من الثنائيات يُصمم للعمل ضمن منطقة الانهيار وهو ثنائي زنر (Zener Diode)، ويستعمل ثنائي زنر بكثرة في الدوائر الإلكترونية بحيث يأتي بالمرتبة الثانية بعد ثنائي التقويم. سيخصص هذا الفصل لدراسة تركيب وخصائص ثنائي زنر وتطبيقاته.

الشكل (1-4) يمثل صورة لثنائي زنر العملي ويوضح أبعاده الحقيقية وصورة مكبرة له للتعريف بقطبي ثنائي زنر ونموذج من دائرة الكترونية مطبوعة استعمل فيها ثنائي زنر.



شكل (1-4) صورة لثنائي زنر العملي

#### 1.4 تركيب ثنائي زنر

عادة ما يستعمل السليكون في صناعة ثنائي زنر، ويشابه تركيب ثنائي زنر تركيب الثنائي العادي، فهو عبارة عن وصلة شبه موصل (موجب-سالب) غير ان الاختلاف يكون في نسبة التشويب حيث يكون نسبة التشويب في ثنائي زنر اكبر من نسبة تشويب الثنائي العادي.

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

في حالة ثنائي زنر هناك نوعان من الانهيار وهما الانهيار التهديمي وانهيار زنر، وفيما يلي شرح مختصر لكل نوع:

## أ. انهيار تهمدي (Avalanche Breakdown)

سبق وان تناولنا في الفصل الثاني ظاهرة الانهيار التهمدي الذي يظهر في الثنائي العادي في حالة الانحياز العكسي، حيث تعمل فولتية التحيز العكسية على تعجيل حاملات الشحنة الأقلية في منطقة الاستنزاف ومتى ما كانت الفولتية العكسية المسلطة عالية بما يكفي فان حاملات الشحنة الأقلية المتحركة ستمكن من تحرير الكترونات تكافؤية والإلكترونات المتحررة تتعجل بدورها لتحرر المزيد من الإلكترونات التكافؤية وبالنتيجة نحصل على عدد كبير من الإلكترونات المتحركة (تيار) وتسمى تلك الظاهرة بالانهيار التهمدي، في حالة ثنائي الزنير فان نفس الظاهرة (الانهيار التهمدي) تحدث ولكن بفولتيات انهيار اقل نسبياً حيث تحدث ظاهرة الانهيار التهمدي لفولتيات اكبر تقريباً من (6V) ، في حالة الثنائي الاعتيادي فان الانهيار يحدث عادة لفولتيات اعلى من (50V) أو اكثر وهذا عائد لاختلاف نسبة التشويب بين الثنائي العادي وثنائي زنير.

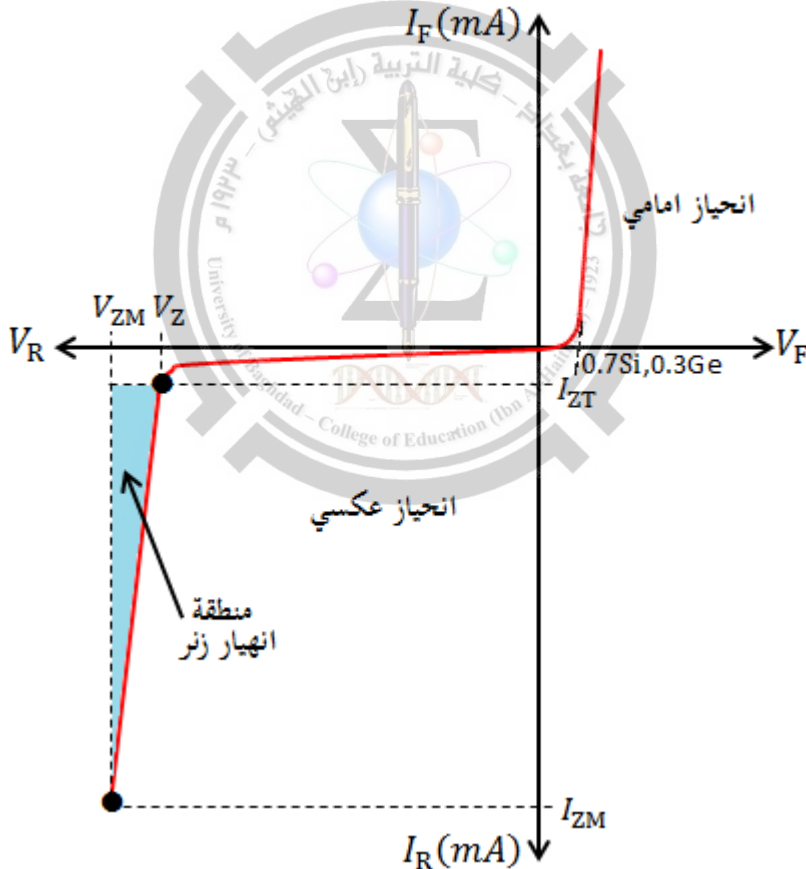
## ب. انهيار زنير (Zener Breakdown)

يحدث هذا النوع من الانهيار عندما يشوب ثنائي ما بغزارة (كما هو الحال في ثنائي زنير)، حيث تكون طبقة الاستنزاف ضيقة جداً وبالتالي يكون المجال الكهربائي بين طرفي منطقة الاستنزاف عاليا جداً، وعندما تصل شدة المجال إلى حوالي (300000V/cm) فان تلك الشدة تكفي لسحب الكترونات من مدارات التكافؤ فتتكون الكترونات حرة في منطقة الاستنزاف، ان توليد الإلكترونات الحرة بهذه الطريقة تدعى انهيار زنير (كما تسمى كذلك بانبعث المجال العالي High-Field Emission).

ان انهيار زنير هو الذي يسود في فولتيات الانكسار التي تقل عن (4V) بينما تسود ظاهرة الانهيار التهمدي في فولتيات الانكسار التي تزيد عن (6V). في البداية كان الاعتقاد بان ظاهرة انهيار زنير هي الوحيدة الموجودة في انكسار الثنائيات، ولهذا شاع استعمال اسم ثنائي زنير قبل اكتشاف ظاهرة الانهيار التهمدي وبقيت جميع الثنائيات المصنوعة للعمل في منطقة الانكسار تدعى ثنائيات زنير بصرف النظر عن كون الانهيار الذي يحدث فيها من نوع انهيار زنير أو انهيار تهمدي.

## 2.4 خصائص ثنائي زنر

الشكل (2-4) يمثل منحنى الخواص لثنائي زنر. يلاحظ من الشكل ان خواص ثنائي زنر في منطقة الانحياز الأمامي لا يختلف عن منحنى الخواص للثنائي العادي. اما في حالة الانحياز العكسي فنلاحظ ان التيار العكسي يكون صغيراً لحد الإهمال حتى تصبح فولتية التحيز العكسية قريبة من فولتية الانكسار ( $V_Z$ ) فتحدث عندها زيادة ملحوظة في التيار العكسي ويرمز للتيار الذي يبدأ فيه الانهيار بالرمز ( $I_{ZT}$ ). ان الانكسار في ثنائي زنر يكون له انحناء حاد جداً تعقبه زيادة عمودية تقريباً بالتيار ويلاحظ ان الفولتية على طرفي زنر تبقى ثابتة تقريباً وتساوي ( $V_Z$ ) في معظم منطقة الانكسار، علما ان هناك قيمة قصوى للتيار العكسي يمكن ان يتحمله ثنائي زنر دون ان يتسبب بتلفه ويرمز له بالرمز ( $I_{ZM}$ ).



شكل (2-4) منحنى الخواص لثنائي زنر

ان تبديد القدرة (Power dissipation) في ثنائي الزنير الذي يعمل في منطقة الانكسار يساوي حاصل ضرب فولتية انكساره في التيار المار من خلاله، أي ان:

$$P = V I \quad (4 - 1)$$

فمثلاً لو كان ( $V_Z = 12V$ ) و ( $I_Z = 10mA$ ) فان:

$$P = 12 \times 10 \times 10^{-3}$$

$$P = 0.12W$$

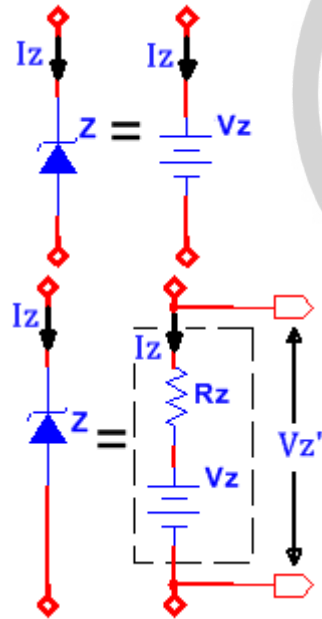
ان لكل ثنائي زنر اقصى قيمة للقدرة المبددة ( $P_{ZMAX}$ ) يمكن ان يتحملة ثنائي دون ان يتلف، وعليه كلما كانت ( $P_Z$ ) اقل من اقصى قدرة فان ثنائي زنر لن يعطب. ان ثنائيات زنر التجارية لها مدى تحمل قدرة يتراوح بين ( $0.25W$ ) إلى اكثر من ( $50W$ ).

غالباً ما تبين استمارة المعلومات مقدار اقصى تيار يتحملة ثنائي زنر دون تجاوز مدى تحمل القدرة، ويرمز لأقصى تيار يمكن ان يتحملة ثنائي زنر بالرمز  $I_{ZM}$  والعلاقة التي تربط بين اقصى تيار ومدى تحمل القدرة هي:

$$P = \frac{P_{MAX}}{V} \quad (4 - 2)$$

### 3.4 الدائرة المكافئة لثنائي زنر

كنقريب أول (تقريب مثالي) يمكن اعتبار ثنائي زنر العامل في منطقة الانهيار كبطارية ذات فولتية مقدارها فولتية الانهيار  $V_Z$  كما موضح بالشكل المجاور.



للحصول على نتائج اكثر دقة نأخذ بنظر الاعتبار انحدار منطقة الانكسار، لان منطقة الانكسار ليست عمودية تماماً لوجود ممانعة صغيرة لثنائي زنر. الشكل المجاور يوضح التقريب الثاني لثنائي زنر.

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

$$V' = V + I Z \quad (4 - 3)$$

وعادة ما تكون ممانعة زنر صغيرة وتعطى بالعلاقة:

$$Z = \frac{\Delta v}{\Delta i} \quad (4 - 4)$$

## 4.4 المعامل الحراري (Temperature Coefficient) لثنائي زنر

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

$$T = \frac{(\Delta V_Z / V_{Z0})}{\Delta T} \times 100\% \quad (4 - 5)$$

حيث  $(\Delta V_Z)$  هو التغير في فولتية انكسار زنر ويعطى بالعلاقة:

$$\Delta V_Z = V_{Z1} - V_{Z0} \quad (4 - 6)$$

$(\Delta T)$  هو التغير في درجة الحرارة ويعطى بالعلاقة:

$$\Delta T = T_1 - T_0$$

وتمثل  $(T_0)$  درجة الحرارة المعتمدة عند تعيين فولتية انكسار زنر  $(V_{Z0})$  (والتي تكون عادة درجة حرارة الغرفة)، بينما تمثل  $(T_1)$  درجة الحرارة التي تكون فيها فولتية انكسار زنر  $(V_{Z1})$ .

ومن علاقة المعامل الحراري يمكننا التعبير عن التغير في فولتية انكسار زنر بالصيغة:

$$\Delta V_Z = T \times \Delta T \times V_{Z0} \quad (4 - 7)$$

ان المعامل الحراري لثنائي زنر يكون سالب لفولتيات انكسار اقل من  $(4V)$  (انهيار زنر)، بينما يكون المعامل الحراري موجب لفولتيات انكسار اكبر من  $(6V)$  (انهيار تهدمي)، وتتغير إشارة المعامل الحراري من السالب إلى الموجب بين  $(4V)$  إلى  $(6V)$ .

**مثال (1-4):** اذا علمت بان المعامل الحراري لثنائي زنر هو  $(0.004\%/^{\circ}\text{C})$  وجهد انكساره يساوي  $(12V)$  عند درجة حرارة  $(25^{\circ}\text{C})$ ، أوجد التغير في فولتية زنر وفولتية زنر عند ارتفاع درجة الحرارة إلى  $(110^{\circ}\text{C})$  ؟

**الحل:** من معطيات المثال لدينا:

$$T = 0.004\%/^{\circ}\text{C} , V_{Z0} = 12V , T_0 = 25^{\circ}\text{C} , T_1 = 110^{\circ}\text{C}$$

ان التغير في فولتية انكسار زنر يعطى بالعلاقة:

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

بالتعويض نحصل على:

$$\Delta V_Z = \frac{0.004}{100} \times (110 - 25) \times 12$$

$$\Delta V_Z = 0.041V$$

من النتيجة الأخيرة نلاحظ ان التغير في فولتية زنر موجبة، أي انه في هذه الحالة فان فولتية انكسار زنر قد زادت بارتفاع درجة الحرارة ويمكن حساب فولتية انكسار زنر عند درجة (100°C) كما يلي:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_1 - V_{Zo} \\ V_1 - V_{Zo} &= 0.041 \\ V_1 &= 12.041V\end{aligned}$$

أي ان جهد انكسار زنر عند درجة حرارة (100°C) هو (12.041V).

#### 5.4 هبوط القدرة لثنائي زنر بسبب ارتفاع درجة الحرارة

ان اقصى قدرة مبددة في ثنائي زنر تتخفض مع ارتفاع درجة الحرارة، عادة ما يتم تعيين اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة معينة و غالباً ما تكون (50°C)، وعند ارتفاع درجة الحرارة عن (50°C) فان القدرة المبددة تهبط بسبب ارتفاع درجة الحرارة، وتعطى القدرة المبددة عند درجة حرارة معينة بالعلاقة:

$$P_D = P_{D_{MAX}} - (mW/^\circ C) \times (T_2 - T_1) \quad (4 - 8)$$

حيث:  $P_D$  اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة  $T_2$  بوحدات ملي واط (mW).

$P_{D_{MAX}}$  اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة معينة (عادة  $T_1 = 50^\circ C$ ) بوحدات mW.  
(mW/°C) معامل هبوط القدرة.

**مثال (4-2):** اقصى قدرة مبددة لثنائي زنر معين هي (380mW) عند درجة حرارة (50°C)، أوجد اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة (85°C) علماً بان معامل هبوط القدرة لذلك زنر هو (3.3mW/°C).

**الحل:** من معطيات المثال لدينا:

$$P_{D_{MAX}} = 380mW, T_2 = 85^\circ C, T_1 = 50^\circ C, mW/^\circ C = 3.3 mW/^\circ C$$

$$P_D = P_{D_{MAX}} - (mW/^\circ C) \times (T_2 - T_1)$$

$$P_D = 380 - 3.3 \times (85 - 50)$$

$$P_D = 264.5mW$$

نلاحظ ان اقصى قدرة مبددة هبطت من 380mW إلى 264.5mW نتيجة لارتفاع

درجة الحرارة من 50°C إلى 85°C .

## 6.4 تطبيقات ثنائي زنر

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

1- استعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية.

2- استعمال ثنائي زنر في دوائر التحديد (التقليم).

### أولاً: استعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية (Voltage Regulator)

تستعمل دوائر تنظيم الفولتية للحصول على فولتية إخراج مستمرة ثابتة القيمة بصرف النظر عن التغير في فولتية الإدخال أو التغير في قيمة مقاومة الحمل وتعتبر المرحلة الأخيرة من مراحل جهاز القدرة المستمر. ان مقاومة الحمل المربوطة على جهاز القدرة قد تكون مقاومة مفردة أو قد تكون مقاومة مكافئة لعدة دوائر مربوطة على التوازي، وفي الحالتين فان مقاومة الحمل تكون متغيرة، ويمكن ان تتغير من قيمة صغيرة إلى قيمة كبيرة. وتعطى معادلة تنظيم الفولتية (Voltage Regulation) بالصيغة:

$$V = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (4 - 9)$$

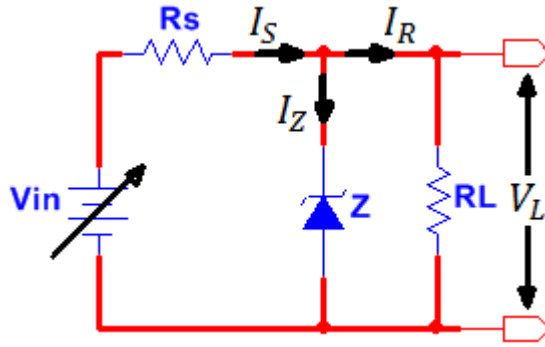
حيث:  $V_R$  النسبة المئوية لتنظيم الفولتية.

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

$V_{FL}$  فولتية الإخراج المستمرة عند حمل كامل ( $R_{LMIN}$ ).

في جهاز 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 جهاز القدرة افضل. و يعتبر استعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية من اهم تطبيقات ثنائي زنر، ان الميزة الأساسية التي تجعل من ثنائي زنر العنصر الأساسي في دوائر تنظيم الفولتية هي الثبوت النسبي للفولتية على طرفيه عندما يكون عاملاً في منطقة الانهيار.

الشكل (3-4) يمثل ابسط أنواع دوائر تنظيم الفولتية والذي يسمى منظم زنر ( Zener Regulator)، حيث يربط الحمل على التوازي على طرفي ثنائي زنر، اما مقاومة التحديد ( $R_S$ ) فوظيفتها تحديد التيار المار بثنائي زنر لكي لا يتجاوز الحد الأقصى المسموح به لثنائي زنر ( $I_{ZMAX}$ ).



شكل (3-4) دائرة منظم زنر

كتقريب أولي يمكن اعتبار ثنائي زنر العامل في منطقة الانهيار كبطارية جهدها ( $V_Z$ )، وحيث ان الحمل مربوط على التوازي مع الزنير وبالتالي فان الجهد على الحمل سيكون ثابتاً كذلك. في الدائرة السابقة يمكننا إيجاد العلاقة الخاصة بالتيار المار في المقاومة ( $R_S$ ) بالاستعانة بقانون كيرشوف الثاني (المجموع الجبري لفروق الجهد حول أي دائرة كهربائية مغلقة يساوي صفر):

$$I_S = \frac{V_{in} - V_L}{R_S} \quad (4 - 10)$$

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

$$I_Z = I_S - I_L \quad (4 - 11)$$

بإهمال ممانعة زنر الصغيرة يكون:

$$V_L = V_Z \quad (4 - 12)$$

وبالاستفادة من قانون أوم يمكننا التعبير عن تيار الحمل بالصيغة:

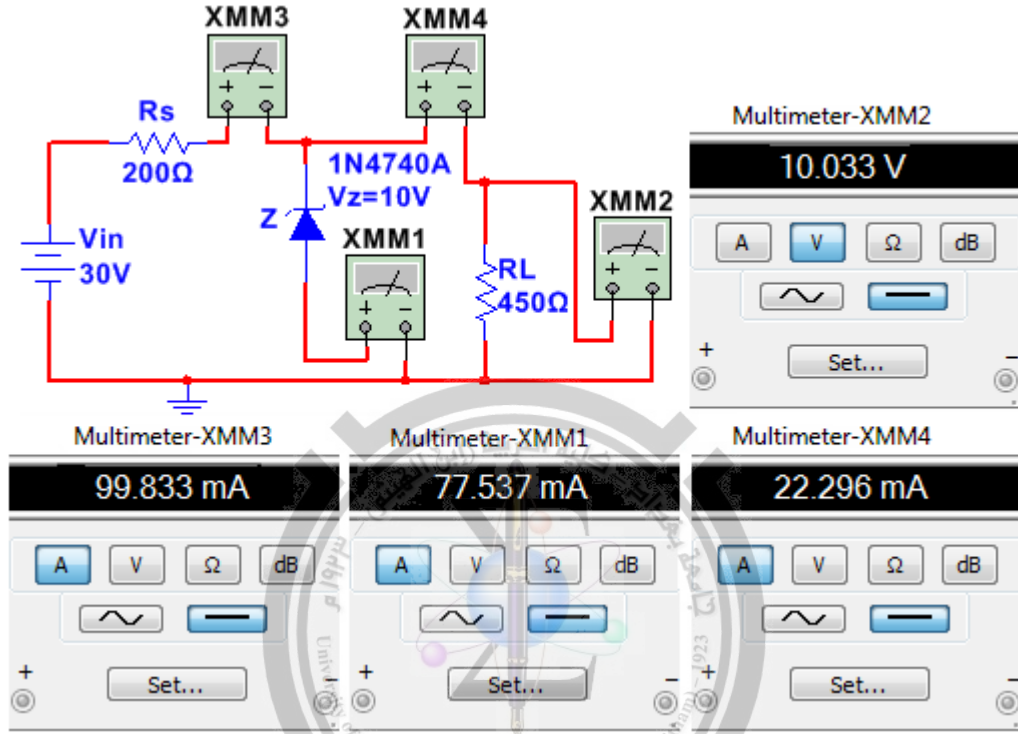
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (4 - 13)$$

ان المعادلات الأربعة الأخيرة تكون كافية للتحليل الأولي 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 بالصيغة:

$$V_L = V_Z + I_Z R_Z \quad (4 - 14)$$



**مثال (4-3):** الشكل التالي يوضح نتيجة برنامج المحاكاة (Multisim-14) لعمل دائرة منظم زنر، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة ( $R_S$ )، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكاة.



**الحل:**

$$V_L = V_Z$$

$$V_L = 10V$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

$$I_L = \frac{10}{450} = 0.02222A = 22.22mA$$

$$I_s = \frac{V_{in} - V_Z}{R_s}$$

$$I_s = \frac{30 - 10}{200} = 0.1A = 100mA$$

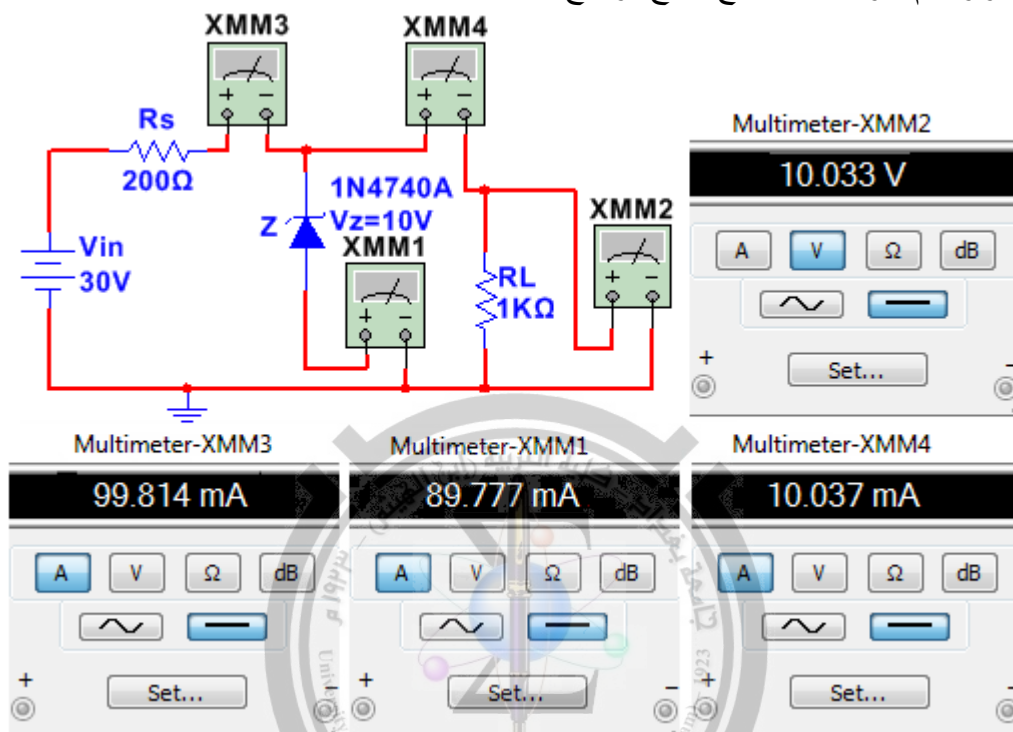
$$I_Z = I_s - I_L$$

$$I_Z = 100 - 22.22 = 77.78mA$$

يلاحظ ان نتائج الحسابات قريبة من نتائج المحاكاة، والاختلاف البسيط بينهما بسبب

اننا في حساباتنا لم نأخذ بنظر الاعتبار مقاومة ثنائي زنر.

**مثال (4-4):** تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكاة في المثال السابق بعد تغيير قيمة مقاومة الحمل إلى  $(1000\Omega)$ ، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل ، تيار المقاومة  $(R_S)$  ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكاة.



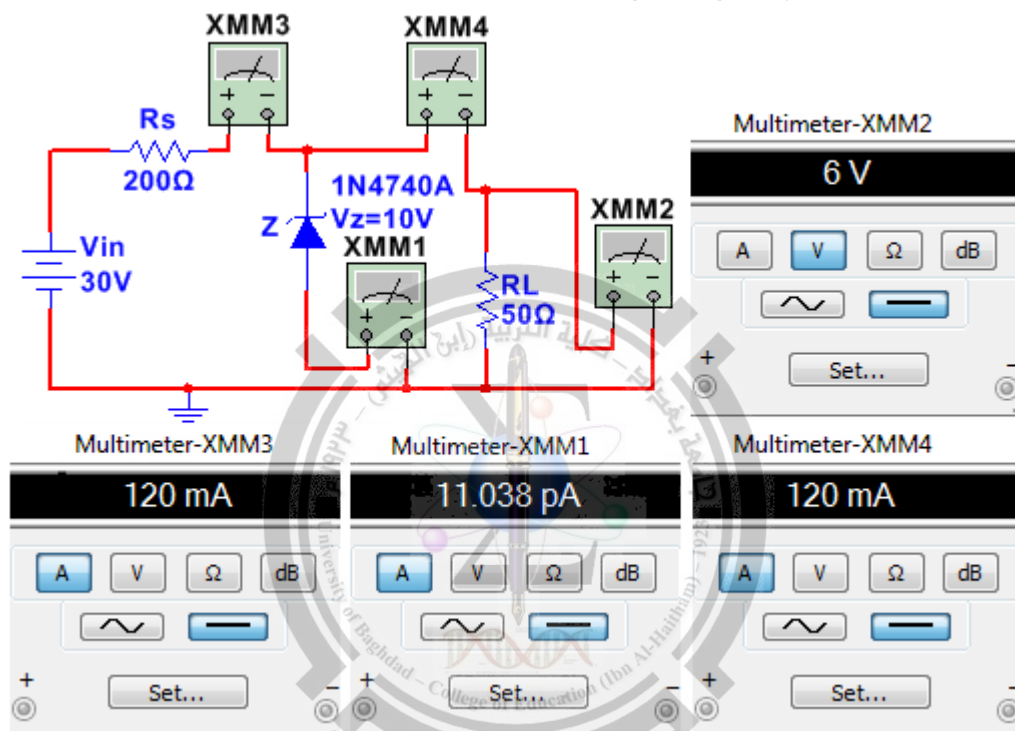
**الحل:**

$$\begin{aligned}
 V_L &= V_Z \\
 V_L &= 10V \\
 I_L &= \frac{V_L}{R_L} \\
 I_L &= \frac{10}{1000} = 0.01A = 10mA \\
 I_s &= \frac{V_{in} - V_Z}{R_s} \\
 I_s &= \frac{30 - 10}{200} = 0.1A = 100mA \\
 I_Z &= I_s - I_L \\
 I_Z &= 100 - 10 = 90mA
 \end{aligned}$$

يلاحظ ان نتائج الحسابات قريبة من نتائج المحاكاة، والاختلاف البسيط بينهما بسبب إهمال تأثير مقاومة ثنائي زنر.

لتوضيح حدود عمل ثنائي زنر في دوائر التنظيم، نورد المثالين التاليين لنفس الدائرة في المثالين السابقين تفشل فيها الدائرة في تنظيم الفولتية.

**مثال (4-5):** تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكاة في المثال السابق بعد تغيير قيمة مقاومة الحمل إلى  $(50\Omega)$ ، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل، تيار الحمل، تيار المقاومة  $(R_S)$ ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكاة.



**الحل:** في هذه الحالة لا يقوم ثنائي زنر بعملية التنظيم لان الجهد العكسي المسلط على طرفيه اقل من جهد الانهيار لثنائي زنر، وبالتالي لا يكون للثنائي أي تأثير على عمل الدائرة (يعتبر دائرة مفتوحة)، ويمكن إيجاد قيم التيار والفولتية بالاعتماد على قانون أوم وكما يلي:  
لإيجاد فرق الجهد على طرفي الحمل نجد أولاً تيار الدائرة:

$$I = \frac{V_{in}}{R_s + R_L}$$

$$I = \frac{30}{200 + 50} = 0.12A = 120mA$$

$$V_L = I_L \times R_L$$

$$V_L = 0.12 \times 50 = 6V$$

$$I_L = I = 120mA$$

$$I_S = I_L = I = 120mA$$

$$I_Z = 0 \quad (\text{لان الثنائي لا يعمل في منطقة الانهيار})$$

بالمقارنة مع نتائج المحاكاة نجد ان النتائج التي حصلنا عليها مطابقة لنتائج المحاكاة باستثناء ان البرنامج حسب قيمة صغيرة جداً لتيار زنر ( $11pA = 11 \times 10^{-12}A$ ) والتي تمثل قيمة تيار التشبع العكسي للثنائي وهي قيمة صغيرة جداً يمكن إهمال تأثيرها في مثل هذه الدوائر.

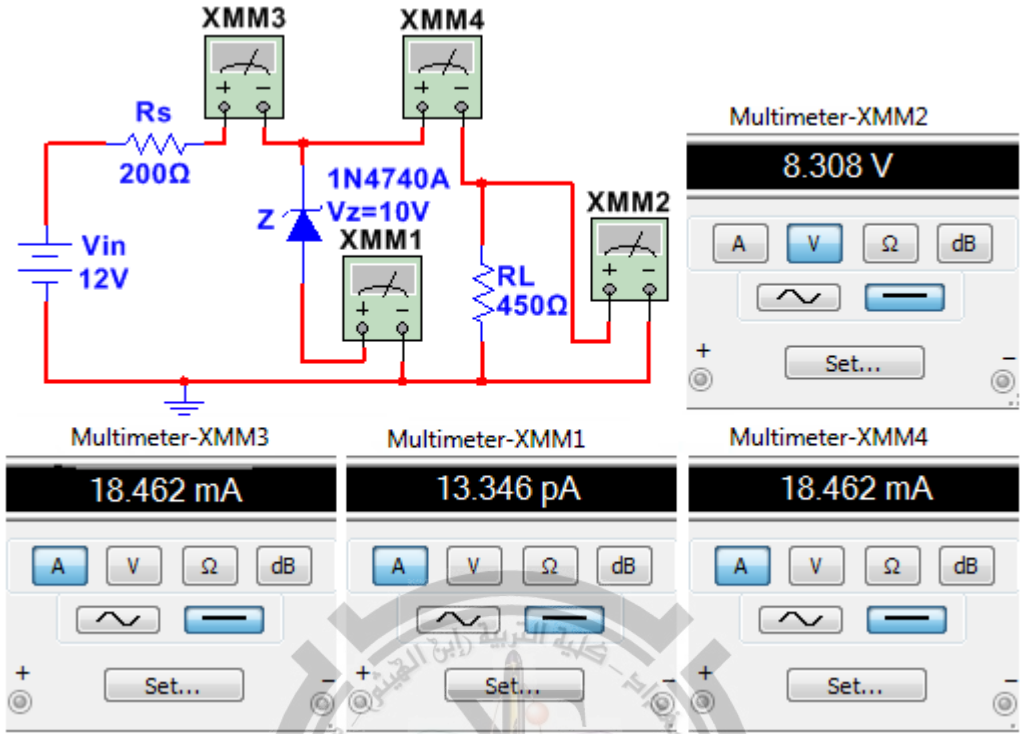
نستنتج من ذلك فان هناك حدود دنيا وعليا لمقاومة الحمل التي يمكن ان تقوم دائرة منظم زنر معينة بالعمل على تنظيم الجهد لذلك الحمل، فانخفاض الحمل عن قيمة معينة يجعل ثنائي زنر عاملاً خارج منطقة الانهيار، حيث ان انخفاض قيمة مقاومة الحمل تقلل من قيمة تيار زنر ومتى ما قل تيار زنر عن تيار بدأ الانهيار ( $I_{ZT}$ ) يصبح الثنائي خارج منقطة الانهيار ويتوقف عن التنظيم ويكون بمثابة دائرة مفتوحة، وبالمقابل فان ارتفاع قيمة مقاومة الحمل يقلل من تيار الحمل (وذلك لبقاء فرق الجهد على طرفيه ثابتة مع تغير قيمة مقاومة الحمل) وحيث ان تيار زنر معرف بالعلاقة ( $I_Z = I_S - I_L$ ) لذا فان انخفاض تيار الحمل (نتيجة لتغير قيمة مقاومته) يرافقه زيادة في تيار زنر، وهناك حد يمكن لتيار زنر لا يمكن تجاوزه ( $I_{ZMAX}$ ) وذلك لتجنب تلف ثنائي زنر.

بالمقابل فان هناك حدود دنيا وعليا لفولتية المصدر التي يمكن لثنائي زنر ان يقوم فيها بعملية التنظيم، فهي من جهة يجب ان لا تقل عن قيمة معينة لضمان عمل ثنائي زنر في منطقة الانهيار، والمثال التالي يوضح ذلك:

**مثال (4-6):** تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكاة في المثال السابق بعد إرجاع مقاومة الحمل إلى قيمتها الأولى ( $450\Omega$ )، وتقليل جهد المصدر إلى ( $12V$ ) أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل، تيار الحمل، تيار المقاومة ( $R_S$ )، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكاة.

**الحل:** ان قيمة جهد المصدر صغيرة مما يجعل ثنائي زنر عاملاً خارج منطقة الانهيار ويتصرف كدائرة مفتوحة، عندها يمكن حساب التيارات والجهد بالاعتماد على قانون عندها:

$$I = \frac{V_{in}}{R_S + R_L}$$



$$I = 12 / (200 + 450) = 0.01846A = 18.46mA$$

$$V_L = I_L \times R_L$$

$$V_L = 0.01846 \times 450 = 8.308V$$

$$I_L = I = 18.46mA$$

$$I_s = I_L = I = 18.46mA$$

$$I_Z = 0 \quad (\text{لان الثنائي لا يعمل في منطقة الانهيار})$$

وبلاحظ ان هناك تطابق بين نتائج المحاكاة ونتائج الحسابات. وبالمقابل فان هناك حدود

عُليا للجهد الذي يمكن ان ينظمه دائرة منظم زنر، فزيادة الجهد ترافقها زيادة في تيار زنر

العامل في منطقة الانهيار ومتى ما اصبح التيار المار في ثنائي اكبر من القيمة العظمى

( $I_{ZMAX}$ ) لتيار زنر المسموح به فان ثنائي الزنر يتلف.

**ثانياً: استعمال منظم زنر بدائرة متكاملة**

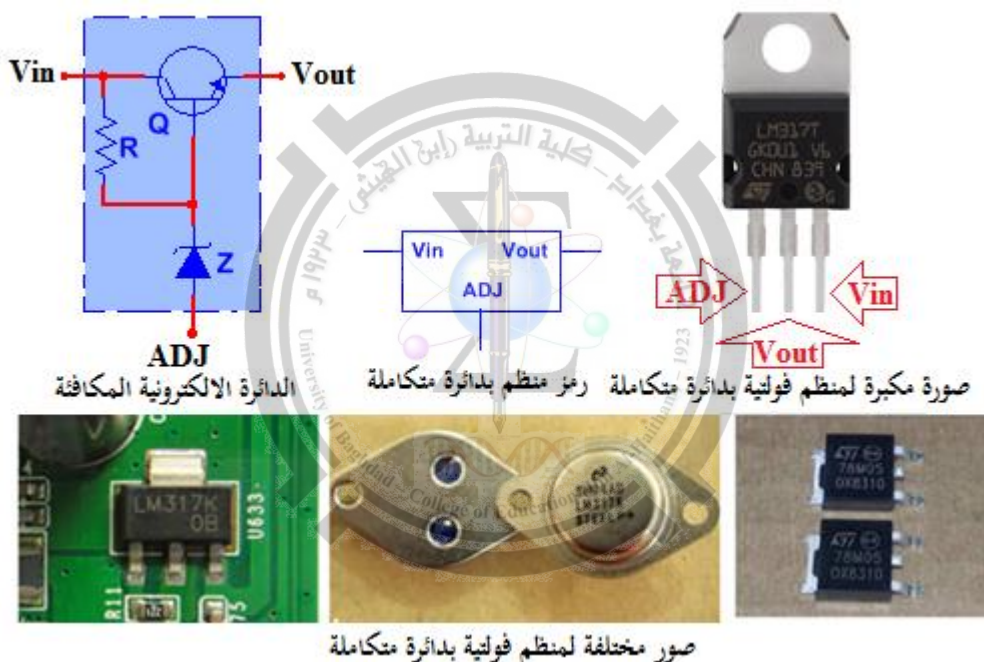
الشكل (4-4) يوضح استعمال ثنائي زنر وترانزستور في دائرة تنظيم الفولتية، والذي

يتميز عن منظم الفولتية الذي يستعمل ثنائي زينر لوحده في ان التغيير بالتيار يقل بنسبة

كبيرة، وبالتالي فان تأثير ممانعة الزينر يقل بمقدار كبير وتصبح دائرة المنظم اكثر استقراراً

وذا ت قدرة إخراج عالية بالمقارنة مع منظم زنر. هناك منظمات فولتية تستعمل أكثر من ترانزستور في دوائر أكثر تعقيداً وبإمكانات أفضل.

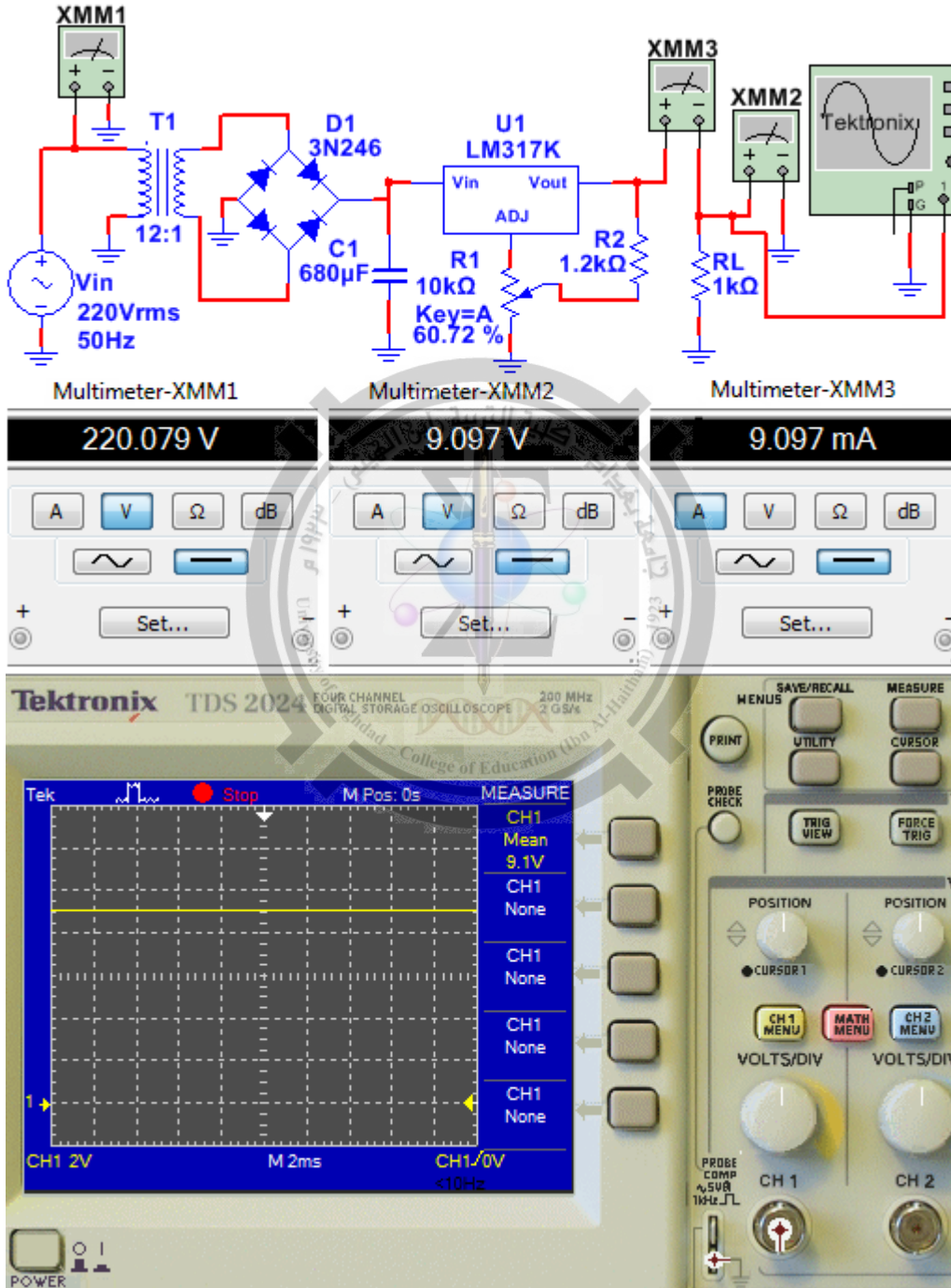
عادة ما تُصنع ثنائيات الزينر والترانزستورات المكونة لمنظم الفولتية على شريحة واحدة على شكل دائرة متكاملة (Integrated Circuit) IC تحتوي على ثلاثة أطراف حيث يكون الإدخال إلى منظم الفولتية هو الفولتية من مجهز القدرة غير المنظم (مقوم موجة كاملة ومرشح) أما الإخراج فيذهب إلى مقاومة الحمل، ان منظم الفولتية الذي يكون بشكل دائرة متكاملة تمتاز بسهولة الاستعمال و الاعتمادية العالية وتنظيم أفضل من منظم زنر أو منظمات زنر والترانزستور.



شكل (4-4) منظم فولتية زنر بدائرة متكاملة

لتوضيح المزايا التي يتميز بها منظم الفولتية باستعمال الدوائر المتكاملة تمت محاكاة عمل الدائرة باستعمال برنامج (Multism-14) الموضحة في الشكل (4-5)، تقوم الدائرة بتوفير فولتية مستمرة يمكن التحكم بقيمتها ضمن المدى  $[(1.8 - 12.2)V_{dc}]$  بالاعتماد على تغذية من الشبكة الوطنية، لهذه الدائرة اعتمادية عالية فهي توفر فولتية مستمرة ثابتة بصرف النظر عن تغير جهد الإدخال أو تغير قيمة الحمل المربوط، تتكون الدائرة من محولة خافضة ودائرة مقوم قنطرة ومرشح متسعة بالإضافة إلى المتكاملة (LM317K)، تقوم المحولة

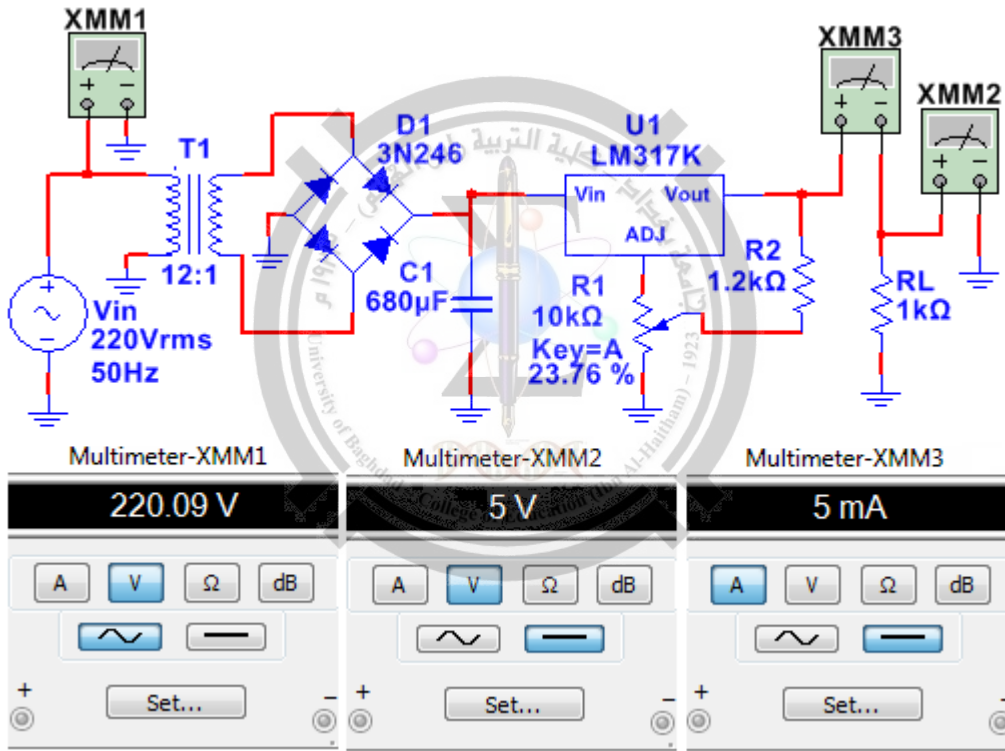
والمقوم والمرشح بتوفير فولتية مستمرة غير منظمة، وتقوم المتكاملة بعملية التنظيم، ويمكن التحكم بالقيمة التي تثبت فيها فولتية الإخراج من خلال التحكم بقيمة المقاومة المتغيرة، وقد قمنا بضبط المقاومة المتغيرة لتجعل فولتية المجهز عند قيمة (9V).



شكل (4-5) محاكاة لعمل دائرة منظم فولتية باستعمال الدائرة المتكاملة LM317K

يلاحظ من رسمة الاوسليسكوب ان فولتية الإخراج مستمرة وخالية من أي تموج وقيمتها (6V)، كما الفولتميتر (XMM1) يسجل فولتية الإدخال متناوبة قيمتها (220Vrms)، بينما يسجل الفولتميتر (XMM2) المربوط على طرفي الحمل فولتية مستمرة (9V) بينما سجل الاميتر (XMM3) تيار الحمل مقداره (9mA).

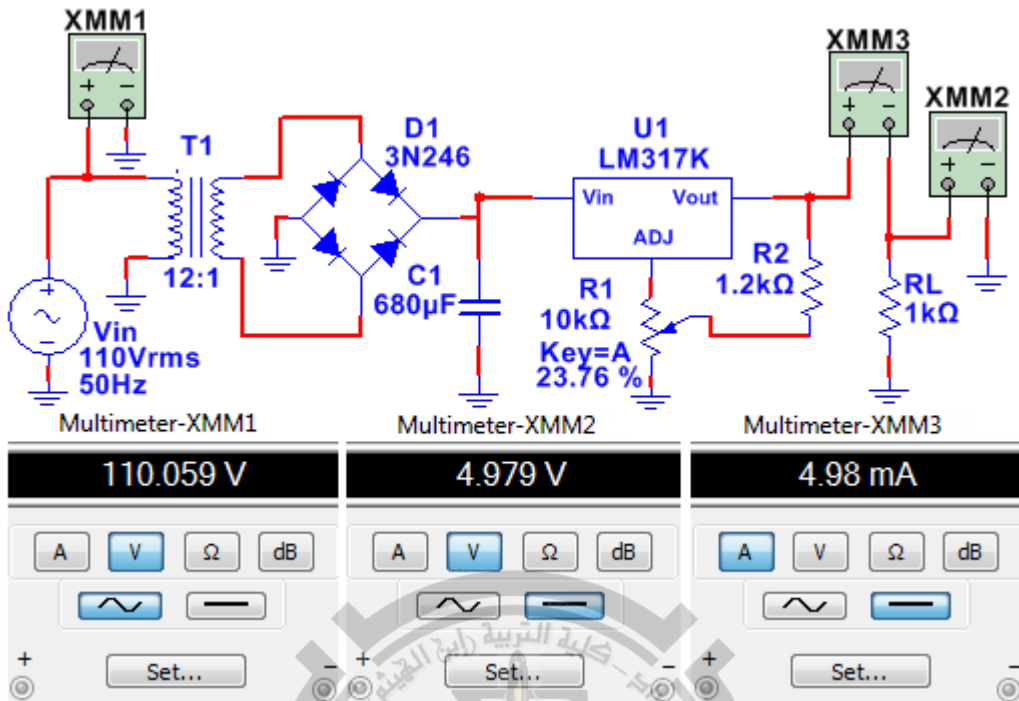
يمكن الاستفادة من دائرة السابقة في عمل جهاز شاحن لواحدة من التطبيقات الإلكترونية الشائعة في وقتنا الحالي هي أجهزة الموبايل والتي تعتمد في تغذيتها على بطارية قابلة للشحن (غالباً ما تكون فولتيها 5V)، ويتم شحنها من كهرباء الشبكة الوطنية بأجهزة شاحن، قمنا بضبط المقاومة المتغير لجعل فولتية الإخراج للدائرة (5V) كما موضح بالشكل (4-6).



شكل (4-6) محاكاة لجهاز شاحن الموبايل باستعمال منظم زنر بدائرة متكاملة

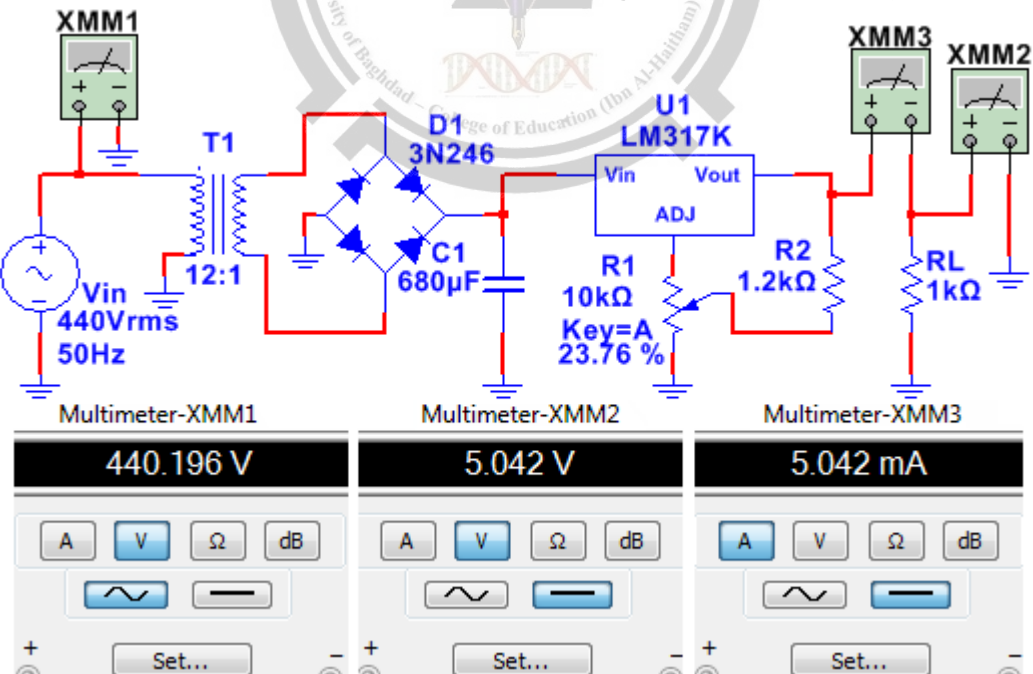
لاختبار استقرارية عمل الدائرة سنقوم بتنفيذ برنامج المحاكاة لظروف عملية تتضمن تغير كبير في فولتية التجهيز وكذلك تغير مقاومة الحمل المستعمل، لنبحث أولاً استقرار عمل الدائرة في حالة تغير فولتية التجهيز من الشبكة الوطنية، لنفرض ان فولتية التجهيز قد انخفضت إلى نصف قيمها الاعتيادية ( $V_{in} = 110V_{rms}$ ) الشكل (4-7) يوضح نتيجة المحاكاة. نلاحظ من نتيجة المحاكاة ان فولتية الحمل وتيار الحمل ثابتة تقريبا عند قيمتها الأولية.





شكل (4-7) محاكاة لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة انخفاض جهد التجهيز

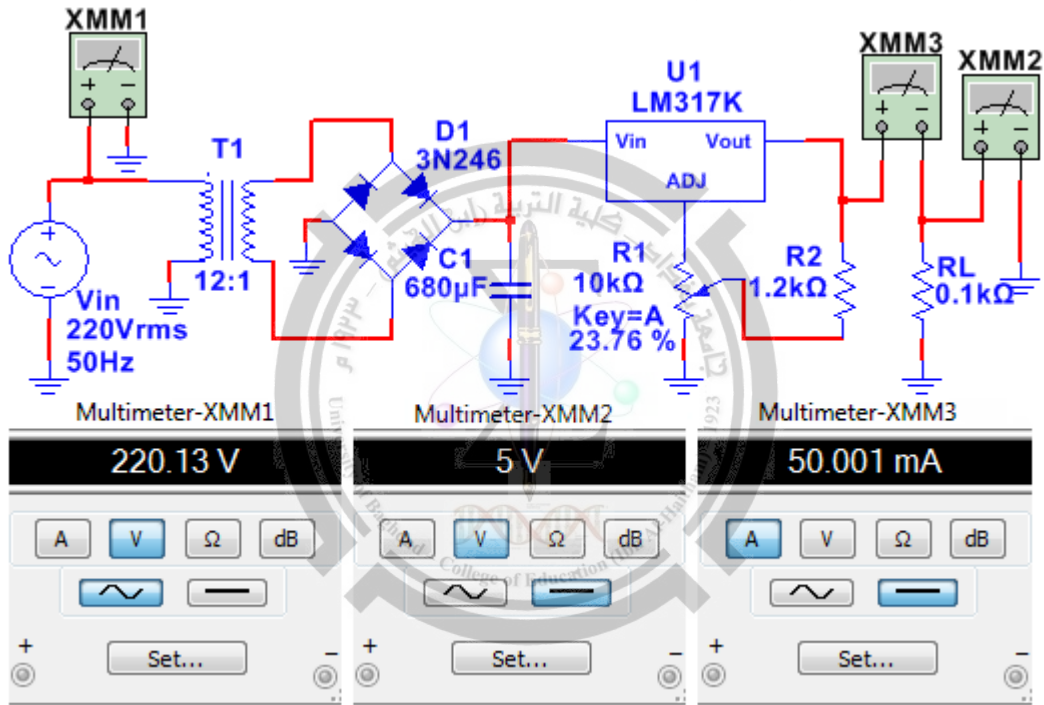
لنفرض ان فولتية التجهيز الوطنية قد ارتفعت إلى ضعف قيمتها الاعتيادية (440Vrms)، الشكل (4-8) يوضح نتيجة المحاكاة.



شكل (4-8) محاكاة لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة ارتفاع جهد التجهيز

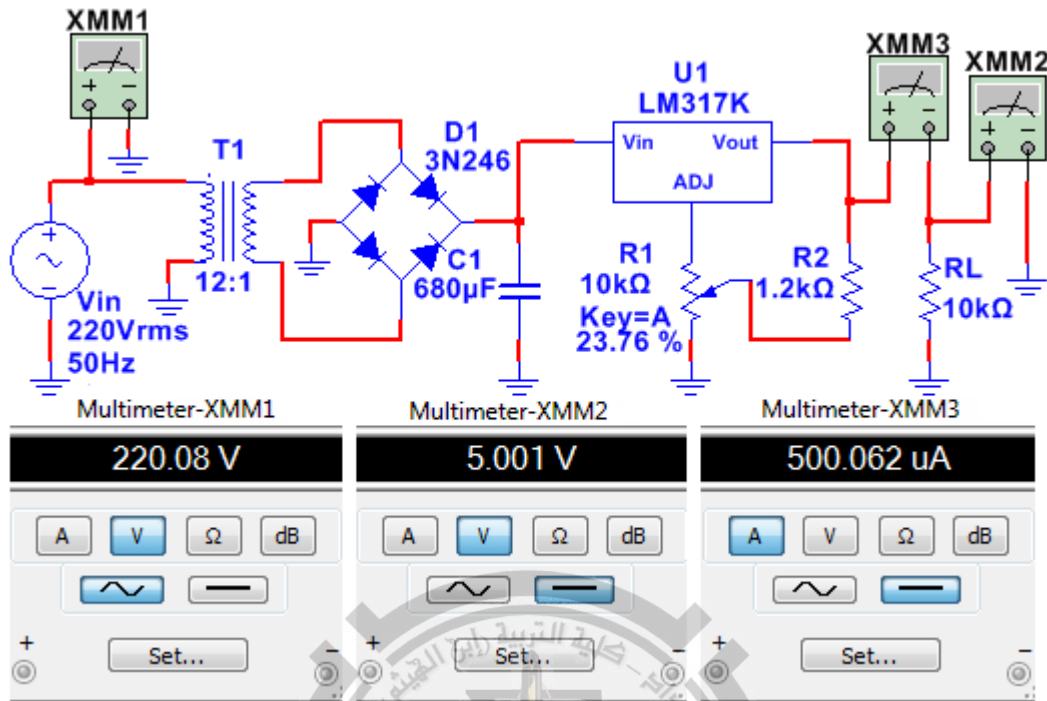
يلاحظ من الشكل السابق ان زيادة فولتية التجهيز لم تؤثر على جهد الإخراج المستمر للدائرة. لمناقشة تأثير تغير قيمة الحمل المربوط نثبت فولتية التجهيز عند قيمتها الاعتيادية (220Vrms)، ونقوم بتغير قيمة مقاومة الحمل، الشكل (4-9) يوضح نتيجة المحاكاة في حالة انخفاض قيمة مقاومة الحمل إلى عُشر قيمتها الأولية (0.1kΩ).

يلاحظ من الشكل ان انخفاض قيمة مقاومة الحمل لم يؤثر على قيمة فولتية الإخراج المستمرة للدائرة، الشكل (4-10) يوضح نتيجة المحاكاة في حالة ارتفاع قيمة إلى عشرة أضعاف قيمتها الأولى (10kΩ).



شكل (4-9) محاكاة لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة انخفاض مقاومة الحمل

يلاحظ من (4-10) ان ارتفاع قيمة الحمل لم تؤثر على قيمة فولتية الإخراج. نستنتج مما سبق ان لدائرة منظم زنر بدائرة متكاملة استقرارية عمل جديدة اذ انها تجهز فولتية إخراج مستمرة ذات قيمة ثابتة لمدى كبير من تغير الجهد المجهز أو تغير قيمة مقاومة الحمل.

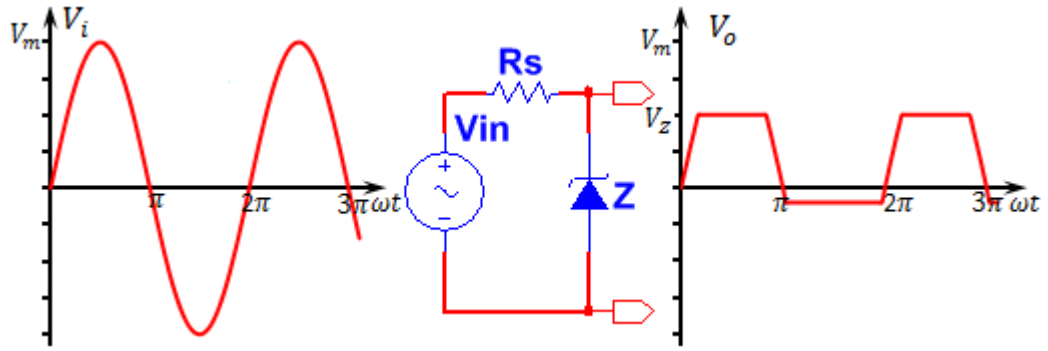


شكل (10-4) محاكاة لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة ارتفاع قيمة مقاومة الحمل

### ثالثاً: استعمال ثنائي زنر في دوائر تحديد الفولتية

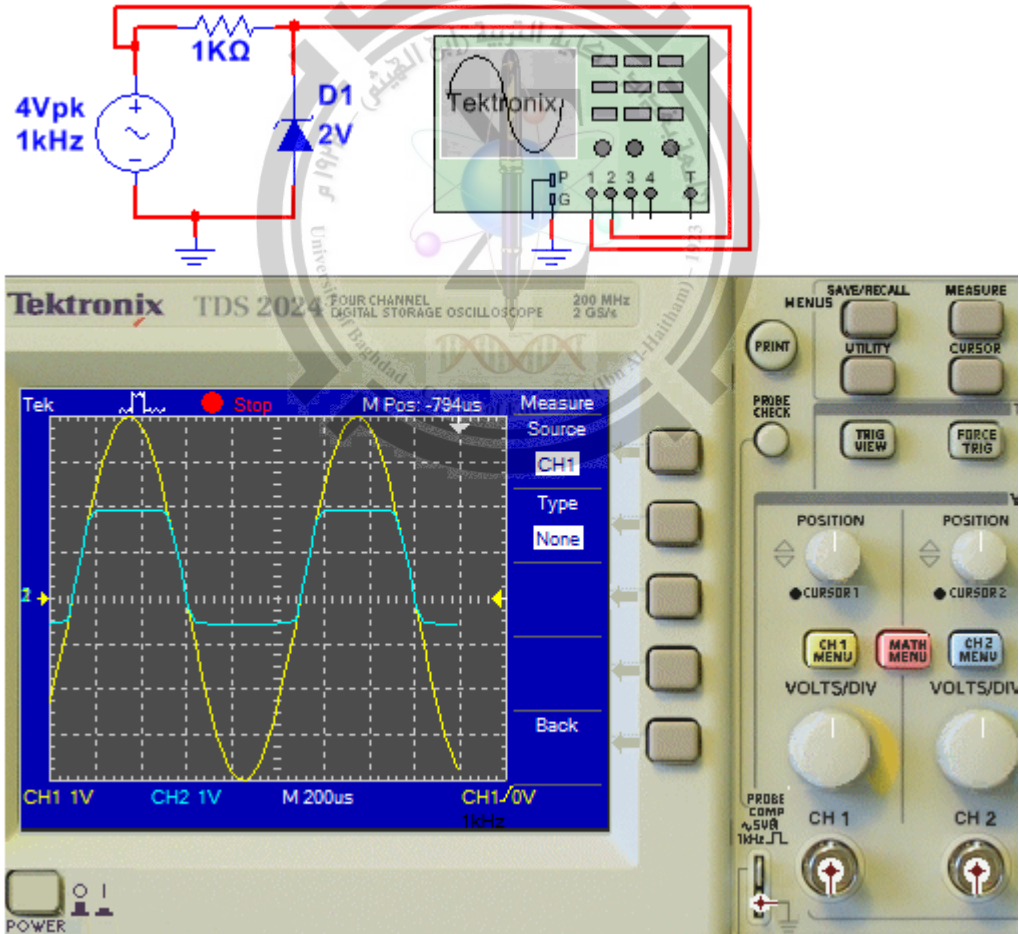
بالإضافة لاستعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية، يمكن استعمال ثنائي زنر في دوائر تحديد (تقليم) الفولتية وبتيح ذلك الاستغناء عن البطارية التي كانت تستعمل في دوائر التحديد المعتمدة على ثنائي التقويم مما يوفر تكلفة اقل وحجم اصغر.

الشكل (11-4) يوضح دائرة محدد الفولتية الموجب باستعمال ثنائي زنر. خلال النصف الموجب يكون ثنائي زنر في حالة انحياز عكسي ويتصرف زنر كدائرة مفتوحة  $(V_o = V_{in})$  إلى ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد انهيار ثنائي زنر وعندها تتحدد ذروة فولتية الإدخال عند جهد انهيار زنر  $(V_o = V_Z)$ ، اما خلال النصف السالب فيكون زنر في حالة انحياز أمامي وتتحد ذروة الجزء السالب عند جهد الحاجز لقيم فولتيات الإدخال الأكبر من جهد الحاجز  $(V_o = V_B)$ .



شكل (4-11) دائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي زنر

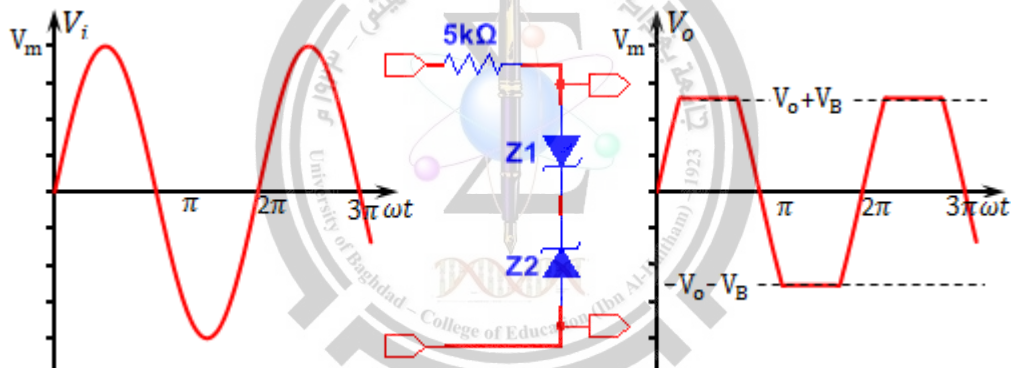
الشكل (4-12) يوضح عملية محاكاة لعمل دائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي زنر، حيث استعمل ثنائي زنر سلكوني جهد انهياره (2V)، وكانت فولتية الإدخال المتتابة ذات ذروة (4Vp).



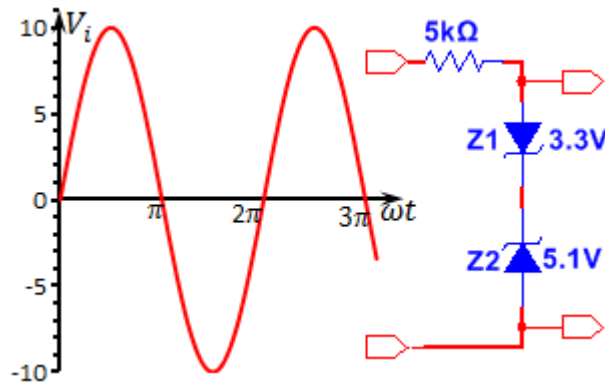
شكل (4-12) محاكاة لدائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي زنر

نلاحظ من صورة الاوسليسكوب في الشكل السابق ان ذروة فولتية الإخراج الموجبة قد تم تحديدها بالمقدار (2V) وهي تمثل جهد الانهيار للزئر، بينما نلاحظ ان الجزء السالب من فولتية الإخراج قد تم تحديدها بالقيمة (0.7V) وهي تمثل جهد الحاجز لثنائي زئر المستعمل.

الشكل (4-13) يوضح استعمال ثنائي زئر في دائرة محدد الفولتية المركب، والذي يتكون من ثنائي زئر مربوطين باتجاهين متعاكسين، ويكون عمل الدائرة كالتالي: خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يكون ثنائي زئر (Z1) منحازاً أمامياً وثنائي زئر (Z2) منحازاً عكسياً، وبالنسبة للجزء الموجب من موجة الإدخال عند قيمة جهد انهيار زئر (Z2) مضافاً إليها قيمة جهد الحاجز للثنائي (Z1)، أي ان الجزء الموجب من موجة الإدخال يتحدد بالمقدار  $(V_{Z1} + V_B)$ ، خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيكون ثنائي زئر (Z1) منحازاً عكسياً وثنائي زئر (Z2) منحازاً أمامياً، وتتحدد الذروة السالبة بالمقدار  $(-V_{Z1} - V_B)$ .



شكل (4-13) دائرة محدد الفولتية مركب باستعمال ثنائي زئر



**مثال (4-7):** في الشكل

المجاور، ارسم شكل الفولتية

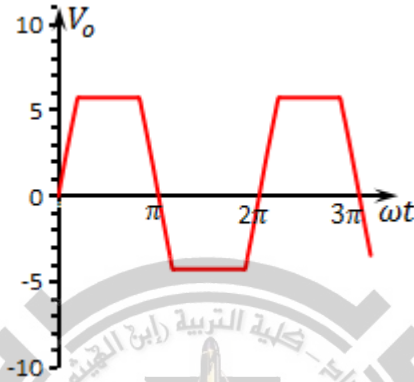
الخارجة مع توضيح عمل

الدائرة. افرض ان ثنائي

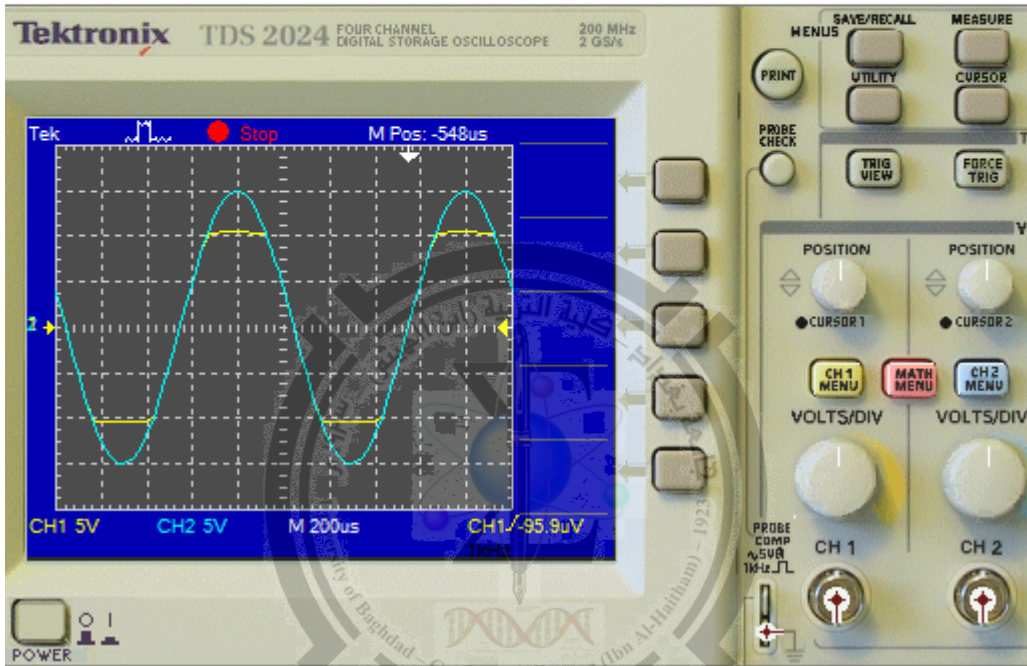
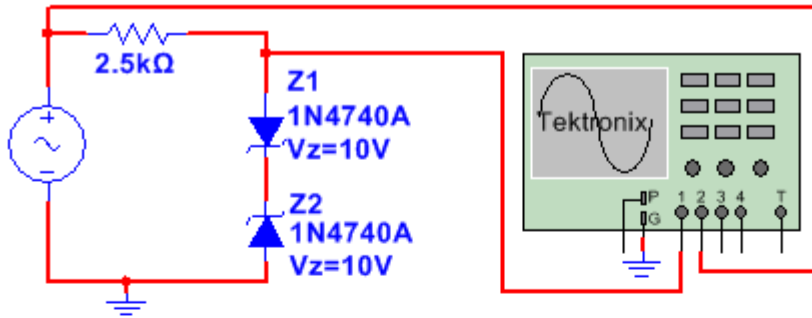
الزئر من السليكون.

## الحل:

خلال النصف الموجب يكون زنر (Z1) منحاز أمامياً و زنر (Z2) منحاز عكسياً ولذلك يتحدد الجزء الموجب من موجة الإخراج بالمقدار  $[5.1 + 0.7)V$ ، اما خلال النصف السالب فيكون الزنير (Z1) منحاز عكسياً و زنر (Z2) منحاز عكسياً، وبالنتيجة يتحدد الجزء السالب من موجة الإخراج بالمقدار  $[(-3.3 - 0.7)V]$ . كما هو موضح بالشكل التالي.

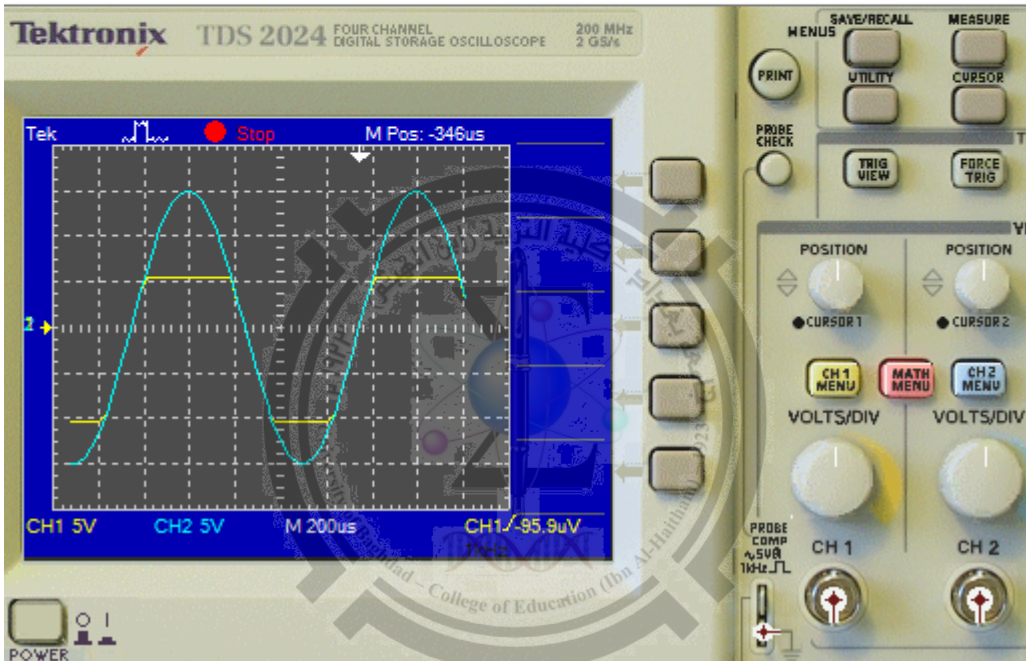
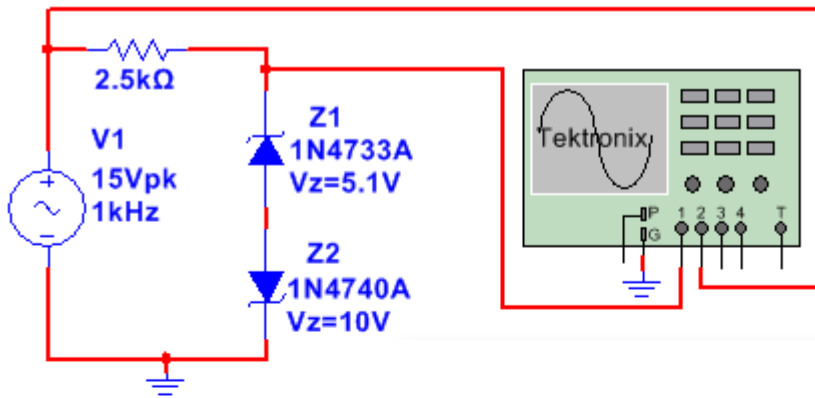


الشكل (4-14) يوضح استعمال برنامج المحاكاة (Multilism-14) في تصميم دائرة محدد مركب باستعمال ثنائيي زنر متماثلين  $(V_{Z1} = 10V, V_{Z2} = 10V)$  وباستعمال مصدر متناوب قيمته الفعالة  $(10.6V)$  والذي يقابل فولتية جيبيية ذروتها  $(15V_p)$  ولرسم الإشارة الداخلة والخارجة تم الاستفادة من جهاز المحاكاة حيث تم توصيل القناة الأولى للاوسليسكوب بطرفي الإخراج للدائرة بينما تم توصيل القناة الأولى بطرفي الإدخال للدائرة. نلاحظ من الشكل ان إشارة الإدخال جيبيية الشكل وذروتها  $(15V)$  والتي تقابل ثلاثة تقسيمات (Div) وكل تقسيم يقابل  $(5V)$  وما هو مثبت على شاشة الاوسليسكوب، يلاحظ ان فولتية الإخراج قد تحددت من الجزء الموجب والجزء السالب عند القيمة  $(10V)$ ، حيث قام المحدد الموجب بتحديد الذروة الموجبة عند قيمة جهد الانهيار لثنائي زنر  $(V_{Z2})$ ، اما الذروة السالبة فتم تحديدها بجهد الانهيار  $(V_{Z1})$ ، ويلاحظ ان التحديد متماثل للجزء الموجب والسالب وذلك لاستعمال ثنائيي زنر متماثلين.



شكل (4-14) محاكاة لدائرة محدد مركب باستعمال ثنائي زنر متماثلين

الشكل (4-15) يوضح برنامج محاكاة لدائرة محدد زنر يستعمل ثنائيي زنر مختلفين في جهد الانهيار ( $V_{Z1} = 5.1V, V_{Z2} = 10V$ )، حيث يقوم الثنائي الأول بتحديد ذروة الجزء السالب عند قيمة جهد الانهيار له ( $5.1V$ ) بينما يقوم ثنائي زنر الثاني بتحديد ذروة الجزء الموجب عند قيمة جهد الانهيار له ( $10V$ ).

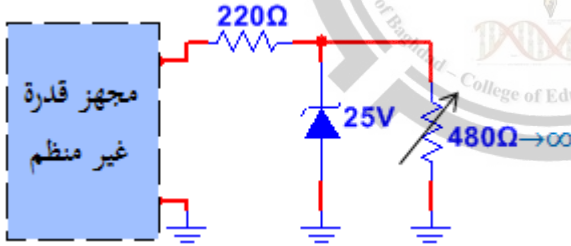
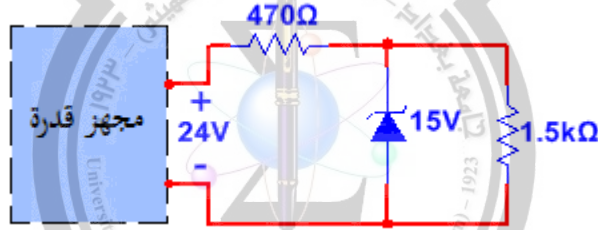


شكل (4-15) محاكاة لدائرة محدد مركب باستعمال ثنائي زئر مختلفين متصلين من جهة الانود



## أسئلة الفصل الرابع

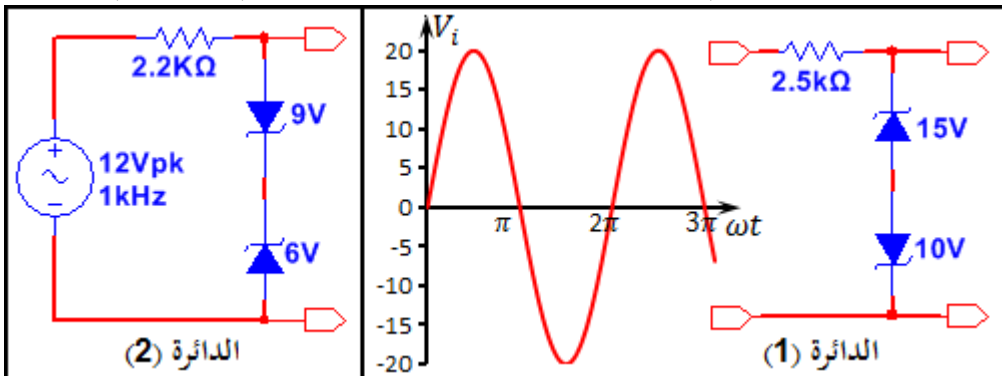
- س1:** قارن بين كل من: ثنائي التقويم وثنائي زنر. ب-الانهيار التهديمي وانهيار زنر.
- س2:** ما هي الميزة التي تجعل من ثنائي زنر العنصر الأساسي في دوائر تنظيم الفولتية.
- س3:** المعامل الحراري لثنائي زنر ( $0.004\%/^{\circ}\text{C}$ ) وجهد انكساره ( $14\text{V}$ ) عند درجة ( $25^{\circ}\text{C}$ )، أوجد التغير في الفولتية وفولتية زنر عند ارتفاع درجة الحرارة إلى ( $120^{\circ}\text{C}$ ).
- س4:** أقصى قدرة مبددة لثنائي زنر هي ( $400\text{mW}$ ) عند درجة حرارة ( $50^{\circ}\text{C}$ )، أوجد أقصى قدرة مبددة عند درجة ( $75^{\circ}\text{C}$ ) علماً بأن معامل هبوط القدرة للزنر ( $3.1\text{mW}/^{\circ}\text{C}$ ).
- س5:** في الشكل التالي أوجد: 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 الثلاث بعد ربط ثنائي زنر.



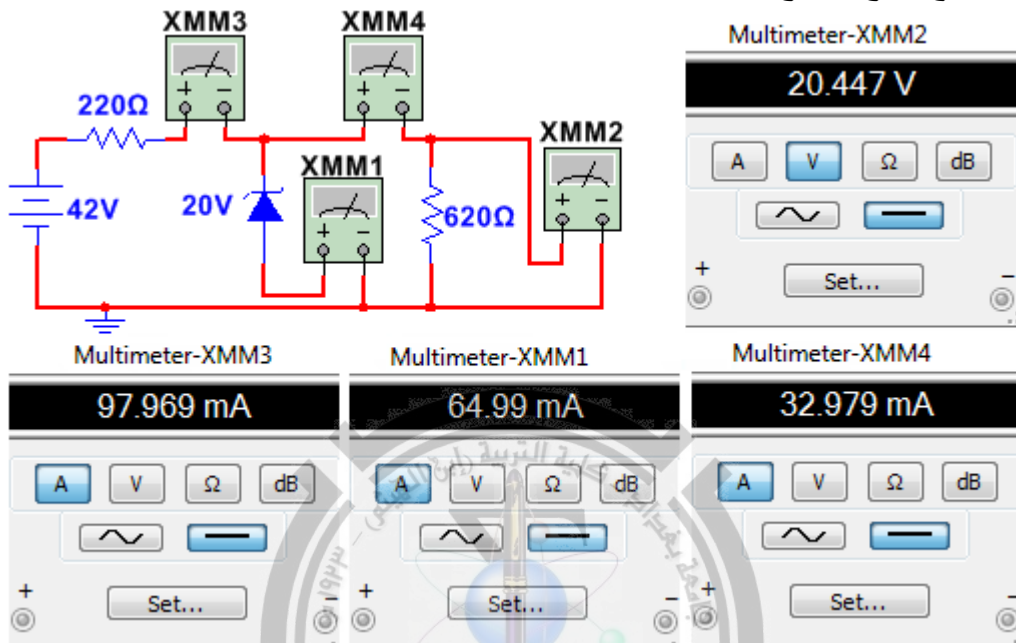
**س6:** في الشكل المجاور احسب:

- 1- التيار المار في مقاومة التوالي.
- 2- اصغر واعظم تيار حمل.
- 3- اصغر واعظم تيار زنر.

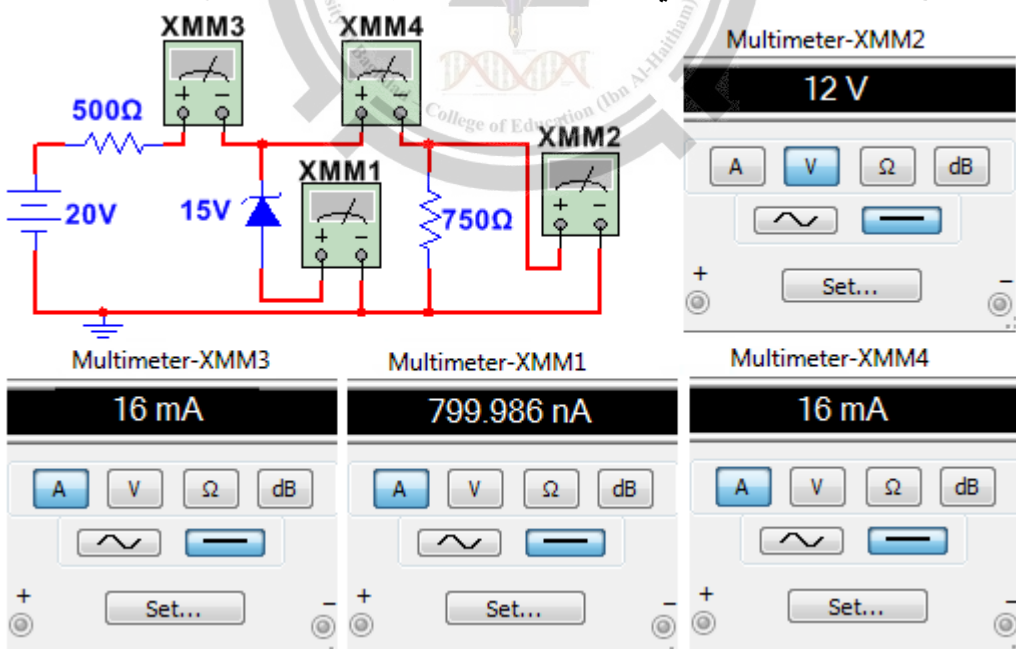
**س7:** ارسم موجة الإخراج في كل دائرة من الدوائر التالية (اعتبر ثنائي زنر مثالي):



س8: الشكل التالي يوضح نتيجة برنامج المحاكاة (Multisim-14) لعمل دائرة منظم زنر، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل، تيار الحمل، تيار المقاومة ( $R_S$ )، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكاة.



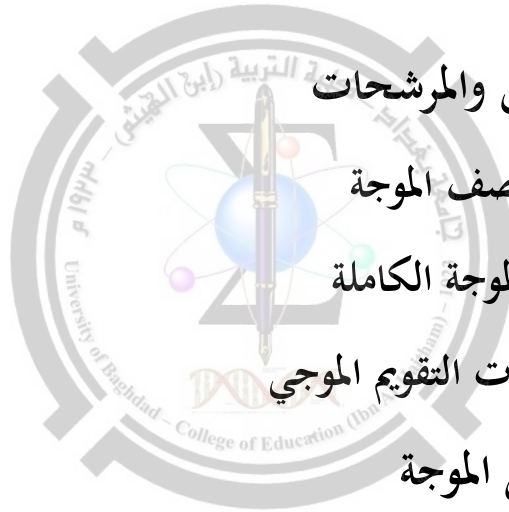
س9: وضح هل يحدث التنظيم في الدائرة التالية ولماذا ثم قارن نتائجك مع نتيجة المحاكاة.



# الفصل الثالث

## تطبيقات ثنائي أشباه الموصلات

### (Semiconductor Diode Applications)



#### 1.3 التقويم الموجي والمرشحات

##### 1.1.3 مقوم نصف الموجة

##### 2.1.3 مقوم الموجة الكاملة

##### 3.1.3 مرشحات التقويم الموجي

#### 2.3 دوائر تشكيل الموجة

##### 1.2.3 التحديد وأنواعه

##### 2.2.3 الإلزام وأنواعه

##### 3.2.3 مضاعفات الفولتية

#### 3.3 ثنائيات الاستعمالات الخاصة



ان معظم الأجهزة الإلكترونية (مثل التلفاز، الحاسوب، مشغل الأقراص المدمجة، الهواتف النقالة، مصابيح الإنارة الاقتصادية، وغيرها) تكون بحاجة إلى فولتية مستمرة للقيام بعملها، وحيث ان الشبكة الوطنية تجهز الدور بفولتية متناوبة قيمتها الفعالة في العراق  $(V_{rms} = 220V)$  وترددها  $(50Hz)$ ، بينما في أمريكا  $(V_{rms} = 220V)$  وترددها  $(60Hz)$  اما في اوروبا فهي  $(V_{rms} = 240V)$  وترددها  $(60Hz)$ ، لذلك فلتشغيل تلك الأجهزة لا بد من تحويل الفولتية المتناوبة إلى فولتية مستمرة، ويسمى الجهاز الذي يقوم بهذه العملية بمجهر القدرة المستمر (DC Power Supply).

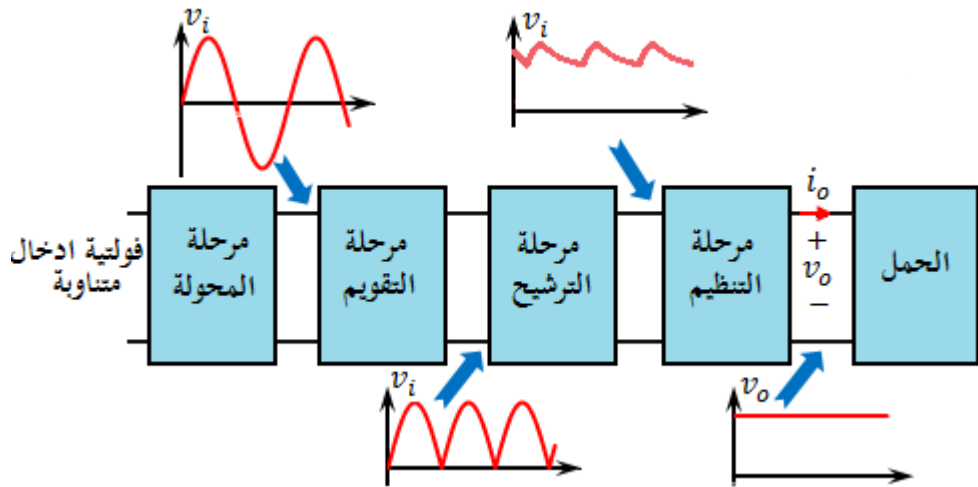
### 1.3 التقويم الموجي والمرشحات

الشكل (1-3) يمثل صورة لمجهر القدرة المستمر، وهو شائع الاستعمال في المختبرات وخصوصا في مختبر الإلكترونيات وكذلك في مختبر الكهرباء، ويتغذى الجهاز من كهرباء الشبكة الوطنية والتي تكون عبارة عن فولتية متناوبة (متغيرة الشدة والاتجاه) قيمتها الفعالة  $(220V)$  وترددها  $(50Hz)$ ، اما طرفي الإخراج للجهاز فتوفر فولتية مستمرة (ثابتة الشدة والاتجاه) يمكن التحكم في قيمتها.



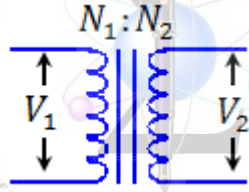
شكل (1-3) مجهر القدرة المستمر

ان مجهر القدرة المستمر يتكون من عدة مراحل، كما موضح بالشكل (2-3) كما نلاحظ من المخطط ان مجهر القدرة المستمر يتكون من أربعة مراحل تبدأ بالمحولة ومن ثم المقوم والمرشح وأخيرا دائرة المنظم، وسنورد الآن بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بالمحولة الكهربائية، اما الأجزاء الثلاثة المتبقية سيكون لكل منها فقرة خاصة بها.



شكل (2-3) مخطط لمراحل مجهز القدرة المستمر

الشكل (3-3) يمثل رمز المحولة وتمثل:  $(N_1)$  عدد لفات الملف الابتدائي،  $(N_2)$  عدد لفات الملف الثانوي، والعلاقة التي تربط بين القيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الابتدائي  $(V_1)$  والقيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الثانوي  $(V_2)$  هي:



شكل (3-3) رمز المحولة

$$\frac{V}{V_1} = \frac{N}{N_1} \Rightarrow V = \frac{N}{N_1} V_1 \quad (3-1)$$

ان استعمال المحولة في دائرة مجهز القدرة هو لسببين هما:

1. لخفض (أو رفع) الفولتية لقيمة مناسبة لعمل بقية أجزاء المجهز ووفقاً للفولتية المستمرة المطلوبة.

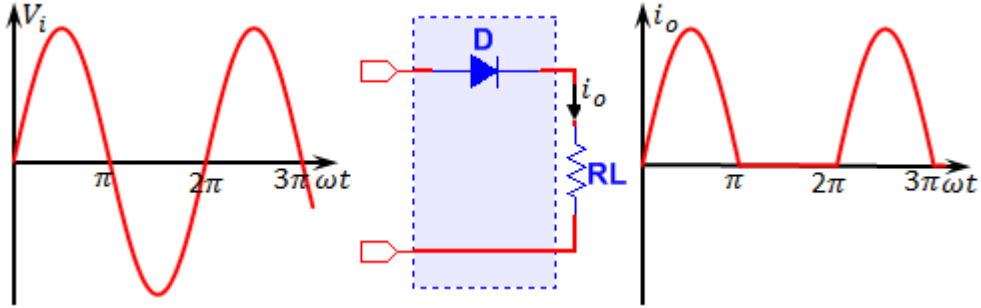
2. لعزل الدائرة عن خط القدرة مما يقلل من احتمال الإصابة بالصدمة الكهربائية.

تعرف دوائر التقويم الموجي بانها دوائر تقوم على تحويل الفولتية المتناوبة (متغيرة الشدة والاتجاه) إلى فولتية مستمرة نبضية (متغيرة الشدة وثابته الاتجاه). يكون للثنائي البلوري دور أساسي في دوائر التقويم الموجي وذلك لامتلاكه الخاصية بكونه يُبدي مقاومة قليلة لسريان التيار في اتجاه معين (عندما ينحاز أمامياً) ولا يسمح لسريان التيار بالاتجاه المعاكس (عندما

ينحاز عكسياً)، وبعبارة أخرى انه يسمح بمرور التيار باتجاه واحد. بشكل عام هناك نوعان من دوائر التقويم الموجي وهي مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة.

### 1.1.3 مقوم نصف الموجة (Half-Wave Rectifier)

الشكل (3-4) يوضح مقوم نصف موجة وشكل الموجة الداخلة للمقوم والخارجة منه.



شكل (3-4) دائرة مقوم نصف الموجة

خلال النصف الأول من فولتية الإدخال للمقوم يكون الثنائي منحاز أمامياً ويسمح للثنائي بمرور التيار من خلاله ويكون منحازاً عكسياً خلال النصف السالب ولا يمرر التيار، وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائي بنظر الاعتبار وتطبيق قانون كيرشوف الثاني (المجموع الجبري لفروق الجهد حول أي دائرة كهربائية مغلقة يساوي صفر) نحصل على:

$$v - i_o R_f - i_o R_L = 0$$

$$i_o = \frac{v}{R_f + R_L}$$

حيث:  $(v_i)$  الفولتية الداخلة للمقوم،  $(i_o)$  تيار الإخراج،  $(R_f)$  مقاومة الثنائي الامامية،  $(R_L)$  مقاومة الحمل، غالباً ما تكون فولتية الإدخال للمقوم جيبية لذا يمكننا ان نعبر عن فولتية الإدخال بالصيغة:

$$v = V_m \sin(\omega t) \quad , \quad 0 \leq \omega t \leq 2\pi$$

$(V_m)$  هي ذروة فولتية الإدخال، و  $(\omega)$  هو التردد الزاوي والذي يرتبط بتردد فولتية الإدخال  $(f)$  بالعلاقة  $(\omega = 2\pi f)$ . وبالتعويض بمعادلة التيار مع الأخذ بنظر الاعتبار ان الثنائي يمرر خلال النصف الموجب فقط نحصل على:

$$i_o = \begin{cases} \frac{V_m}{R_f + R_L} \sin(\omega t) & , \quad 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & , \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (3-2)$$

في حالة اخذ تأثير جهد الحازر للثنائي ( $V_B$ ) فان قيمة ذروة الإخراج تصبح بالصورة:

$$I = \frac{V - V_B}{R_f + R_L} \quad (3 - 3)$$

نلاحظ من شكل الفولتية الخارجة من مقوم نصف الموجة ان زمن الإخراج هو نفسه

زمن الإدخال أي ان:

$$T_o = T_i , f_o = f_i$$

أي انه في حالة مقوم نصف الموجة فان تردد الإخراج هو نفسه تردد الإدخال.

في حالة الانحياز العكسي يجب ان لا تتجاوز الفولتية العكسية المسلطة على طرفي

الثنائي فولتية الانهيار التهديمي الخاصة به، وتسمى اعظم قيمة للفولتية العكسية التي يجب ان

يتحملها الثنائي بفولتية الذروة العكسية [Peak Inverse Voltage (PIV)]. ان اعظم فولتية

الذروة العكسية في حالة مقوم نصف الموجة هي ( $PIV = V_m$ ).

من الأمور المهمة في أي مقوم هو مقدار المركبة المستمرة (معدل القيمة المستمرة) التي

تخرج من المقوم و يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_o d(\omega t)$$

بالتعويض عن قيمة تيار الإخراج نحصل على:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} [0] d(\omega t) \right\}$$

وبحل التكامل نحصل على:

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} \quad (3 - 4)$$

بنفس الطريقة يكون:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \quad (3 - 5)$$

اما القيمة الفعالة للتيار (قيمة التيار المتناوب الذي يولد نفس التأثير الحراري للتيار

مستمر) الخارج من مقوم نصف الموجة ( $I_{rms}$ ) فتعرف بالعلاقة:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_o)^2 d(\omega t)}$$

بالتعويض عن قيمة التيار نحصل على:



$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} [I_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} [0]^2 d(\omega t) \right\}}$$

بالاستفادة من المتطابقة المثلثية  $[\sin^2 \theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta)]$  وحل التكامل نحصل على:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} \quad (3 - 6)$$

**مثال (3-1):** الشكل التالي يمثل تجربة محاكاة حاسوبية لتجربة مقوم نصف موجة تم بنائها باستخدام برنامج المحاكاة (Multisim-14)، حيث تم استعمال ثنائي الاستعمالات العامة (1N4001GP) وتم استعمال برنامج Multisim لرسم شكل الإشارة الخارجة عبر مقاومة الحمل باستخدام محاكاة لجهاز الاوسليسكوب (Tektronix) الذي يوفره البرنامج، كما تم استعمال برنامج المحاكاة لقياس الفولتية المستمرة الخارجة على طرفي الحمل بطريقة مباشرة باستخدام محاكاة لجهاز الملمتير الرقمي (AgiIent multimeter-XMM1). باستخدام العلاقات النظرية أوجد قيمة ذروة فولتية الإخراج والقيمة المستمرة في فولتية الإخراج باستخدام التقريب المثالي ومن ثم التقريب الثاني وقارن بين نتائجك ونتائج برنامج المحاكاة.

**الحل:** نجد أولاً ذروة فولتية الإدخال، من رسمة الدائرة نلاحظ ان فولتية الإدخال متناوبة وقيمتها الفعالة ( $12V_{rms}$ )، ومنها يمكننا ايجاد ذروة فولتية الادخال باستخدام العلاقة:

$$V_m = V_{rms} \sqrt{2}$$

$$V_m = 12 \times \sqrt{2} = 16.97V$$

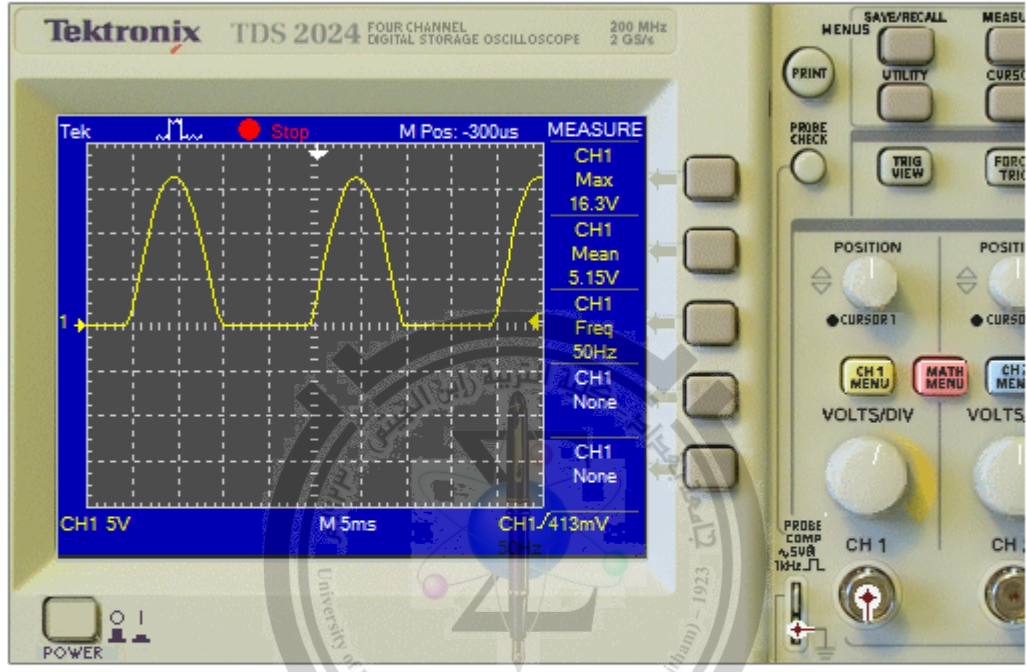
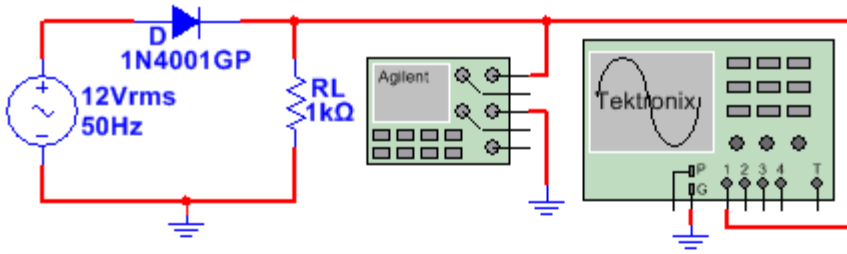
**أولاً: باستخدام التقريب الأول (الثنائي المثالي)**

في حالة التقريب المثالي تكون ذروة فولتية الإخراج على الحمل تساوي ذروة فولتية الإدخال لمقوم نصف الموجة ( $V_p = V_m$ )، أي ان ذروة فولتية الإخراج هي ( $V_p = 16.97V$ ).

اما قيمة المركبة المستمرة لفولتية الإخراج فتكون:

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

$$V_{dc} = \frac{16.97}{\pi} = 5.4V$$



بالمقارنة بين القيمتين المحسوبيتين والقيمة المسجلة على أجهزة المحاكاة نلاحظ ان الاوسليسكوب يسجل ذروة فولتية إخراج مقدارها (16.3V) بينما يسجل جهاز الملتيميتر فولتية إخراج مستمرة مقدارها (5.11V) ان الاختلاف في النتيجتين عائد إلى ان الثنائي المستعمل في تجربة المحاكاة هو ثنائي عملي وله جهد حاجز ومقاومة داخلية.

ثانياً: باستعمال التقريب الثاني

في حالة التقريب الثاني يتم الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للثنائي، وتكون ذروة فولتية الإخراج معطاة بالعلاقة:

$$V = V_m - V_B$$

وحيث ان الثنائي (1N4001GP) هو من ثنائيات السليكون، لذا يكون قيمة حاجز الجهد لها  $(V_B = 0.7V)$ . وبالتعويض في علاقة جهد الذروة نجد:

$$V = 16.97 - 0.7 = 16.27V$$

اما قيمة المركبة المستمرة في فولتية الإخراج باعتماد التقريب الثاني فتعطى بالعلاقة:

$$V_{dc} = \frac{V_P}{\pi}$$

$$V_{dc} = 16.27/\pi = 5.18V$$

يلاحظ ان نتائج التقريب الثاني قريبة من نتائج المحاكاة وذلك لأخذ تأثير جهد الحاجز، غير انها لا تعتبر تامة الدقة لعدم اخذ تأثير مقاومة الثنائي الأمامية بنظر الاعتبار.

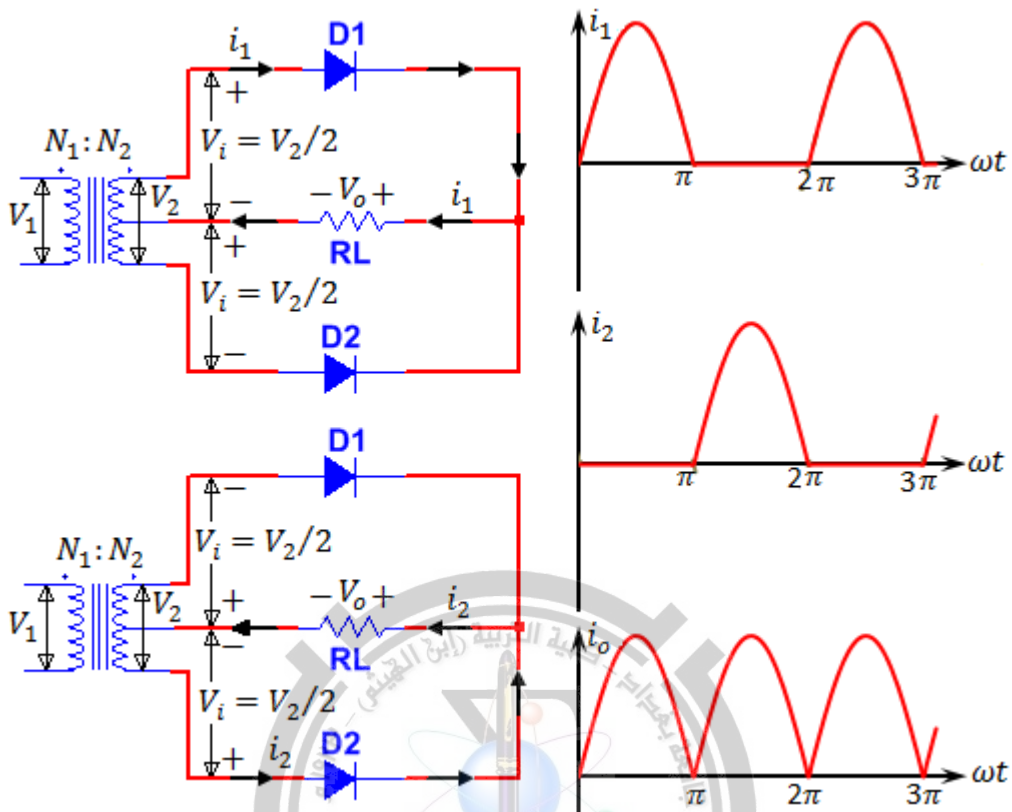
### 2.1.3 مقوم الموجة الكاملة (Full-Wave Rectifier)

هنالك نوعان من مقومات الموجة الكاملة وهما:

#### أولاً: مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي

الشكل (3-5) يوضح تركيب وعمل مقوم الموجة الكاملة الذي يستخدم محولة ذات تفرع مركزي (center-tapped transformer)، حيث يتكون المقوم من ثنائيين  $(D_1, D_2)$  ومحولة تفرع مركزي والتي تختلف عن المحولات الاعتيادية بكون ملفها الثانوي عبارة عن ملفين متساويين، وبالتالي تكون الفولتية الخارجة منه مقسمة إلى جزئين متساويين.

خلال النصف الأول من الموجة الداخلة يكون الثنائي  $(D_1)$  منحازاً أمامياً ويمر تيار  $(i_1)$  وبالاتجاه المبين بالشكل، اما الثنائي  $(D_2)$  فيكون منحازاً عكسياً ولا يسمح بمرور التيار من خلاله. وخلال النصف السالب من موجة الإدخال (حيث تتقلب قطبية اطراف المحولة) يصبح الثنائي  $(D_1)$  منحازاً عكسياً اما الثنائي  $(D_2)$  فيكون منحازاً أمامياً فيمر تيار  $(i_2)$  عبره وبنفس الاتجاه التيار  $(i_1)$ ، وبالنتيجة نلاحظ مرور تيار في الحمل خلال النصف الأول والثاني وبنفس الاتجاه، أي ان مقوم الموجة الكاملة يعمل على الاستفادة من نصفي الموجة في حين كان مقوم نصف الموجة يستفاد من نصف موجة واحد فقط.



شكل (3-5) دائرة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محمولة التفرع المركزي

بنفس الطريقة السابقة يمكننا ان نجد قيمة ذروة تيار الحمل عند اخذ قيمة المقاومة الأمامية للتنائي بالصورة:

$$I = \frac{V}{R_f + R_L} \quad (3-7)$$

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز للتنائي نجد:

$$I = \frac{V - V_B}{R_f + R_L} \quad (3-8)$$

من ملاحظة شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة نجد ان زمن الموجة الخارجة هو نصف زمن الموجة الداخلة وبالتالي يكون تردد الفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة هو ضعف تردد الإدخال أي ان:

$$T_o = 0.5 T_i , f_o = 2f_i$$

بنفس الطريقة المتبعة في مقوم نصف الموجة يمكننا ان نجد المركبة المستمرة والقيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم التفرع المركزي وكما يلي:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_o d(\omega t) , i_o = \begin{cases} I_m \sin(\omega t) , & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -I_m \sin(\omega t) , & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

بالتعويض وحل التكامل نحصل على:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_0^{\pi} [-I_m \sin(\omega t)] d(\omega t) \right\}$$

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} \quad (3 - 9)$$

وينفس الطريقة يكون  $(V_{dc} = 2V_m/\pi)$ .

من هذه النتيجة تستنتج ان قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي هي ضعف قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم نصف الموجة. اما القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة فتكون:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_o)^2 d(\omega t)}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} [I_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} [-I_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t) \right\}}$$

وبحل التكامل نحصل على:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (3 - 10)$$

أي ان القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة هو اكبر من القيمة الفعالة للمركبة الخارجة من مقوم نصف الموجة (وذلك لان مقوم الموجة الكاملة يمرر تيار في الحمل خلال نصفي الموجة)، كما نلاحظ ان العلاقة الخاصة بالقيمة الفعالة هي ذاتها للإشارة المتناوبة (بإهمال جهد الحازر ومقاومة الثنائي).

ذكرنا سابقاً ان محولة التفرع المركزي تعمل على تجزئة الفولتية الخارجة منه إلى نصفين وبالقطبية الموضحة في الشكل (راجع الشكل السابق) لذا فانه خلال النصف الموجب من موجة الإدخال فان الثنائي  $(D_2)$  يتعرض إلى جهد عكسي مقداره  $(2V_m)$ ، ونفس الأمر ينطبق على الثنائي  $(D_1)$  خلال النصف السالب.

من ذلك نجد ان جهد الذروة العكسية (PIV) في حالة مقوم الموجة الكاملة الذي يستعمل محولة التفرع المركزي هو ضعف جهد الذروة العكسية لمقوم نصف الموجة ولذلك

يجب اختيار الثنائي هنا بحذر اكبر (بتعبير آخر ان جهد الانهيار التهديمي للثنائي المستعمل يجب ان يكون اكبر من ضعف جهد ذروة الإدخال).

### ثانيا: مقوم القنطرة (Bridge Rectifier)

على الرغم من الكفاءة العالية التي تتمتع بها دائرة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي بالمقارنة مع مقوم نصف الموجة، إلا ان لها بعض المساوئ منها:  
 أ- عدم توفر محولة التفرع المركزي في كل الأوقات، وكذلك فان استعمال محولة التفرع المركزي يعني زيادة حجم الدائرة وزيادة تكاليفها.  
 ب- الثنائيات أشباه الموصلات المستعملة يجب ان تمتلك جهد انهيار تهدمي عالي (اكبر من ضعف ذروة الإدخال).

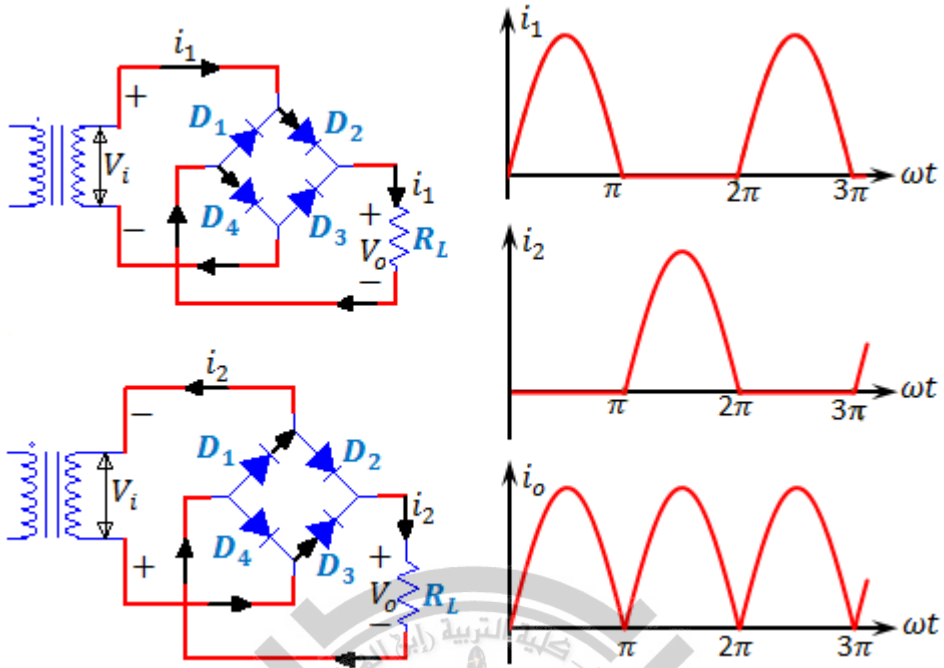
للتغلب على تلك الصعوبات وجد نوع آخر من مقومات الموجة الكاملة وهو مقوم القنطرة الذي يستعمل اربع ثنائيات وكما موضح بالشكل (3-6).  
 خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون كل من الثنائي ( $D_2$ ) و ( $D_4$ ) منحازين أماميا ويمر التيار عبر الحمل بالاتجاه الموضح بالشكل، بينما يكون الثنائيان ( $D_1, D_3$ ) في حالة انحياز عكسي، اما خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيكون الثنائيان ( $D_2, D_4$ ) في حالة انحياز عكسي والثنائيان ( $D_1, D_3$ ) في حالة انحياز أمامي، فيمر عبرهما تيار في الحمل وبنفس اتجاه التيار الأول. وبالمحصلة يمر بالحمل تيار بنفس الاتجاه للنصف الموجب والسالب من موجة الإدخال.

نلاحظ ان شكل الموجة الخارجة عن مقوم القنطرة لا يختلف عن شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي، ومنه يمكن ان تستنتج ان:

$$\left. \begin{aligned} f &= 2f_i \\ I_{dc} &= 2I_m/\pi, \quad V_{dc} = 2V_m/\pi \\ I_{rms} &= I_m/\sqrt{2}, \quad V_{rms} = V_m/\sqrt{2} \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

ان اقصى جهد عكسي يمكن ان يتعرض له الثنائي في حالة مقوم القنطرة هو ( $PIV=V_m$ )، و بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد، وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائيات بنظر الاعتبار نحصل على:

$$I_m = \frac{V_m}{2R_f + R_L} \quad (3-12)$$



شكل (3-6) دائرة مقوم القنطرة

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحازر بنظر الاعتبار يكون:

$$I = \frac{V - 2V_B}{2R_f + R_L} \quad (3 - 13)$$

ان مقوم القنطرة يعتبر من اكثر المقومات استعمالاً اما عيبه الرئيسي فهو امتلاكه لأربعة ثنائيات يقوم اثنان منها بالتوصيل في نصف ذبذبة ويقوم الاثنان الآخران بالتوصيل بالنصف الآخر من الذبذبة وهذا يؤدي إلى مشكلة عندما تكون الفولتية المراد تقويمها صغيرة، ففي حالة استعمال ثنائيات السليكون يكون هبوط الفولتية على الثنائيين ( $2V_B = 1.4V$ ) وهي قيمة مؤثرة وخاصة عندما تكون الاشارة المراد تقويمها صغيرة، ولهذا السبب فان مقوم التفرع المركزي يفضل في التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة لوجود هبوط فولتية واحد ( $0.7V$ ) على ثنائي واحد. في بعض التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة يستعمل ثنائيان من مادة الجرمانيوم في مقوم التفرع المركزي حيث يؤدي ذلك إلى هبوط بالفولتية على الثنائي مقداره ( $0.3V$ ) فقط.

لتحديد كفاءة وجودة أي دائرة تقويم موجي هناك عاملين أساسيين وهما كفاءة التعديل

وعامل التمدج وفيما يلي شرح لكل منها:

## أولاً: كفاءة التعتديل ( Rectification Efficiency $\eta$ )

تعرف كفاءة التعتديل لأي دائرة مقوم بانها النسبة بين القدرة المستمرة التي يجهزها المقوم لمقاومة الحمل إلى القدرة المتناوبة التي تدخل إلى دائرة التقويم ويرمز لها بالرمز ( $\eta$ ) أي ان:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

تعرف القدرة المستمرة المجهزة للحمل بالصيغة:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_L$$

اما القدرة المتناوبة التي يستلمها المقوم فتعطى بالصيغة:

$$P_{ac} = I_{rms}^2 \times (R_L + R_f)$$

بالنتيجة يمكننا كتابة الصيغة النهائية لكفاءة التعتديل لأي مقوم بالصورة:

$$\eta = \frac{I_{dc}^2 \times R_L}{I_{rms}^2 \times (R_L + R_f)} \quad (3 - 14)$$

بالاعتماد على العلاقة الأخيرة يمكننا إيجاد كفاءة التعتديل لكل من مقوم نصف الموجة

ومقوم الموجة الكاملة بنوعيه، وكما يلي:

في حالة مقوم نصف الموجة سبق ان وجدنا ان ( $I_{dc} = I_m/\pi, I_{rms} = I_m/2$ )

وبالتعويض نحصل على:

$$\eta = \frac{(I_m/\pi)^2 \times R_L}{(I_m/2)^2 \times (R_L + R_f)}$$

$$\eta = \frac{0.406}{1 + (R_f/R_L)}$$

تكون الكفاءة في قيمتها القصوى عندما تكون قيمة مقاومة الحمل اكبر بكثير من قيمة

المقاومة الأمامية للثنائي ( $R_L \gg R_f$ ) وعندها يكون:

$$\eta_{max} = 0.406 = 0.406 \times 100\%$$

$$\eta_{max} = 40.6\%$$

$$(3 - 16)$$

عليه فان اقصى كفاءة يمكن الحصول عليها من مقوم نصف الموجة هي (40.6%)،

أي انه في احسن الأحوال فان (40.6%) فقط من الفولتية المتناوبة الداخلة للمقوم تتحول

إلى فولتية مستمرة ، اما النسبة المتبقية فتتمثل بالمركبة المتناوبة التي تظهر على شكل توج



في فولتية الإخراج المستمرة. ان الانخفاض في كفاءة مقوم نصف الموجة عائد لكونه يستفاد من نصف الموجة فقط في حين لا يمر تيار بالدائرة خلال النصف الآخر. وبطبيعة الحال فان القيمة العملية لكفاءة مقوم نصف الموجة ستكون اقل من (40.6%) ويتحصل عليها بعد التعويض عن قيم مقاومة الحمل ومقاومة الثنائي الأمامية.

في حالة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي لدينا:

$(I_{dc} = 2 I_m / \pi, I_{rms} = I_m / \sqrt{2})$  وبالتعويض في معادلة كفاءة التعديل نحصل على:

$$\eta = \frac{(2 I_m / \pi)^2 \times R_L}{(I_m / \sqrt{2})^2 \times (R_L + R_f)}$$

$$\eta = \frac{0.812}{1 + (R_f / R_L)}$$

$$\eta_{ax} = 81.2\% \quad (3 - 17)$$

النتيجة الأخيرة نجد ان اقصى كفاءة لمقوم الموجة الكاملة التي تستعمل محولة التفرع المركزي هي ضعف اقصى كفاءة لمقوم نصف الموجة. علماً بان الكفاءة العملية تكون اقل بعد التعويض عن قيم مقاومة الحمل والمقاومة الأمامية للثنائي. في حالة مقوم القنطرة تكون العلاقة الخاصة بكفاءة التعديل هي ذاتها في حالة مقوم التفرع المركزي باختلاف واحد فقط وهو مقاومة الدائرة في حالة الانحياز الأمامي حيث تكون  $(R_L + 2R_f)$  وبالتالي تكون كفاءة تعديل مقوم القنطرة بالصورة:

$$\eta = \frac{0.812}{1 + (2R_f / R_L)}$$

$$\eta_{ax} = 81.2\% \quad (3 - 18)$$

### ثانياً: عامل التموج (Ripple Factor)

تقاس مدى فاعلية أي دائرة تقويم ومدى قدرتها على تقويم الموجات بواسطة كمية يطلق عليها عامل التموج (Ripple Factor) أو اختصاراً  $(r)$  الذي يعرف بأنه النسبة بين القيمة الفعالة للمركبة المتتابة من الموجة الخارجة إلى معدل القيمة المستمرة لتلك الموجة الخارجة و يعرف عامل التموج رياضياً بالصيغة:

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{I_{ac}}{I_{dc}} \quad (3 - 19)$$

لإيجاد العلاقة التي تربط المركبة المستمرة بالمركبة المتناوبة نستفيد من العلاقة الخاصة بالقدرة المبددة في مقاومة الحمل  $R_L$  من دائرة المقوم والتي تعطى بالعلاقة:

$$P = I_{rms}^2 R_L$$

وحيث ان هذه القدرة الكلية هي مجموع القدرة المبددة الناتجة من مرور مركبتي التيار

المتناوب والمستمر التي تحويها الموجة الخارجة من المقوم، أي ان:

$$P = I_{dc}^2 R_L + I_{ac}^2 R_L$$

من المعادلتين الأخيرتين نستنتج ان:

$$I_{rms}^2 = I_{dc}^2 + I_{ac}^2$$

وبالتالي يمكننا ان نجد العلاقة التي تربط بين المركبة المتناوبة والمستمرة بالصورة:

$$I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}$$

وبالتعويض عن قيمة المركبة المتناوبة في معادلة عامل التموج نجد:

$$r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}}{I_{dc}}$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{dc}}\right)^2 - 1} \quad (3-20)$$

المعادلة الأخيرة تعطي قيمة عامل التموج لأي مقوم بدلالة المركبة المستمرة والقيمة الفعالة للموجة الخارجة من المقوم.

بالنسبة لدائرة مقوم نصف الموجة سبق ان وجدنا ( $I_{dc} = I_m/\pi$ ) وان القيمة الفعالة

كانت ( $I_{rms} = I_m/2$ ) وبالتالي فان عامل التموج لمقوم نصف الموجة يكون:

$$r = \sqrt{\left(\frac{I_m/2}{I_m/\pi}\right)^2 - 1}$$

$$r = 1.21 \quad (3-21)$$

وهذا يعني ان المركبة المتناوبة في الموجة الخارجة من دائرة مقوم نصف الموجة هي

اكبر ب (1.21) مرة من المركبة المستمرة لنفس الموجة، مما يشير إلى وجود تموج عالي في

الموجة الخارجة من دائرة المقوم النصفية. ولهذا السبب فان مقوم نصف الموجة لا يعتبر

فعالاً في تقويم الموجات.

اما في حالة مقوم الموجة الكاملة (مقوم التفرع المركزي والقنطرة) فقد سبق ان وجدنا ان المركبة المستمرة الخارجة من المقوم كانت ( $I_{dc} = 2I_m/\pi$ ) بينما القيمة الفعالة لها كانت ( $I_{rms} = I_m/\sqrt{2}$ ) وبالتالي فان عامل التموج لمقوم الموجة الكاملة يكون:

$$r = \sqrt{\left(\frac{I_m/\sqrt{2}}{2I_m/\pi}\right)^2 - 1}$$

$$r = 0.483 \quad (3 - 22)$$

وعليه فان المركبة المستمرة في الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة تكون اكبر من المركبة المتناوبة في نفس الموجة وبالتالي فان التموج في هذه الموجة يكون اقل مما هو عليه في الموجة الناتجة من مقوم نصف الموجة، وبشكل عام كلما قل عامل التموج كانت فاعلية الدائرة في التقويم افضل.

الجدول (3-1) يلخص بعض العلاقات المهمة لمقومي نصف الموجة والموجة الكاملة.

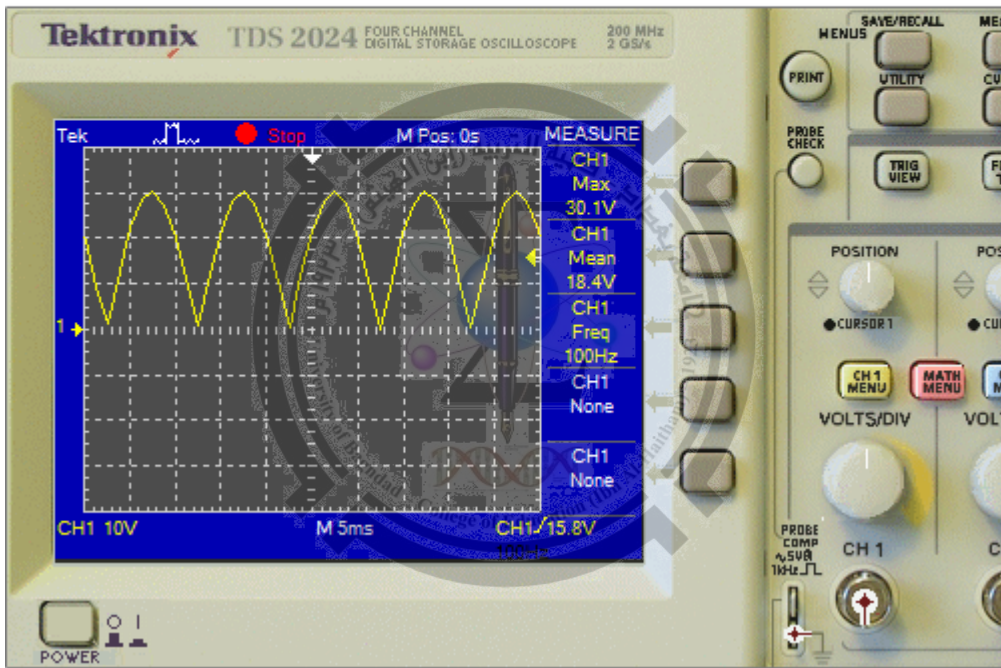
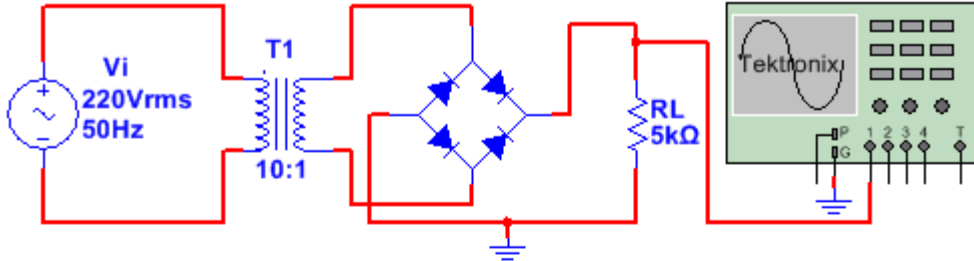
جدول (3-1) مقارنة بين مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة

مقوم موجة كاملة		مقوم نصف الموجة	
مقوم القنطرة	مقوم التفرع المركزي		
كلا	نعم	كلا	الحاجة لحولة التفرع المركزي
4	2	1	عدد الثنائيات المستعملة
$2f_i$	$2f_i$	$f_i$	تردد الإخراج ( $f_o$ )
$2I/\pi$	$2I_m/\pi$	$I_m/\pi$	القيمة المستمرة للتيار ( $I_{dc}$ )
$2V_B$	$V_B$	$V_B$	هبوط الجهد على الثنائيات
$V_m$	$2V_m$	$V_m$	اقصى جهد عكسي PIV
81.2%	81.2%	40.6%	اقصى كفاءة تعديل ( $\eta_{max}$ )
0.483	0.483	1.21	عامل التموج ( $r$ )

**مثال (3-2):** في الشكل التالي تم تنفيذ عملية محاكاة لدائرة مقوم قنطرة باستعمال برنامج (Multisim)، أوجد ذروة فولتية الإخراج باعتماد التقريب الأول ومن ثم التقريب الثاني ثم قارن النتائج التي حصلت عليها في الحالتين مع النتائج المحسوبة ببرنامج المحاكاة، علما بان الثنائيات المستعملة هي من نوع (IN4001GP).

**الحل:** نجد أولاً القيمة الفعالة للفولتية الداخلة لمقوم القنطرة باستعمال علاقة المحولة:

$$V = \frac{N}{N_1} V_1 = \frac{1}{10} \times 220 = 22V_{rms}$$



بعدها نجد ذروة فولتية الإدخال، باستعمال العلاقة:

$$V_m = V_{rms} \sqrt{2}$$

$$V_m = 22 \times \sqrt{2} = 31.1V$$

في حالة التقريب المثالي تكون ذروة فولتية الإخراج على الحمل تساوي ذروة فولتية الإدخال لمقوم القنطرة الموجة  $(V_p = V_m)$ ، أي ان ذروة فولتية الإخراج هي  $(V_p = 31.1V)$ .

اما قيمة المركبة المستمرة لفولتية الإخراج فتكون:

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = 19.8V$$

في حالة التقريب الثاني يتم الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للثنائي، وتكون ذروة فولتية الإخراج معطاة بالعلاقة:

$$V = V_m - 2V_B$$

وحيث ان الثنائي (1N4001GP) هو من ثنائيات السليكون، لذا يكون قيمة حاجز الجهد لها  $(V_B = 0.7V)$ . وبالتعويض في علاقة جهد الذروة نجد:

$$V = 31.1 - (2 \times 0.7) = 29.7V$$

اما قيمة المركبة المستمرة في فولتية الإخراج باعتماد التقريب الثاني فتعطى بالعلاقة:

$$V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{2 \times 29.7}{\pi} = 18.9V$$

من النتيجة نلاحظ ان نتائج التقريب الثاني اقرب إلى القيمة المحسوبة ببرنامج المحاكاة.

### 3.1.3 مرشحات التقويم الموجي

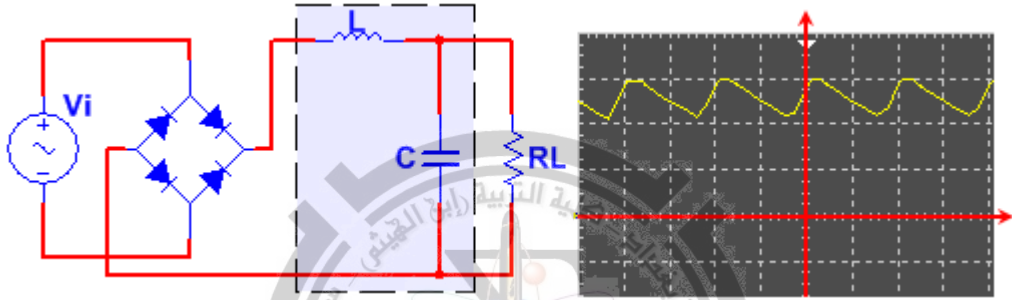
ان استخدامات الفولتية المستمرة النبضية يقتصر على شحن البطاريات وتشغيل المحركات المستمرة و تطبيقات قليلة أخرى. اما ما نحتاجه فعلاً فهي فولتية مستمرة ثابتة القيمة تشبه الفولتية التي نحصل عليها من البطارية. وعليه لا يمكن الاعتماد على دوائر التقويم وحدها كمصادر للجهد المستمر ما لم يضاف اليها دوائر أخرى تعمل على إزالة (ترشيح) الأجزاء المتناوبة من جهد الإخراج وتسمح للمركبة المستمرة بالمرور وتسمى دوائر الترشيح (Filter Circuits) و أحيانا بدوائر التنعيم (Smoothing Circuits).

تستعمل دوائر الترشيح عادة، المتسعات والملفات وتوظف قدرة تلك العناصر الكهربائية على خزن الطاقة في أجراء عملية تنعيم الجهد الخارج ومن ثم الحصول على جهد مستقر (ثابت القيمة) مع الزمن. وهناك عدة أنواع من دوائر الترشيح وهي:

#### أولاً: مرشح الإدخال الخانق (Choke-Input Filter)

يبين الشكل (3-7) مقوم موجة كاملة يغذي ملفاً خانقاً Choke (ملف محاثة ذو قلب حديدي) ومتسعة ومقاومة حمل. ان الموجة الكاملة الخارجة من المقوم لها مركبة مستمرة (نريدها) ومركبة متناوبة (غير مرغوب فيها). يسمح الملف الخانق للمركبة المستمرة بالمرور فيه بسهولة لان ممانعة الملف  $(X_L = 2\pi fL)$  تساوي صفر تقريبا بالنسبة للتيار المستمر

( $f = 0$ ) وكذلك فان المتسعة حيث رادتها ( $X_C = 1/2\pi fC$ ) تمثل دائرة مفتوحة للتيار المستمر ( $X_C = \infty$ ) ولذلك فان كل التيار المستمر الخارج من الخانق يمر خلال مقاومة الحمل ( $R_L$ ). اما المركبة المتناوبة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة فيكون لها تردد يساوي ضعف التردد الداخل للمقوم، ويقوم الملف الخانق بحجز تلك المركبة المتناوبة لان رادتها الحثية ( $X_L$ ) تكون كبيرة عند تردد إخراج المقوم، إضافة إلى ذلك فان أية مركبة متناوبة استطاعت المرور خلال الخانق فانها ستمر خلال المتسعة (حيث تكون رادتها صغيرة للمركبة المتناوبة) بدلاً من مرورها خلال مقاومة الحمل.



شكل (3-7) دائرة مرشح الإدخال الخانق

ان الفولتية الخارجة من المرشح تحتوي على مركبة مستمرة كبيرة ومركبة متناوبة صغيرة. تعطى المركبة المستمرة بالمعادلة:

$$V_{dc} = \frac{R_L}{R + R_L} V'_{dc} \quad (3 - 23)$$

حيث ( $V_{dc}$ ) تمثل الفولتية المستمرة على الحمل، ( $R$ ) مقاومة الخانق المستمرة (مقاومة سلكه الاومية)، ( $R_L$ ) مقاومة الحمل، ( $V'_{dc}$ ) الفولتية المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة.

وعادة تكون ( $R_L \gg R$ ) وبالتالي فان معظم الفولتية المستمرة الخارجة من المقوم تصل إلى الحمل ( $V_{dc} \approx V'_{dc}$ ). اما المركبة المتناوبة الخارجة من المرشح فتكون عبارة عن تذبذبات مركبة فوق المركبة المستمرة، ويعطي تموج الإخراج بالعلاقة:

$$V_r = \frac{X_C}{X_L} V'_r \quad (3 - 24)$$

حيث ( $V_r$ ) هي القيمة الفعالة لتموج الإخراج و ( $V'_r$ ) القيمة الفعالة لتموج الإدخال للمرشح. وعادة ما تكون ( $X_L \gg X_C$ ) وبالتالي يكون تموج الإخراج اصغر بكثير من تموج الإدخال.

ويمكن إيجاد القيمة الفعالة لمتوج الإخراج لتردد مقداره (120Hz) لمقوم موجة كاملة بصورة مباشرة من العلاقة:

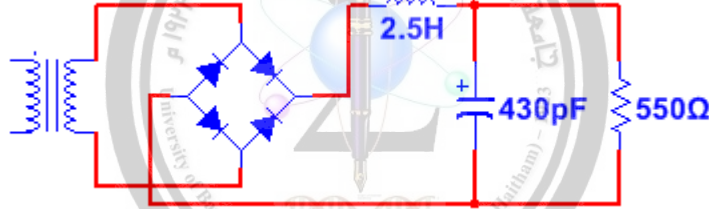
$$V = 5.28 \times 10^{-7} \frac{V_m}{LC}$$

حيث ( $V_m$ ) هي ذروة فولتية الإدخال للمرشح، ( $L$ ) حثية الملف الخانق بالهنري، ( $C$ ) سعة المتسعة بالفاراد. وتعطى القيمة الصغرى لحثية الملف الخانق (المحاثة الحرجة) عند تردد خط قدرة مقداره (60Hz) بالعلاقة:

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

وكلما كانت قيمة الحثية اكبر من المحاثة الحرجة يكون الترشيح افضل.

**مثال (3-3):** الملف الخانق في الشكل التالي له مقاومة مستمرة قيمتها ( $22\Omega$ )، اوجد الفولتية المستمرة على الحمل علماً بان ذروة الفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة هي (30V)، افرض ان الثنائيات مثالية.



**الحل:**

ان قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من مرشح الإدخال الخانق ( $V_{dc}$ ) تعطى بالعلاقة:

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

لذا نحتاج ان نجد قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة، والتي تعطى:

$$V'_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 \times 30}{\pi}$$

$$V'_{dc} = 19.1V$$

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

$$V_{dc} = \left( \frac{550}{22 + 550} \right) (19.1)$$

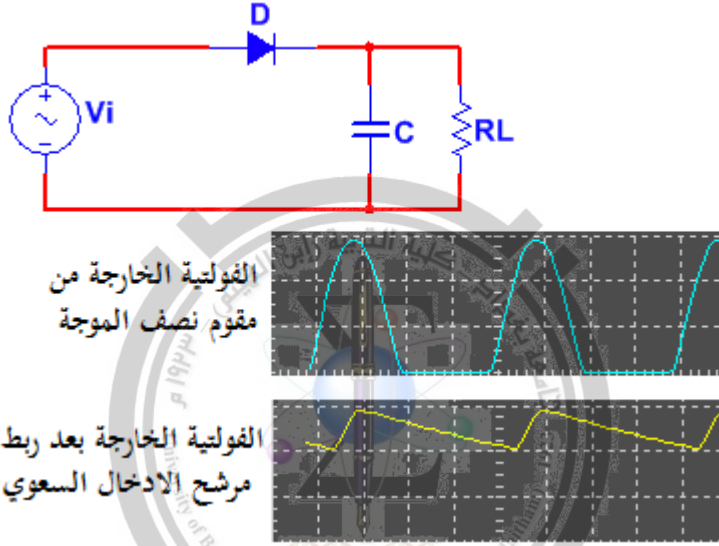
$$V_{dc} = 18.37V$$

## ثانياً: مرشح الإدخال السعوي (Capacitive-Input Filter)

على الرغم من كون مرشح الإدخال الخانق ممتازاً في توهين التموج ولكنه كبير الحجم وغالي الثمن، لذا وجدت مرشحات أخرى منها مرشح الإدخال السعوي الذي يمتاز بصغر الحجم ورخص الثمن ويكون بنوعين:

### أ- مرشح الإدخال السعوي لمقوم نصف موجة

الشكل (8-3) يوضح مرشح إدخال سعوي مع مقوم نصف موجة:



شكل (8-3) مرشح الإدخال السعوي لمقوم نصف الموجة

في خلال ربع الذبذبة الأول من فولتية الإدخال يكون الثنائي في وضع انحياز أمامي ويظهر مثالياً كأنه مفتاح مغلق، وبما ان الثنائي يربط المصدر (الإدخال) على المتسعة مباشرة فانها تشحن إلى فولتية ذروة ( $V_m$ ) ويكون ثابت الزمن ( $R_f C$ ) للشحن قصير جداً (لكون مقاومة الثنائي الأمامية صغيرة). اما عند عبور الذروة الموجبة يتوقف الثنائي عن التوصيل (انحياز عكسي) وذلك لان المتسعة سُحنت لجهد الذروة ( $V_m$ ) وعندما تصبح فولتية الإدخال اقل من جهد الذروة فان الثنائي يكون منحاز عكسياً (جهد الجهة n اكثر موجبية من جهد الجهة p)، وبما ان الثنائي في حالة عدم توصيل (انحياز عكسي)، تبدأ المتسعة بالتفريغ خلال مقاومة الحمل ( $R_L$ ) ويكون ثابت الزمن ( $R_L C$ ) اكبر بكثير من فترة ذبذبة إشارة الإدخال ( $T$ ) ولهذا السبب فان المتسعة ستفقد جزءاً صغيراً من شحنتها. وبالقرب من ذروة الإدخال التالية يتحول الثنائي إلى وضع التوصيل (انحياز أمامي) لمدة وجيزة ويعيد شحن المتسعة إلى جهد

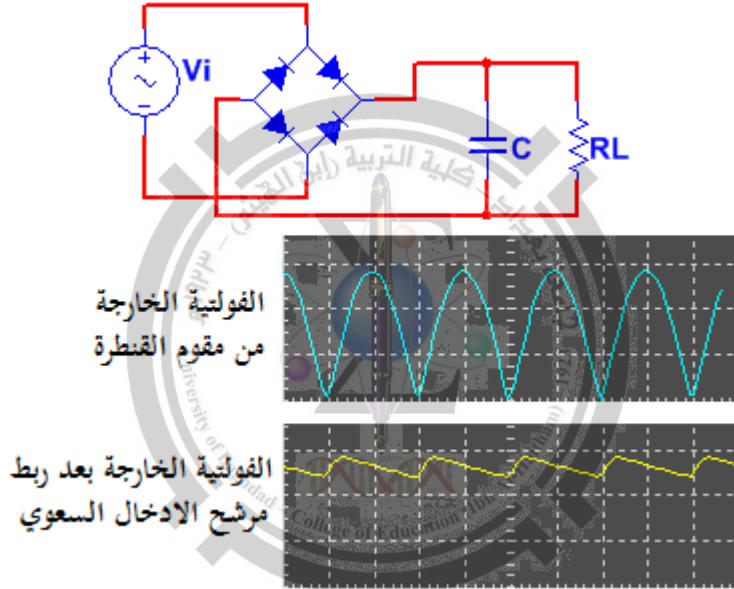


الذروة وهكذا تتكرر العملية، يعطى عامل التموج لمرشح سعوي مع مقوم نصف الموجة بالصيغة:

$$r = \frac{1}{2\sqrt{3} fCR_L} \quad (3 - 25)$$

### ب- مرشح الإدخال السعوي لمقوم موجة كاملة

ان مقوماً بمأخذ وسطي أو قنطري المربوط مع متسعة ينتج ترشيح افضل لان المتسعة تشحن مرتين كما موضح بالشكل (9-3)، ونتيجة لذلك يكون التموج اصغر وتقترب فولتية الإخراج المستمرة من فولتية الذروة.



شكل (9-3) مرشح الإدخال السعوي لمقوم الموجة الكاملة

يعطى عامل التموج لمرشح سعوي مربوط مع مقوم موجة كاملة بالصيغة:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3} fCR_L}$$

وللحصول على ثابت زمن طويل، يجب ان يكون حاصل ضرب ( $R_L$ ) في ( $C$ ) أي ( $R_L C$ ) اكبر بكثير (عشر مرات على الأقل) من الزمن الدوري ( $T$ ) للفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة، أي ان الشرط هو ان يكون ( $R_L C \geq 10T$  او  $R_L C \geq 5/f_i$ )، وفي حالة تحقق هذا الشرط يمكننا استعمال التقريبات التالية في حالة كون التردد للفولتية الداخلة للمقوم الموجة الكاملة هو (60Hz):

حيث تعطى قيمة المركبة المتناوبة الخارجة من المرشح بالصيغة:

$$V_{dc} = \left(1 - \frac{0.00417}{R_L C}\right) V_m$$

و تعطى القيمة الفعالة للتموج بالعلاقة:

$$V_r = \frac{0.0024 V_m}{R_L C}$$

اما اصغر قيمة للمتسعة التي يمكن ان تقوم بعملية الترشيح بصورة صحيحة فتعطى بالعلاقة:

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

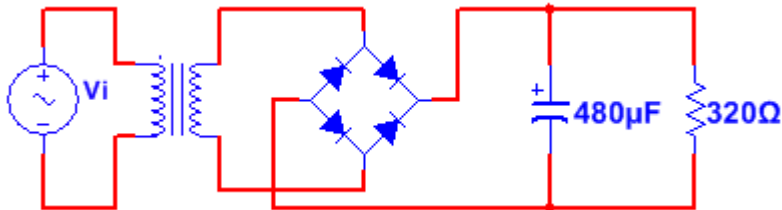
الشكل (10-3) يوضح لوحة الكترونية تتضمن مقوم قنطرة مكون من أربعة ثنائيات بالإضافة لمتسعي ترشيح، يكثر استعمال مثل هذه اللوحات في الدوائر الإلكترونية وتكون مهمتها توفير فولتية تشغيل مستمرة بالاعتماد على فولتية ادخل متناوبة.



شكل (10-3) لوحة الكترونية تتضمن مقوم قنطرة ومرشح متسعة

**مثال (3-4):** اذا علمت ان ذروة الفولتية الثانوية (32V) وترددتها (60Hz) في الشكل

التالي، اوجد فولتية الإخراج المستمرة و مقدار التموج؟ (اهمل هبوط الفولتية على الثنائي)



**الحل:**

قبل تطبيق العلاقات التقريبية يجب أولاً التحقق من تحقق الشرط:

$$R C = 320 \times 480 \times 10^{-6}$$

$$R C = 153msec$$

$$\frac{5}{f_i} = \frac{5}{60} = 83.3msec$$

$$R C \geq 5/f_i$$

من النتيجة السابقة نلاحظ تحقق الشرط، وبالتالي يمكننا استعمال العلاقات التقريبية، ومنها نجد قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من المرشح باستعمال العلاقة:

$$V_{dc} = \left(1 - \frac{0.00417}{R C}\right) V_m$$

$$V_{dc} = \left(1 - \frac{0.00417}{320 \times 480 \times 10^{-6}}\right) (32)$$

$$V_{dc} = 31.14V$$

القيمة الفعالة للمركبة المتناوبة الخارجة من المرشح فتعطي بالعلاقة:

$$V_r = \frac{0.0024V_m}{R C}$$

$$V_r = \frac{0.0024(32)}{320 \times 480 \times 10^{-6}}$$

$$V_r = 0.5V$$

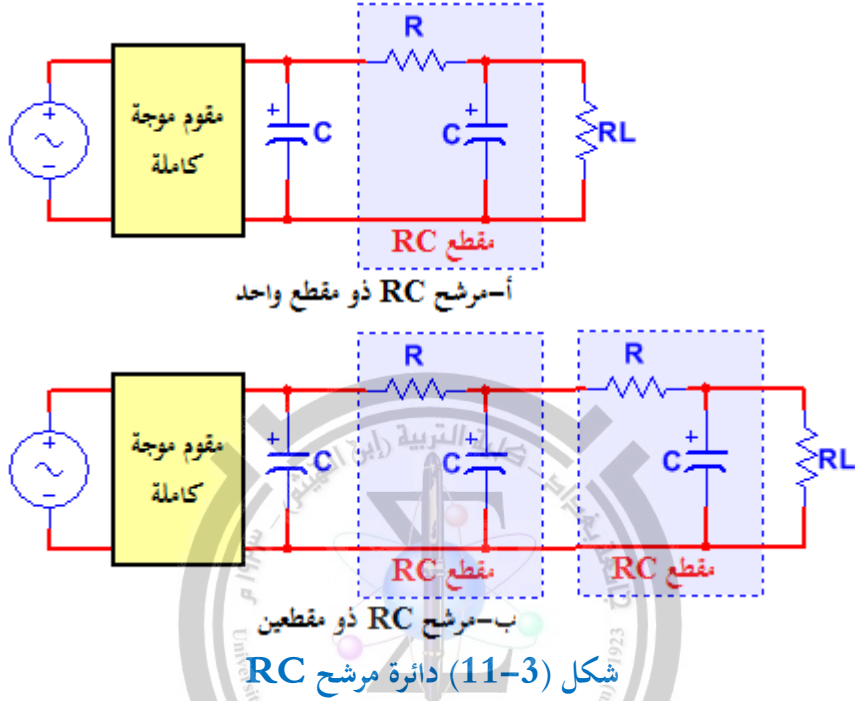
عندما يكون ثابت الزمن طويلاً (أي يتحقق الشرط  $R_L C \geq 5/f_i$ ) يمكن إهمال تموج الإخراج في مرشح الإدخال السعوي نتيجة صغره، ولكن عندما يكون ثابت الزمن قصيراً (لا يتحقق الشرط) فيجب ان نستخدم ترشيحاً إضافياً لتقليل التموج الذي يكون كبيراً، ومن تلك المرشحات مرشح RC ومرشح LC .

### ثالثاً: مرشح RC (RC-Filter)

يبين الشكل (3-11أ) مرشح RC يقع بين متسعة الإدخال ومقاومة الحمل. اذا كان التصميم جيداً تكون قيمة المقاومة R اكبر بكثير من  $X_C$ ، لذلك تعمل الدائرة عمل مقسم فولتية متناوبة، ولان  $(R \gg X_C)$  فان تموج الإخراج يكون اقل من تموج الإدخال. وتكون R نموذجياً عشرة اضعاف  $X_C$  على الأقل، وهذا يعني توهين أو تقليل تموج الإخراج بعامل قيمته 10 مرات على الأقل.

بالإمكان استعمال اكثر من مقطع واحد كما مبين في الشكل (3-11ب)، وبما ان كل مقطع يعمل عمل مقسم فولتية متناوبة فأن التوهين الكلي يساوي حاصل ضرب مقادير

التوهين كافة، فلو قلل كل مقطع التوهين بعامل مقداره 15 مرة، فيكون التوهين الكلي لمرشح  $(RC)$  لمقطعين هو 225 ولثلاث مقاطع هو 3375 .

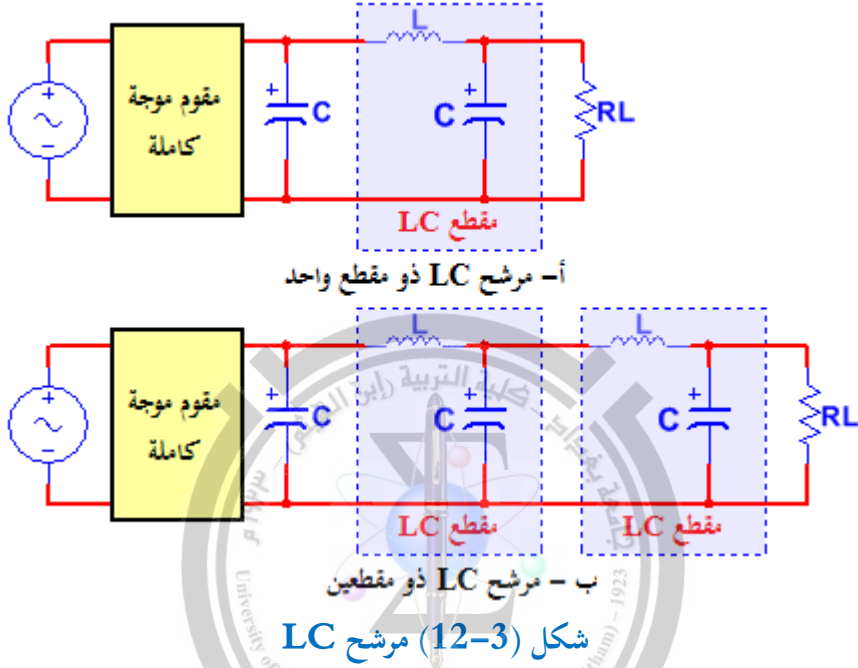


ان العيب الرئيسي في مرشح  $RC$  هو الخسارة في الفولتية المستمرة على المقاومة  $R$ ، بما ان المقاومة  $R$  مبربوطة على التوالي مع مقاومة الحمل  $R_L$  فانها تشكل معها مجزئ للفولتية المستمرة. ولذلك فاننا نحتاج من جهة إلى  $R$  كبيرة (مقسم الفولتية المتناوبة) لنحصل على ترشيح جيد، كما اننا من الجهة الأخرى نحتاج إلى  $R$  صغيرة لنمنع الخسارة الكبيرة في الفولتية المستمرة (مقسم الفولتية المستمرة). و نظراً لهذين المطلبين المتناقضين يمكن استعمال مرشح  $RC$  عملياً عند تيارات الحمل القليلة ( $R_L$  كبيرة) فقط.

#### رابعاً: مرشح LC (LC-Filter)

يفضل مرشح LC عندما يكون تيارات الحمل كبيرة ( $R_L$  صغيرة). الشكل (3-12) يوضح مرشح  $RC$  ذو مقطع واحد وذو مقطعين. كما هو الحال في مرشح الإدخال الخائق فان  $(X_L \gg X_C)$ ، نموذجياً تكون  $X_L$  اكبر عشرة مرات من  $X_C$  على الأقل، لذلك يتوهن التموج بعامل قدره 10 مرات على الأقل.

بالإمكان استعمال اكثر من مقطع LC واحد كما موضح بالشكل السابق، وبما ان كل مقطع يعمل عمل مقسم فولتية متناوبة، يكون التوهين الكلي مساوياً لحاصل ضرب التوهينين، فمثلاً لو قلل كل مقطع التموج بعامل مقداره 20 فان التوهين الكلي لمقطعين يكون 400 وهكذا.



### 2.3 دوائر تشكيل الموجة

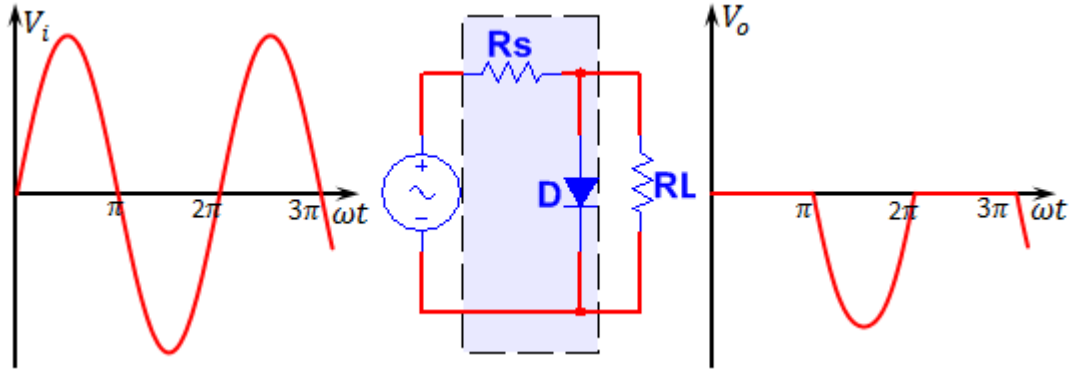
بالإضافة لاستعمال ثنائي أشباه الموصلات في دوائر التقويم الموجي، فان لها استعمالات أخرى في دوائر تعمل على تغيير شكل الموجة والتي تسمى بدوائر التشكيل الموجي، وهي كالتالي:

#### 1.2.3 التحديد (Clipper) وأنواعه

هي دوائر لها القابلية على تحديد (قطع) جزء من إشارة الإدخال عند مستوى معين من دون إحداث أي تغيير في الجزء المتبقي من الإشارة. وتستعمل دوائر التحديد في تطبيقات مثل الرادار والحاسبات الرقمية ومنظومات الكترونية أخرى، وهي على عدة أنواع منها:

#### أ- المحدد (المُقلّم) الموجب (Positive Clipper)

يقوم المحدد الموجب بتحديد (قطع) الجزء الموجب من إشارة الإدخال، الشكل (3-13) يوضح دائرة المحدد الموجب، والإشارة الداخلة والخارجة من المحدد الموجب.



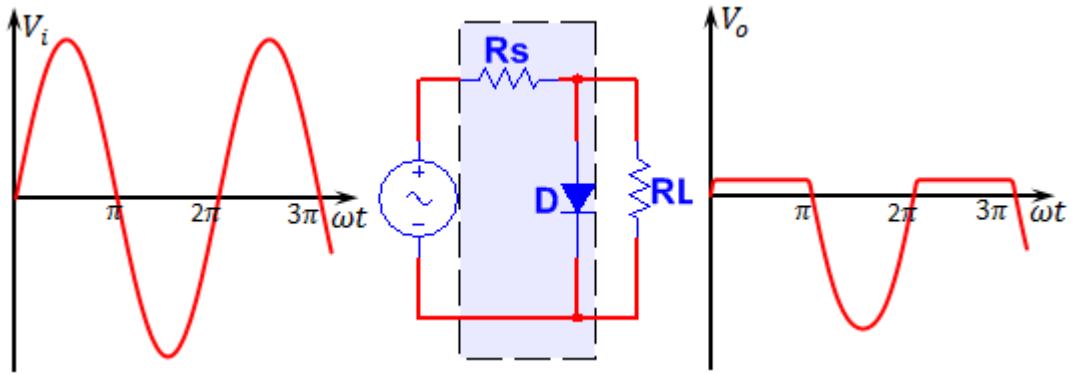
شكل (3-13) دائرة المحدد الموجب باعتماد التقريب الأول للثنائي

عمل الدائرة يكون بالصورة التالية: خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز أمامياً وفي حالة اعتبار الثنائي مثالي (تقريب أول) فإنه يمكن اعتباره دائرة قصر (مقاومة أمامية صفر) وعندها تكون فولتية الإخراج (الفولتية على طرفي مقاومة الحمل  $R_L$ ) تساوي صفر بينما تظهر فولتية الإدخال على المقاومة  $R_S$  (والتي وضعت أساساً لتحديد التيار الأمامي المار بالثنائي لكي لا يتجاوز أقصى تيار أمامي للثنائي). خلال النصف السالب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً ويكافئ دائرة مفتوحة وبالتالي فإن الدائرة تصبح مقسم جهد وتعطى فولتية الإخراج بالعلاقة:

$$V = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_m$$

عادة ما تكون  $(R_L \gg R_S)$  وعندها يمكن استعمال التقريب  $(V_o \approx V_i)$ ، ونتيجة لذلك تكون الفولتية الخارجة مطابقة تماماً لفولتية الإدخال في جزئها السالب. لذلك تظهر فولتية الإخراج قد تحددت بمقدار أقصاه (صفر فولت) كما هو موضح بالشكل السابق.

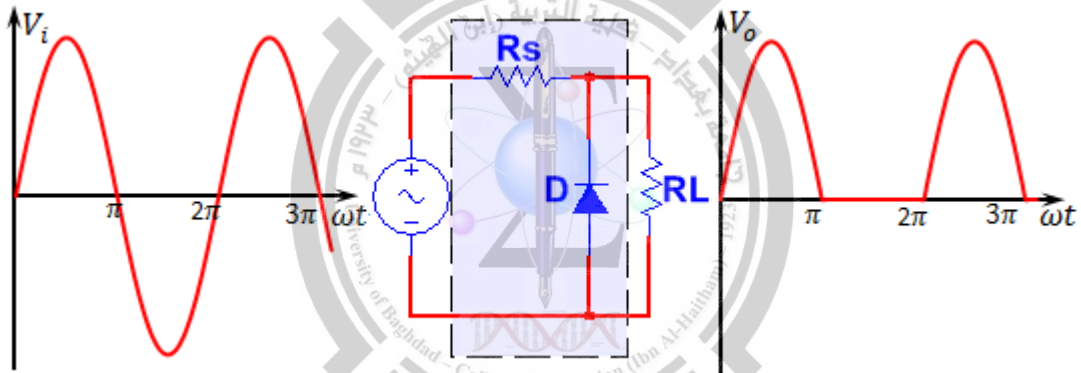
ان الشرح السابق قد اعتمد على التقريب المثالي للثنائي، ولتوخي الدقة أكثر يجب الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للوصلة (التقريب الثاني)، فالثنائي في حالة الانحياز الأمامي لا يسمح بمرور التيار إلا بعد ان تتغلب الفولتية الأمامية على جهد الحاجز ولذلك فإن الإشارة سوف تقطع بالقرب من جهد الحاجز ( $0.7V$  لثنائي السليكون و  $0.3V$  لثنائي الجرمانيوم)، الشكل (3-14) يوضح الفولتية الداخلة والخارجة من المحدد الموجب باعتماد التقريب الثاني.



شكل (3-14) دائرة المحدد الموجب باعتماد التقريب الثاني للثنائي

### ب- المحدد (المُقلّم) السالب (The Negative Clipper)

هي دائرة تقوم بتحديد (قطع) الجزء السالب من موجة الإدخال، الشكل (3-15) يوضح دائرة المحدد السالب وشكل الفولتية الداخلة والخارجة في حالة التقريب الأول.



شكل (3-15) دائرة المحدد السالب باعتماد التقريب الأول

خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة وتصبح الدائرة مقسم جهد وتظهر معظم الفولتية الداخلة على مقاومة الحمل  $(R_L \gg R_S)$ ، خلال النصف السالب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز أمامياً وكتقريب أول يكون بمثابة دائرة قصر وتكون فولتية الإخراج صفر و يظهر الجزء السالب من موجة الإدخال على المقاومة  $R_S$ ، وبالتالي فان المحدد السالب يعمل على تحديد (قطع) الجزء السالب من موجة الإدخال عند مستوى الصفر.

في حالة اعتماد التقريب الثاني للثنائي فان تحديد الجزء السالب يكون عند قيمة قريبة من جهد الحاز للثنائي.

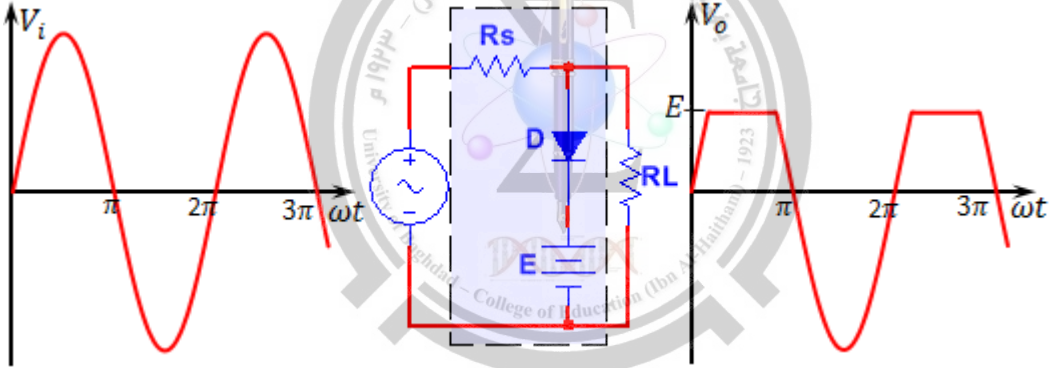
## ج - المحدد المنحاز (The Biased Clipper)

ان دائرة المحدد الموجب مثلاً تحدد المستوى الموجب عند مستوى صفر فولت عند اعتماد التقريب المثالي للثنائي أو عند (0.7V) لثنائي السليكون كتقريب ثاني، غير انه في بعض التطبيقات تكون هناك حاجة لحذف جزء بسيط من الجزء الموجب أو السالب لموجة الإدخال أو حذف جزء اكبر من نصف الموجة، ولذلك تستعمل دوائر المحدد المنحاز للسيطرة على المستوى الذي يتم عنده التحديد، ان التحكم بمستوى التحديد يتم من خلال تسليط فولتية تحييز خارجية عن طريق ربط بطارية (أو مصدر جهد مستمر) على التوالي مع الثنائي. وهناك ثلاثة أنواع من دوائر التحديد المنحاز هي:

### 1- المحدد الموجب المنحاز (Biased Positive Clipper)

الشكل (3-16) يوضح دائرة المحدد الموجب المنحاز، فيما يلي شرح لعمل دائرة المحدد

الموجب المنحاز.



شكل (3-16) دائرة المحدد الموجب المنحاز

في بداية النصف الموجب من موجة الإدخال ( $V_i < E$ ) يكون الثنائي منحازاً عكسياً لكون جهة الانود p اقل موجبية من جهة الكاثود n (لكل قيم فولتية الإدخال الأقل من جهد البطارية)، كما موضح بالشكل التالي وفي هذه الحالة يكون:

$$V = IR_L = V_i \frac{R_L}{R_S + R_L}$$

$$V = V_i, \text{ for } V_i < E$$

عادة ما تكون ( $R_L \gg R_S$ ) وبالتالي يكون:



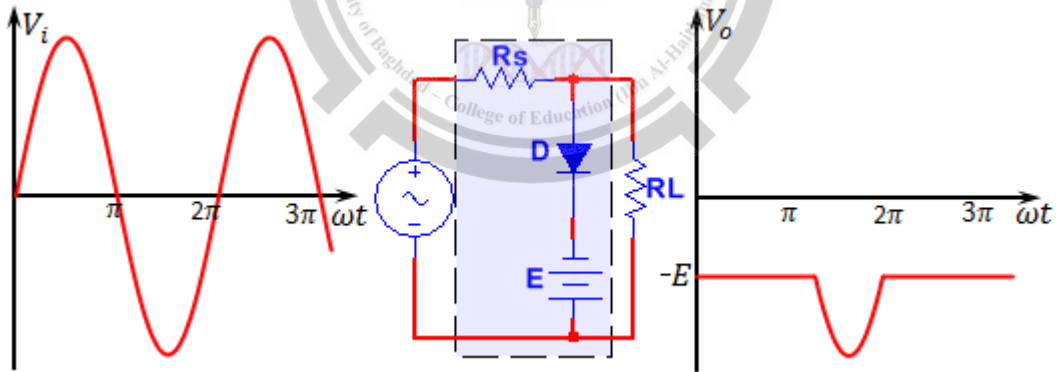
وعندما تتغلب فولتية الإدخال على جهد البطارية يصبح الثنائي منحاز أمامي وبتصرف كدائرة مغلقة ويصبح جهد الإخراج مساوياً لجهد البطارية ( $V_o = E$ ) وبالنتيجة تتحدد الذروة الموجبة عند جهد البطارية.

في حالة التقريب الثاني فإن الثنائي لكي يمرر تيار يجب ان تتغلب فولتية الإدخال على جهد الحاجز، وبالتالي فإن فولتية الإخراج ستتحدد بالقيمة ( $E + V_B$ )، وبتعبير آخر فإن فولتية الإخراج حسب التقريب الثاني يمكن التعبير عنها بالصيغة:

$$V = V_i, \text{ for } V_i < E$$

$$V = E + V_B, \text{ for } V_i > E$$

في حالة عكس قطبية البطارية المستعملة في دائرة المحدد الموجب المنحاز فإن مستوى التحديد (القطع) سوف يكون عند ( $-E$ )، إذ يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي خلال كامل النصف الموجب لفولتية الإدخال حيث يكون ( $V_o = -E$ )، خلال النصف السالب يبقى الثنائي في حالة انحياز أمامي ( $V_o = -E$ ) إلى ان تتغلب فولتية الإدخال السالبة على جهد البطارية، عندها يصبح الثنائي منحاز عكسياً (جهد الانود اكثر سالبية من جهد الكاثود) وتصبح فولتية الإخراج مساوية لفولتية الإدخال ( $V_o = V_i$ )، الشكل (3-17) يمثل دائرة المحدد المنحاز الموجب بعد عكس البطارية وشكل الفولتية الداخلة اليه والخارجة منه.

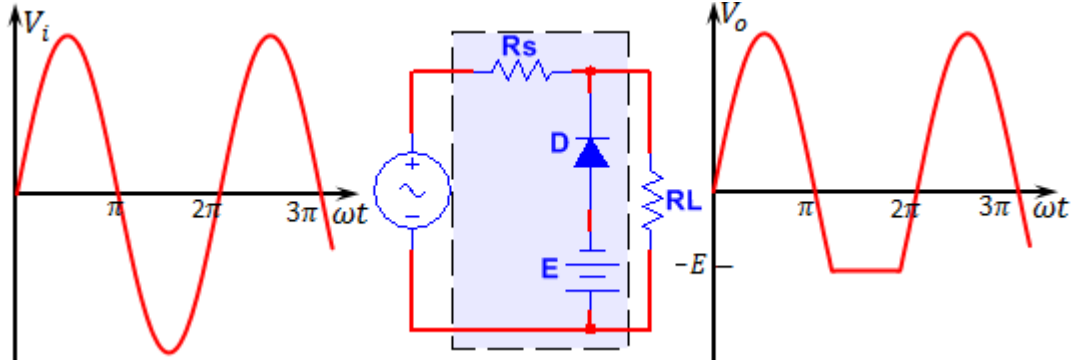


شكل (3-17) دائرة المحدد الموجب المنحاز مع عكس قطبية البطارية

## 2- المحدد السالب المنحاز (Biased Negative Clipper)

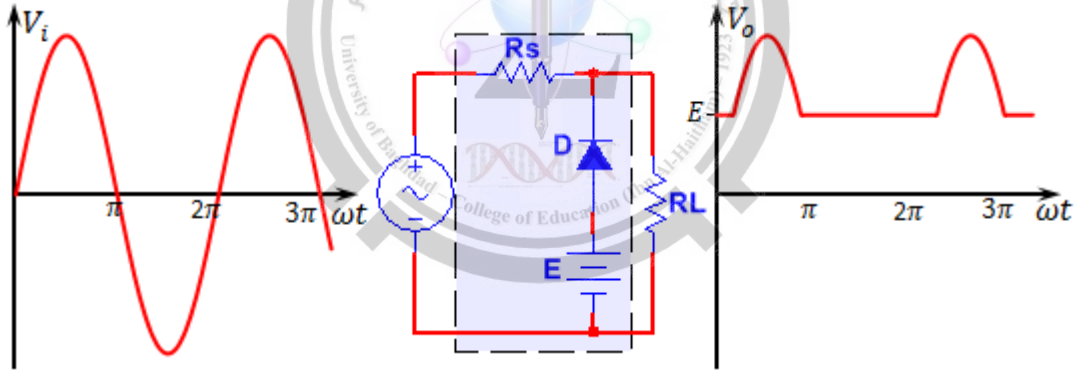
تقوم دائرة المحدد السالب المنحاز بتحديد الجزء السالب من الإشارة عند قيمة جهد البطارية، خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً وعندها يكون ( $V_o = V_i$ )، وخلال النصف السالب يبقى الثنائي منحاز عكسياً إلى ان تتغلب قيمة فولتية

الإدخال السالبة على قيمة جهد البطارية وعندها فقط يصبح الثنائي منحازاً أمامياً وتصبح فولتية الإخراج ( $V_o = -E$ ). الشكل (18-3) يوضح دائرة المحدد السالب المنحاز والفولتية الداخلة والخارجة.



شكل (18-3) دائرة المحدد السالب المنحاز

في حالة اعتماد التقريب الثاني، فإن التحديد عند الجزء السالب سوف يكون عند  $(-E - V_B)$ . أما عند قلب قطبية البطارية المستعملة في دائرة المحدد السالب فان شكل فولتية الإخراج سوف يكون بالصورة الموضحة بالشكل (19-3).



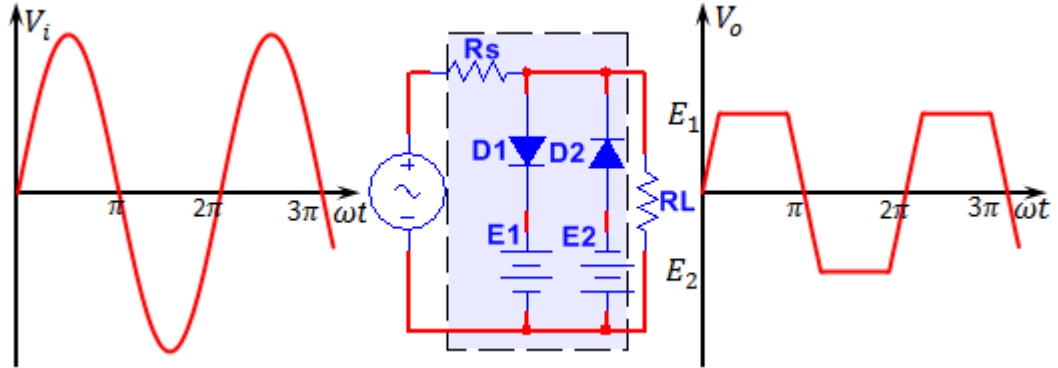
شكل (19-3) دائرة المحدد السالب المنحاز مع عكس قطبية البطارية

### 3- المحدد المركب المنحاز

نحصل على المحدد المركب المنحاز عن طريق ربط محدّد موجب منحاز مع محدّد سالب منحاز كما موضح بالشكل (20-3).

خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يقوم المحدد الموجب المنحاز بتحديد الجزء الموجب عند مستوى جهد البطارية ( $E_1$ )، أما خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيقوم المحدد السالب المنحاز بتحديد الجزء السالب من فولتية الإدخال عند جهد البطارية ( $E_2$ )،

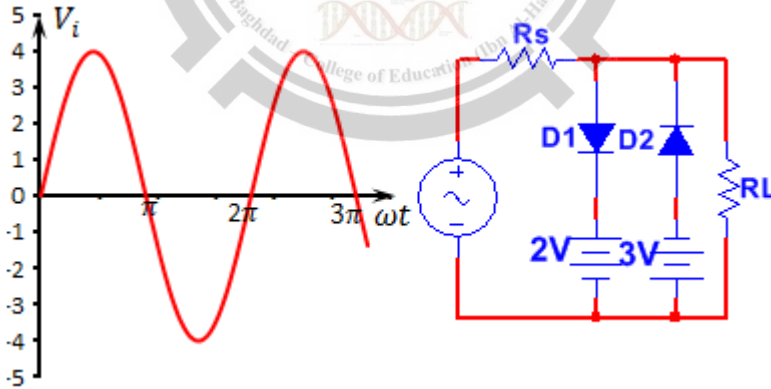
وعند اعتماد التقريب الثاني للتثائي فان تحديد الذروة الموجبة يكون عند  $(E_1 + V_B)$  والذروة السالبة تتحدد عند  $(-E_2 - V_B)$ .



شكل (20-3) دائرة المحدد المركب المنحاز

في حالة كون جهد بطارية المحدد الموجب المنحاز مساوياً لجهد بطارية المحدد السالب المنحاز  $(E_1 = E_2)$  فان القطع سيكون متماثلاً لنصفي موجة الإدخال، وفي حالة خاصة اذا كانت  $(E_1 = E_2)$  وكانت ذروة فولتية الإدخال اكبر بكثير من جهد بطارية التحيز  $(V_m \gg E)$  فان شكل موجة الإخراج سيكون مربعاً.

**مثال (5-3):** ارسم شكل الموجة الخارجة من الدائرة الموضحة بالشكل التالي، اعتبر ان التثائيات مثالية وان  $(R_L \gg R_S)$ .

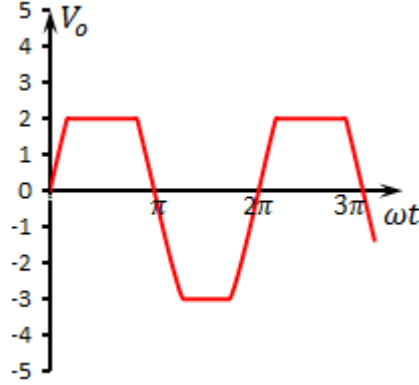


**الحل:**

ان الدائرة هي محدّد مركب منحاز ونظراً لكون  $(R_L \gg R_S)$  لذا يمكن إهمال الجهد على المقاومة  $(R_S)$ .

في حالة اعتماد التقريب المثالي للتثائي، يقوم المحدد الموجب المنحاز بتحديد فولتية الإخراج عند قيمة جهد بطارية المحدد الموجب  $(2V)$  بينما يقوم المحدد السالب بتحديد الجزء

السالب عند قيمة جهد بطارية المحدد السالب ( $-3V$ )، ويكون شكل الموجة الخارجة كما في الشكل التالي.



### 2.2.3 الإلزام وأنوعه (Clamper)

في بعض الاحيان تكون هناك حاجة لإضافة مستوى فولتية مستمرة لإشارة الإدخال، وتسمى الدوائر التي تعمل على إضافة مركبة مستمرة إلى إشارة الإدخال بدوائر الإلزام. وتعتبر دوائر الإلزام شائعة الاستعمال في الدوائر الإلكترونية ومن أمثلتها التلفاز حيث تستعمل لإضافة فولتية مستمرة لإشارة الصورة، ويسمى الملزم المستعمل في التلفاز عادة بمستعيد المركبة المستمرة (dc restorer).

تتكون دوائر الإلزام بشكل رئيسي من ثلاثة عناصر هي متسعة ، ثنائي شبه موصل ومقاومة، يمكن تقسيم دوائر الإلزام تبعاً لقطبية الفولتية المضافة إلى:

1- الملزم الموجب

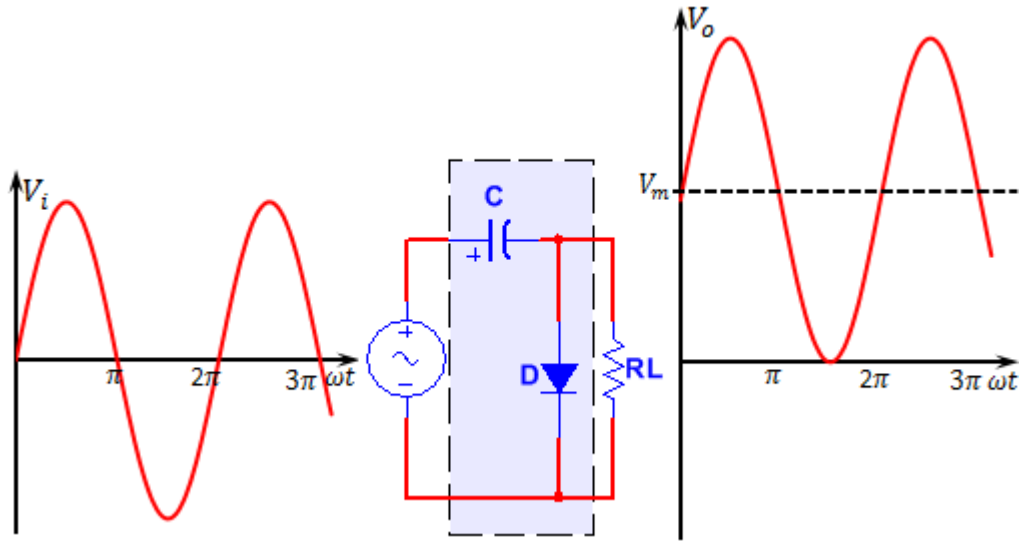
2- الملزم السالب

وفيما يلي شرح لكلا النوعين:

#### أولاً: الملزم الموجب (Positive Clamper)

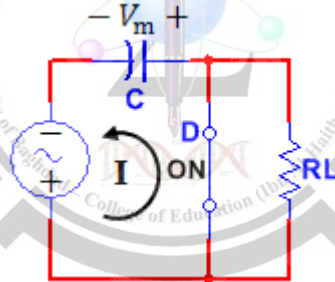
الشكل (3-21) يمثل دائرة الملزم الموجب والإشارة الداخلة والخارجة منه.

اما عمل دائرة الملزم الموجب فيكون كالتالي:

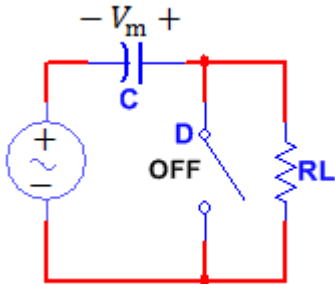


شكل (3-21) دائرة الملتزم الموجب

خلال الربع الأول من النصف السالب من إشارة الإدخال يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي وفي حالة اعتبار الثنائي مثالي يكون بمثابة دائرة قصر، وبالنتيجة تشحن المتسعة بسرعة إلى جهد الذروة لإشارة الإدخال ( $V_m$ ) وبالقطبية الموضحة بالشكل التالي.



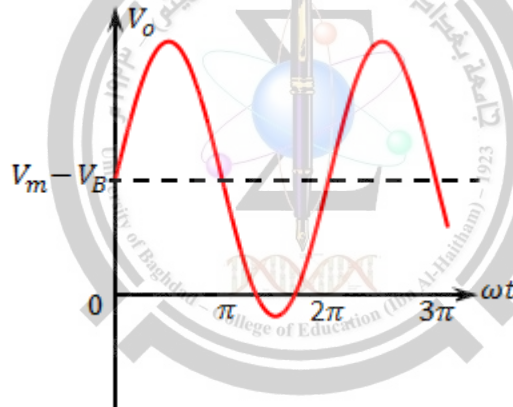
ضمن النصف السالب و بعد تجاوز إشارة الإدخال الذروة السالبة يصبح الثنائي منحاز عكسياً ( جهة  $n$  اكثر موجبية من جهة  $p$ ). خلال النصف الموجب التالي يكون الثنائي منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة، ويتأثير فرق الجهد على طرفي المتسعة يكون الثنائي منحاز عكسياً خلال الانصاف الموجبة والسالبة التالية، وكما هو موضح بالشكل التالي.



بافتراض ان ثابت الزمن ( $R_L C$ ) اكبر بكثير من الزمن الدوري لإشارة الإدخال ( $T$ ) فان المتسعة تبقى محافظة على شحنتها دائماً، وكتقريب أول يمكن اعتبار المتسعة تقوم بعمل بطارية جهدها ( $V_m$ ) مربوطة على التوالي مع إشارة الإدخال.

يتضح من ما سبق ان دائرة الملزم الموجب تقوم بإضافة مركبة إلى إشارة الإدخال تساوي ذروة إشارة الإدخال، وبتعبير آخر فان كل نقطة على إشارة الإدخال سوف تتزاح نحو الاتجاه الموجب بمقدار ذروة إشارة الإدخال فتظهر الموجة بأكملها في الجزء الموجب ولهذا تسمى بالملزم الموجب.

من الناحية العملية ثنائي أشباه الموصلات في الانحياز الأمامي لا يمرر التيار إلا بعد ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد الحاجز ( $V_B$ )، ولذا كتقريب ثاني فان المتسعة سوف تشحن لجهد قدره ( $V_m - V_B$ ) ويكون مقدار الإزاحة لإشارة الإدخال هو ( $V_m - V_B$ )، الشكل التالي يوضح فولتية الإخراج لملزم موجب باعتماد التقريب الثاني للثنائي.



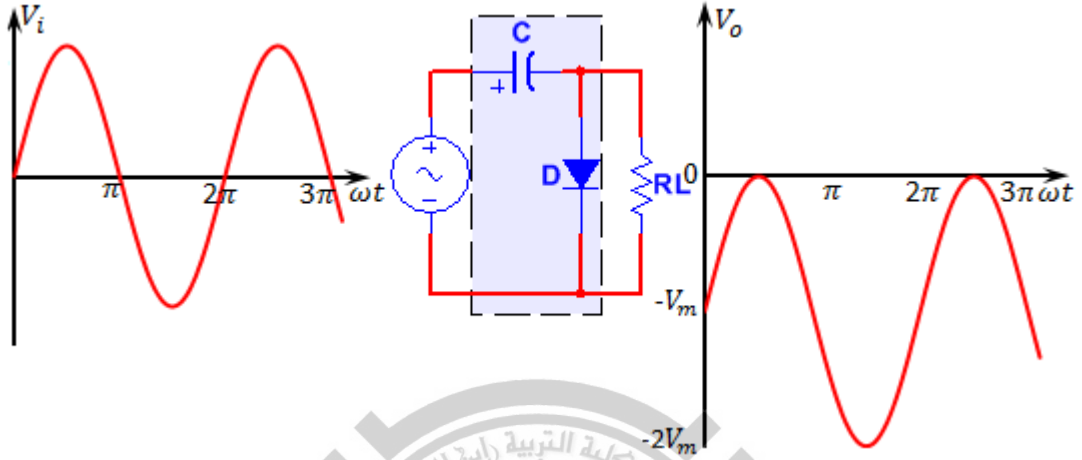
بخصوص فولتية الذروة العكسية التي يتعرض لها الثنائي في دائرة الملزم الموجب نجدها تساوي ضعف قيمة ذروة الإدخال ( $2V_m$ ).

بالإمكان التحكم في مستوى الإلزام الموجب من خلال ربط بطارية خارجية على التوالي، وعندها ستضاف (أو تطرح) ازاحة إضافية للإشارة الخارجة بمقدار يساوي جهد البطارية تبعاً لطريقة ربط البطارية.

### ثانياً: الملزم السالب (Negative Clamper)

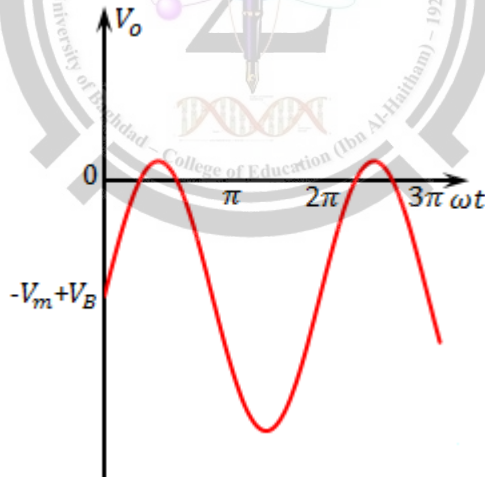
يتكون الملزم السالب من نفس العناصر التي يتكون منها الملزم الموجب ولكن باختلاف قطبية الثنائي والذي بدوره يؤدي إلى اختلاف قطبية الفولتية التي سوف تشحن بها المتسعة.

نلاحظ ان دائرة الملزم السالب قد عملت على الزام إشارة الإخراج بالجزء السالب، سوف يترك شرح عمل دائرة الملزم السالب كواجب للطالب. الشكل (3-22) يوضح دائرة الملزم السالب والإشارة الداخلة والخارجة منه.



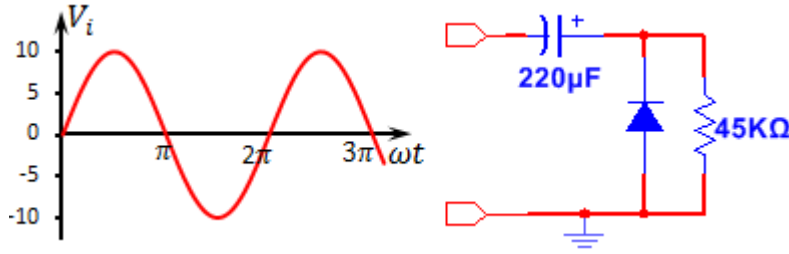
شكل (3-22) دائرة الملزم السالب

عند اعتماد التقريب الثاني للثنائي، فان الإلزام السالب لن يكون عند مستوى الصفر بل ينزاح قليلاً فوق مستوى الصفر (بحدود جهد الوصلة للثنائي) وكما هو موضح بالشكل التالي:

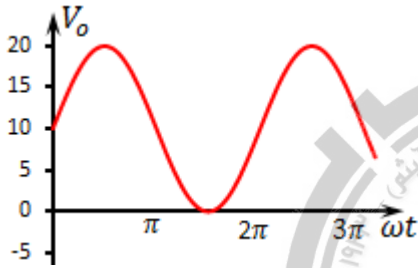


كما ويمكن التحكم بمستوى الإلزام السالب من خلال إضافة بطارية تحييز على التوالي مع الثنائي، حيث يزاح مستوى الإلزام فوق أو اسفل مستوى الصفر حسب قيمة طريقة ربط البطارية وجهدها.

**مثال (3-6):** ارسم الإشارة الخارجة على طرفي مقاومة الحمل في الدائرة التالية، على فرض ان ثابت الزمن للدائرة كبير جداً والثنائي مثالي.



**الحل:** نلاحظ ان الدائرة هي دائرة ملزم موجب غير منحاز، وعليه تكون إشارة الإخراج ملزمة عند الجزء الموجب، تكون الذروة السالبة لإشارة الإخراج ملزمة بمستوى الصفر اما الذروة الموجبة فتكون ملزمة بمستوى  $(2V_m)$  أي انها ملزمة بالمستوى  $(20V)$ ، وتكون إشارة الإخراج بالشكل التالي:



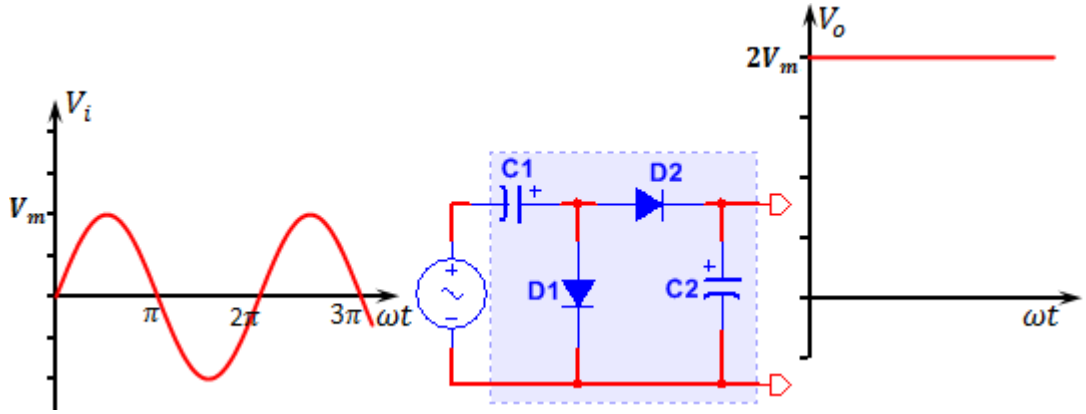
### 3.2.3 مضاعفات الفولتية (Voltage Multipliers)

هي دوائر تستعمل للحصول على فولتية إخراج مستمرة تقريباً بالاعتماد على فولتية إدخال متناوبة، وتستعمل تلك الدوائر في التطبيقات التي تحتاج إلى فولتية عالية مع تيار قليل (مقاومة حمل عالية) مثل تزويد أنبوبة الأشعة الكاثودية (CRO) المستعملة في راسم الإشارة و التفاز بالفولتية العالية. هناك عدة أنواع من دوائر مضاعفات الفولتية منها:

#### أ- مضاعف الفولتية للضعف (Voltage Doubler)

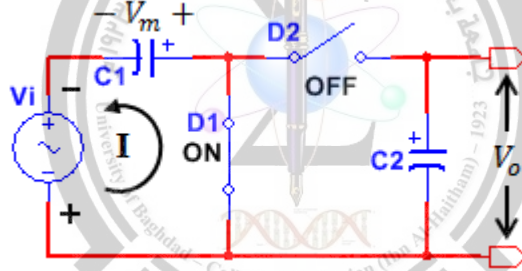
توفر هذه الدائرة فولتية مستمرة تساوي ضعف فولتية ذروة الإدخال  $(2V_m)$ . الشكل (3-23) يوضح دائرة مضاعف الفولتية لضعفين والإشارة الداخلة والخارجة منها.



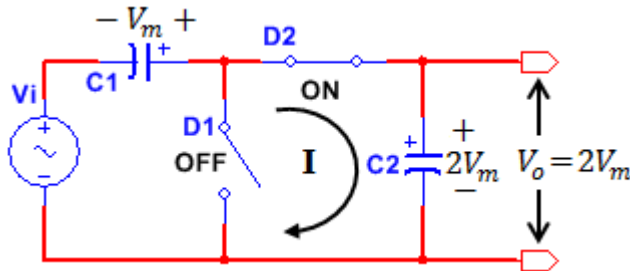


شكل (3-23) دائرة مضاعف الفولتية للضعف

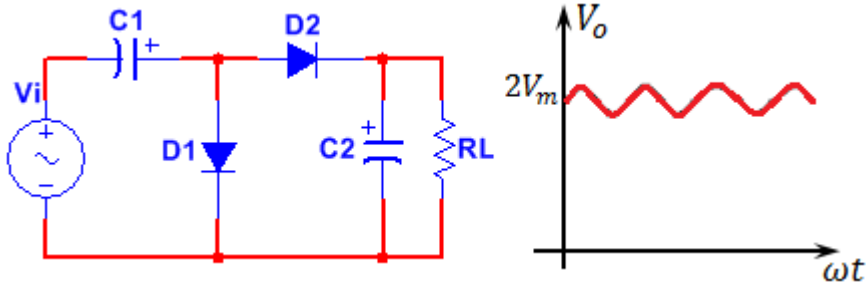
خلال النصف السالب من فولتية الإدخال يكون الثنائي ( $D_1$ ) منحاز أمامياً فيتصرف كدائرة مغلقة، ويكون الثنائي ( $D_2$ ) منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة، ونتيجة لذلك تشحن المتسعة ( $C_1$ ) عبر الثنائي ( $D_1$ ) إلى فولتية الذروة ( $V_m$ ) وبالقطبية الموضحة بالشكل التالي.



خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي ( $D_1$ ) منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة والثنائي ( $D_2$ ) منحاز أمامياً فيتصرف كدائرة مغلقة، ونظراً لوجود المتسعة ( $C_1$ ) المشحونة والتي يمكن اعتبارها كبطارية جهدها ( $V_m$ ) مربوطة على التوالي مع المصدر ولذلك تشحن المتسعة ( $C_2$ ) عبر الثنائي ( $D_2$ ) إلى جهد يعادل ضعف ذروة الإدخال ( $2V_m$ )، ويكون الإخراج على طرفي المتسعة ( $C_2$ ) كما موضح بالشكل التالي.



ان الفولتية المستمرة المتحصل عليها من المضاعف ينبغي الاستفادة منها في تطبيق معين (أي ربط حمل معين)، الشكل (24-3) يوضح دائرة مضاعف الفولتية بعد ربط حمل معين.

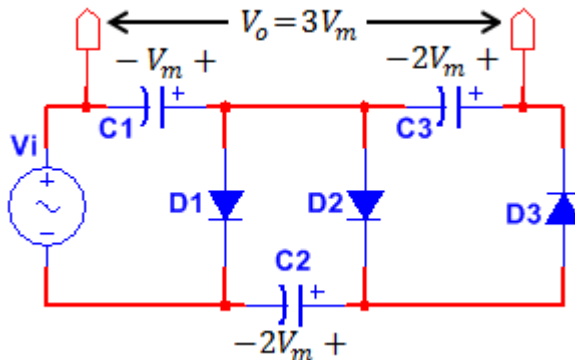


شكل (24-3) دائرة مضاعف الفولتية للضعف مع وجود حمل

وكما نلاحظ من الشكل فانه وبمجرد ربط الحمل ( $R_L$ ) فان المتسعة ( $C_2$ ) ستبدأ بتفريغ شحنتها عبر مقاومة الحمل، وكلما كان ثابت الزمن ( $R_L C$ ) اكبر كلما احتفظت المتسعة بشحنتها اكثر وعندها تكون فولتية الإخراج تقريبا مستمرة وتساوي ضعف ذروة الإدخال ( $V_o \approx 2V_m$ )، ولهذا السبب فان دوائر مضاعف الفولتية تكون مناسبة للتطبيقات التي تحتاج إلى فولتيات عالية وبتيارات قليلة (مقاومة حمل عالية).

### ب- مضاعف فولتية إلى ثلاثة أضعاف (Voltage Tripler)

بإضافة مقطع (ثنائي ومتسعة) ثالث لدائرة مضاعف الفولتية لضعفين نحصل على دائرة مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف الموضحة بالشكل (25-3). ان عمل أول مقطعين هو ذاته في دائرة مضاعف الفولتية لضعفين، وخلال ذروة الإدخال السالبة ينحاز الثنائي ( $D_3$ ) أماميا وت شحن المتسعة ( $C_3$ ) عبره إلى جهد ( $2V_m$ ).

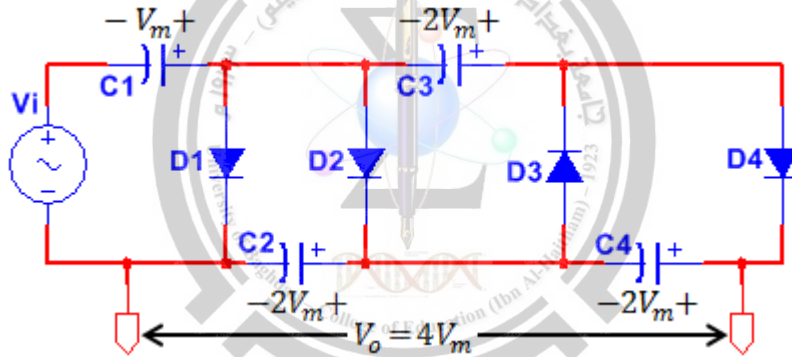


شكل (25-3) دائرة مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف

ان طرفي إخراج الدائرة يكون عبر المتسعتين ( $C_1$ ) و ( $C_3$ ) ، وترتبط مقاومة الحمل بين طرفي إخراج مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف، وكلما كان ثابت الزمن كبيراً تكون فولتية الإخراج تساوي تقريباً ثلاثة أضعاف ذروة الإدخال ( $V_o \approx 3V_m$ ).

### ج - مضاعف فولتية إلى أربعة أضعاف (Voltage Quadrupler)

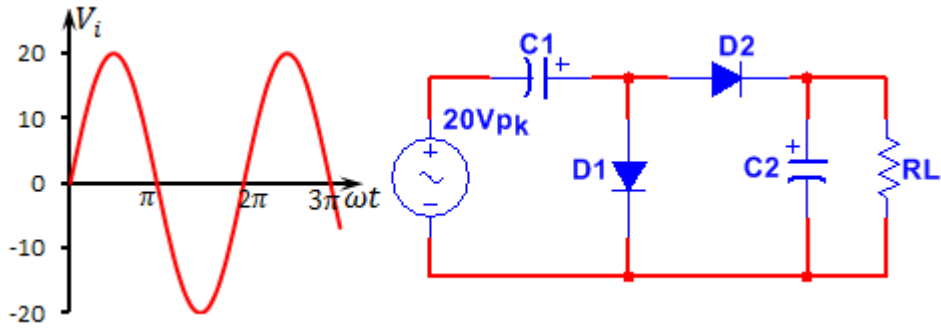
الشكل (3-26) يوضح مضاعف الفولتية لأربعة أضعاف، والتي تتضمن أربعة مقاطع (ثنائي-متسعة) وبشكل متتالي، المقاطع الثلاثة الأولى تمثل مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف، والمقطع الرابع يجعل الدائرة برمتها مضاعف لأربعة أضعاف، المتسعة الأولى ( $C_1$ ) تشحن إلى فولتية الذروة ( $C_m$ ) وجميع بقية المتسعات تُشحن إلى ضعف فولتية الذروة وبالقطبية الموضحة بالشكل. ان إخراج دائرة المضاعف لأربعة أضعاف يكون عبر متسعتين ( $C_2, C_4$ )، وبالإمكان ربط مقاومة حمل كبيرة (ثابت زمن كبير) على طرفي الإخراج لنحصل على فولتية مستمرة قيمتها تساوي أربعة أضعاف ذروة فولتية الإدخال ( $V_o \approx 4V_m$ ).



شكل (3-26) دائرة مضاعف الفولتية لأربعة أضعاف

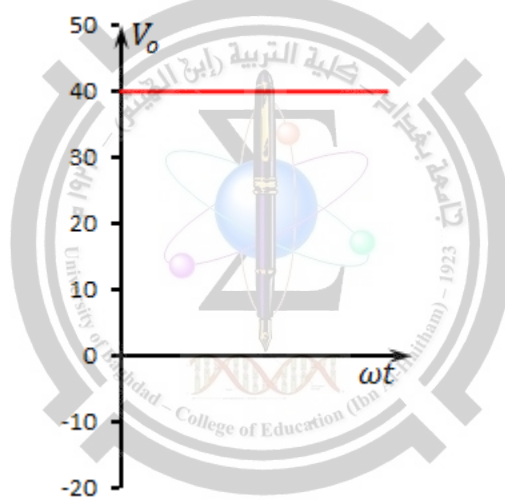
نظرياً يمكن إضافة عدد غير محدد من المقاطع، ولكن مقدار التموج في فولتية الإخراج تزداد مع كل إضافة لمقطع (ثنائي-متسعة). ان زيادة التموج هو السبب الذي يجعل مضاعفات الفولتية (لضعفين، ثلاثة أضعاف، أربعة أضعاف) غير مستعملة في أجهزة القدرة المستمرة واطئة الفولتية، وبذلك يقتصر استعمال دوائر مضاعفات الفولتية في التطبيقات التي تتطلب فولتيات عالية (مئات أو آلاف الفولتات) مع تيار قليل.

**مثال (3-7):** ارسم شكل الفولتية الخارجة من الدائرة التالية، اعتبر ان الثنائيات مثالية وثابت الزمن كبير.



**الحل:**

نلاحظ ان الدائرة هي مضاعف فولتية لضعفين، ولكون ثابت الزمن كبير جداً، فان الفولتية الخارجة من الدائرة ستكون فولتية مستمرة وذات قيمة تساوي ضعف ذروة الإدخال أي (40V)، ويكون شكل فولتية الإخراج كما في الشكل التالي.



### 3.3 ثنائيات الاستعمالات الخاصة

ان استعمال ثنائي التقويم الموجي في دائرة جهاز القدرة في تحويل الفولتية المتناوبة إلى فولتية مستمرة يعتبر من اكثر الثنائيات استعمالاً، إلا ان هناك تطبيقات أخرى يمكن ان تقوم بها ثنائيات أشباه الموصلات بمواصفات خاصة . في هذه الفقرة سوف نتطرق لبعض من تلك الثنائيات وتطبيقاتها.

#### أولاً: الثنائي الباعث للضوء LED Light-Emitting Diode

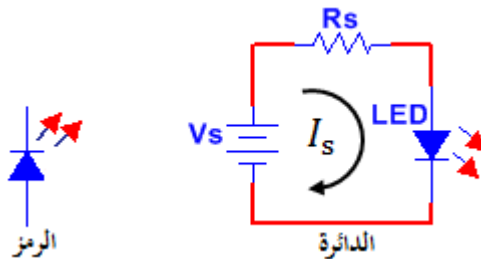
ذكرنا سابقاً انه في حالة ثنائي شبه الموصل المنحاز أمامياً فان الكترونات حزمة التوصيل تعبر الوصلة وتسقط في الفجوات، وعند انتقال الكترون من حزمة التوصيل إلى

حزمة التكافؤ فإنه يشع طاقة تعادل فرق الطاقة بين المستويين، في حالة الثنائي الاعتيادي (ثنائي التقييم) فإن الطاقة المنبعثة تكون على شكل حرارة، ولكن في حالة الثنائي الباعث للضوء فإن الطاقة المنبعثة تكون على شكل ضوء. يُشار للثنائيات الباعثة للضوء بالاختصار (LEDs).

باستعمال عناصر مثل الغاليوم (Gallium)، الزرنيخ (Arsenic)، والفسفور (Phosphorus)، يمكن تصنيع ثنائيات باعثة للضوء تشع أضواء حمراء، خضراء، صفراء أو تحت الحمراء (غير مرئية)، الثنائيات باعثة للضوء والتي تنتج أشعة مرئية تستعمل في عارضات الأجهزة والحاسبات والساعات الرقمية، اما الثنائي الباعث لأشعة غير مرئية فيكون لها تطبيقات في أجهزة الحماية ضد السرقة ومجالات أخرى تتطلب أشعة غير مرئية. في الآونة الأخيرة شاع استعمال الثنائي الباعث للضوء في أجهزة الإنارة بدلاً عن مصابيح الإنارة التقليدية (مصابيح التلستون أو الغازية) وذلك لما تمتاز به من صغر الحجم وخفة الوزن، مجال طيفي واسع، عمر استعمال طويل بالمقارنة مع المصابيح التقليدية، صغر الفولتية المطلوبة للتشغيل (بحدود بضعة فولتات) وسرعة الغلق والفتح (بضعة نانو ثانية).

الشكل (27-3) يمثل رمز و دائرة الثنائي الباعث للضوء، حيث تمثل  $(V_S)$  فولتية التحيز الأمامية،  $(R_S)$  مقاومة لتحديد التيار الأمامي لكي لا يمر تيار أكبر من تحمل الثنائي (والذي يكون عادة بين 10 إلى 50 ملي أمبير)،  $(V_D)$  هو فرق الجهد بين طرفي الثنائي والذي يكون عادة بين 1.5 إلى 2.5 فولت وذلك تبعاً للون الضوء المنبعث، التيار المار و أقصى تيار يمكن ان يتحمله الثنائي. بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد يمكننا إيجاد التيار المار بثنائي الباعث للضوء  $(I_S)$  بالمعادلة التالية:

$$I = \frac{V - V_D}{V}$$

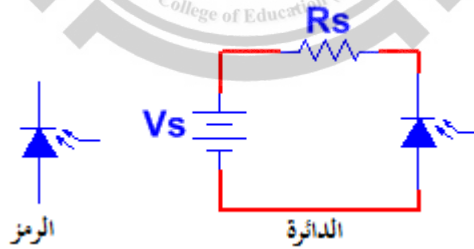


شكل (27-3) رمز و دائرة الثنائي الباعث للضوء

تمتاز الثنائيات الباعثة للضوء بكون فولتية الانهيار العكسية لها منخفضة نسبياً حيث تكون عادة بحدود 3 إلى 5 فولت، ولذا يجب تجنب تسليط فولتيات عكسية عالية على ثنائي الباعث للضوء لان ذلك يؤدي إلى تلف الثنائي، عادة ما يتم ربط ثنائي عادي (تقويم) على التوازي مع طرفي ثنائي الباعث للضوء وباتجاه معاكس وذلك لحماية الثنائي الباعث للضوء من فولتيات التحيز العكسي العالية.

### ثانياً: الثنائي الضوئي Photo diode

ذكرنا سابقاً ان الطاقة الحرارية تزيد من حاملات الشحنة الأقلية في الثنائي، وكلما ارتفعت درجة الحرارة زاد عدد حاملات الشحنة وبالتالي يزداد التيار العكسي المار بالثنائي بزيادة درجة الحرارة، وكذلك تستطيع الطاقة الضوئية انتاج حاملات الشحنة الأقلية. بتوفير منفذ (شباك) يستطيع الضوء من خلاله الوصول للوصلة، يستطيع المُصنع ان ينتج ثنائياً ضوئياً (Photo-diode)، وعندما يسقط ضوء خارجي على وصلة ثنائي ضوئي منحاز عكسياً تتولد أزواج (الكترن-فجوة) داخل طبقة الاستنزاف. وكلما كان الضوء قوياً زاد عدد حاملات الشحنة الأقلية المنتجة ضوئياً وازاد التيار العكسي. ولهذا السبب يمكن عمل متحسسات (كاشفات) ضوئية ممتازة من الثنائيات الضوئية. عادة ما يكون التيار العكسي لثنائي ضوئي بوجود الضوء بحدود عشرات المايكروامبير. الشكل (3-28) يوضح رمز ودائرة الثنائي الضوئي.

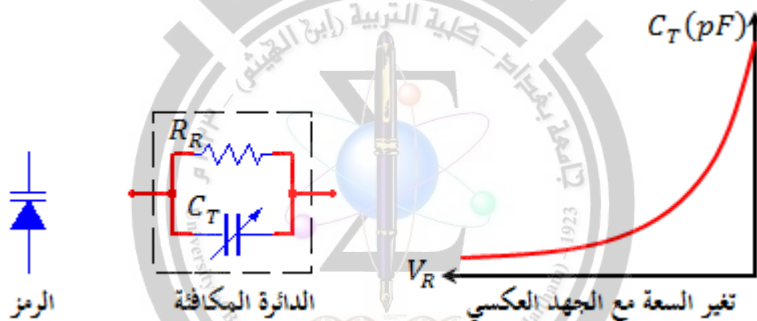


شكل (3-28) رمز ودائرة الثنائي الضوئي

### ثالثاً: ثنائي السعة المتغيرة Varactor

يستعمل ثنائي السعة المتغيرة بكثرة في أجهزة الاستقبال التلفزيونية والراديوية، وفي مختلف أجهزة الاتصالات وذلك لمقدرتها على التوليف الإلكتروني (Electronic Tuning) ولذلك يسمى ثنائي السعة المتغيرة بثنائي التوليف (Tuning Diode).

ان الفكرة الأساسية لعمل ثنائي السعة المتغيرة يقوم على الاستفادة من خصائص الثنائي في حالة الانحياز العكسي، فكلما كبرت الفولتية العكسية زاد عرض طبقة الاستنزاف، وبسبب عدم امتلاك طبقة الاستنزاف لحاملات الشحنة فهي تعمل عمل عازل كهربائي. هذا من ناحية، اما من الناحية الأخرى، فان منطقتي p و n المطعمتين تعملان عمل موصلين جيدين. وهكذا نستطيع ان نتخيل المنطقتين p و n المفصولتين بطبقة الاستنزاف متسعة ذات لوحين متوازيين. عندما تزداد الفولتية العكسية يزداد عرض طبقة الاستنزاف وهذا يشبه تحريك اللوحين المتوازيين بحيث يزداد البعد بينهما، وبالتالي فان السعة ( $C_T$ ) تقل عند زيادة الفولتية العكسية ( $V_R$ )، وبالتالي يمكننا التحكم بالسعة من خلال الفولتية العكسية المسلطة. الشكل (29-3) يوضح: الرمز، الدائرة المكافئة، ومنحنى تغير السعة مع الجهد العكسي المسلط لثنائي السعة المتغيرة.

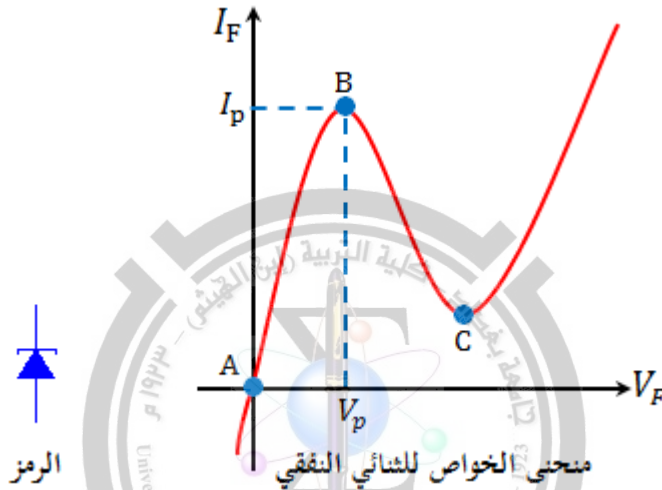


شكل (29-3) الرمز، الدائرة المكافئة، و منحنى تغير السعة لثنائي السعة المتغيرة

#### رابعاً: الثنائي النفقي Tunnel Diode

يمتاز الثنائي النفقي بخاصية فريدة تدعى بالمقاومة السالبة (Negative Resistance)، وهذه الخاصية تجعله مفيداً في التطبيقات المتعلقة بالمذبذبات ومضخمات الموجات الدقيقة. يتم تصنيع الثنائي النفقي من مادة الجرمانيوم أو الكاليوم ارسنايد (Gallium arsenide)، ويتم التطعيم بنسبة كبيرة جداً بالمقارنة مع تطعيم الثنائي العادي، ان ذلك التطعيم العالي يؤدي إلى جعل طبقة الاستنزاف ضيقة جداً، حيث يتناسب سمك طبقة الاستنزاف عكسياً مع الجذر التربيعي لتركيز الشوائب. يمكن ان يصل سمك طبقة الاستنزاف في الثنائي النفقي إلى اقل من ( $0.01\mu m$ ) ويبلغ المجال الكهربائي عبر الوصلة اكثر من ( $900 kV/cm$ ). تحت هذه الظروف وبسبب الطبيعة الموجية للإلكترون فقد يحتمل ان يجتاز الإلكترون حاجز الجهد، وتسمى هذه الظاهرة الكمية بالتنفيق (Tunneling) حيث

يتمكن الإلكترون من عبور تل الطاقة على الرغم من عدم امتلاكه الطاقة الكافية لهذا يسمى بالثنائي النفقي. لا يمكن تفسير هذه الظاهرة بالاعتماد على مبادئ الميكانيك الكلاسيكي، بينما يتمكن الميكانيك الكمي من تفسيرها بالاعتماد على حقيقة كون الموجة في الميكانيك الكمي لها القدرة على اختراق حاجز الجهد من خلال استخدام الطاقة المرافقة في عملية الاختراق، ويكون تيار التنفيق محسوساً اذا كانت طبقة الاستنزاف رقيقة جداً. الشكل (3-30) يوضح رمز الثنائي النفقي ومنحنى الخواص له.



شكل (3-30) رمز ومنحنى الخواص للثنائي النفقي

نلاحظ من منحنى الخواص ان التطعيم العالي للثنائي النفقي يجعله موصلاً للتيار في كامل منطقة الانحياز العكسي ولا وجود لظاهرة الانهيار التي تظهر في الثنائي العادي، في الانحياز الأمامي ولفولتيات تحييز واطئة (المنطقة من A إلى B) فان ضيق طبقة الاستنزاف سوف تسمح للإلكترونات بالتنفيق ويتصرف الثنائي كموصل. عند النقطة B فان فولتية التحييز الأمامية ستعزز الحاجز وبالتالي يقل التيار مع زيادة فولتية التحييز وتكون قيمة المقاومة سالبة وتستمر الحالة إلى النقطة C وعندها تنتهي ظاهرة التنفيق ويرجع الثنائي لسلوكه المتعارف عليه في الثنائي الاعتيادي.

### خامساً: ثنائي شوتكي Schottky Diode

عند الترددات العالية جداً (الأعلى من 300MHz) فان الثنائي العادي يفشل في عملية تقويم الموجة إذ لا تتناسب سرعته في الغلق والفتح (الاستجابة للانحياز الأمامي والعكسي) مع سرعة تناوب إشارة الإدخال، وللتغلب على هذه المشكلة صمم ثنائي شوتكي. في هذا



الثنائي يستعمل معدن مثل: الذهب ، الفضة، أو البلاتين على جهة واحدة من الوصلة وسليكون مشوب (عادة من نوع n) على الجهة الثانية، لذا يكون هذا النوع من الثنائيات بسيطة أحادية القطبية لان الإلكترونات الحرة هي الحاملات الأغلبية في جهتي الوصلة.



وكذلك فان ثنائي شوتكي لا يمتلك طبقة استنزاف أو خزن شحنة ونتيجة لذلك يمكن تحويله من وضع الغلق إلى الفتح بصورة اسرع بكثير من الثنائي العادي (ثنائي القطبية)، بالتالي يمكن استعمال ثنائي شوتكي في التطبيقات المتعلقة بتقويم الموجة في الترددات العالية جداً. الشكل المجاور يوضح رمز ثنائي شوتكي.

### سادساً: ثنائي الرجوع المدرج Step-Recovery Diode

في هذا النوع من الثنائيات الخاصة يكون مستوى التطعيم قرب الوصلة اقل مما عليه في منطقتي n و p مما يوفر للثنائي إمكانية خزن الشحنة. خلال التوصيل الأمامي يعمل الثنائي عمل ثنائي اعتيادي، اما عند الانحياز العكسي فان ثنائي الرجوع المدرج يوصل التيار بينما تنضبط طبقة الاستنزاف ومن ثم فجأة يهبط التيار العكسي إلى الصفر. يستعمل ثنائي الرجوع المدرج في التطبيقات المتعلقة بدوائر النبضات والدوائر الرقمية لتوليد نبضات سريعة جداً الشكل المجاور يمثل رمز ثنائي الرجوع المدرج.

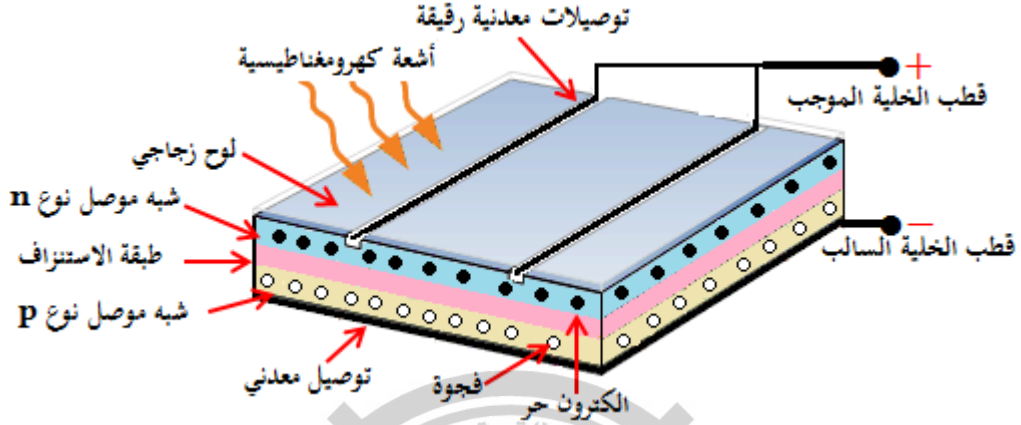


### سابعاً: ثنائي الليزر Laser Diode

في حالة الثنائي الباعث للضوء يكون الضوء المنبعث غير متشابه ( Noncoherent light) وذلك لان الكترونات التوصيل تهبط بصورة عشوائية إلى مستوى التكافؤ ويكون انبعاث الضوء ناتج من عملية الانبعاث التلقائي، بينما ثنائي الليزر انبعاث الضوء ناتج من عملية تسمى الانبعاث المحفز ويكون الضوء الناتج من انتقال الإلكترونات من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ يمتاز بالتشابه بالإضافة للشدة العالية والنقاوة الطيفية، يبعث ثنائي الليزر ضوء بالوان مختلفة منها الأحمر، الأخضر، الأزرق. لثنائي الليزر تطبيقات واسعة منها استعماله للاتصالات، أنظمة تحديد المدى، أجهزة الطباعة الليزرية، محرك الأقراص المدمجة، تطبيقات صناعية، تطبيقات طبية. ويسمى ثنائي الليزر أحيانا ليزر أشباه الموصلات.

## ثامناً: الخلية الشمسية Solar Cells

وهي عبارة عن وصلة موجب-سالب (p-n Junction) مصنوعة عادة من السليكون وكما هو موضح بالشكل (3-31).



شكل (3-31) تركيب الخلية الشمسية

تعمل الخلية الشمسية على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، حيث يسبب الضوء الساقط على منطقة الوصلة انتقال بعض الإلكترونات التكافؤ إلى حزمة التوصيل خلفه فجوة في محلها، وتعمل التوصيلات المعدنية على جمع الإلكترونات الحرة المتولدة مكونة تيار كهربائي تعتمد شدته على خصائص الخلية بالإضافة إلى شدة الإشعاع الساقط.

## أسئلة الفصل الثالث

س1: عرف كل من: دوائر التقويم، فولتية الذروة العكسية، عامل التموج، كفاءة التعديل، دوائر الإلزام، الثنائي الضوئي، ظاهرة التنفيق.

س2: قارن بين كل من دائرة المحدد الموجب، دائرة الملزم الموجب، دائرة مضاعف الفولتية لضعفين وذلك من حيث: رسمة الدائرة، الوظيفة و شكل فولتية الإخراج.

س3: قارن بين مقوم نصف موجة ومقوم القنطرة.

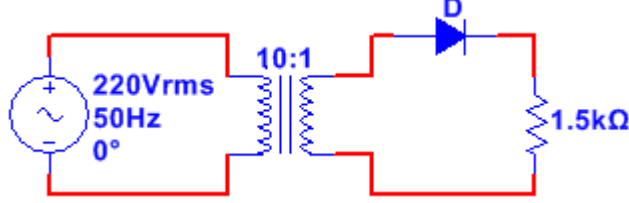
س4: علل ما يلي:

أ- استعمال مقوم التفرع المركزي في حالة تقويم الفولتيات الواطئة.

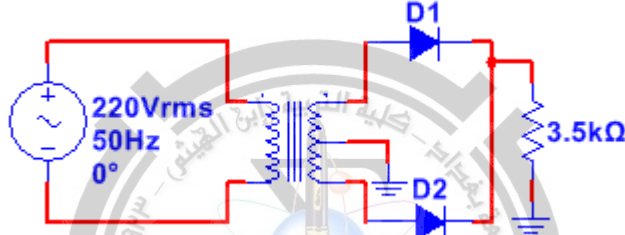
ب- استعمال المرشحات في دائرة مجهز القدرة المستمر.

س5: اشرح عمل دائرة الملزم السالب غير المنحاز مع الرسم.

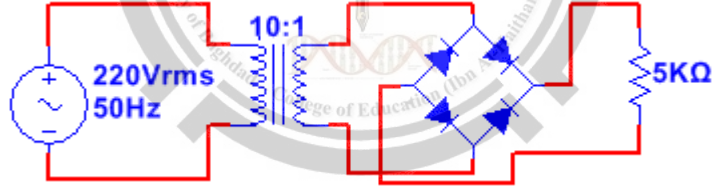
س6: في الشكل التالي اوجد: مقدار فولتية الحمل المستمرة، تيار الحمل المستمر، PIV على كل ثنائي، عامل التموج وكفاءة التعديل للمقوم.



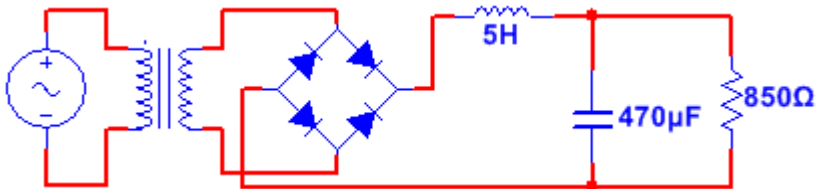
س7: نسبة اللف في الشكل التالي تساوي (7:1)، أوجد: فولتية الذروة للحمل، فولتية الحمل المستمرة، تيار الحمل، PIV على كل ثنائي، عامل التموج وكفاءة التعديل.



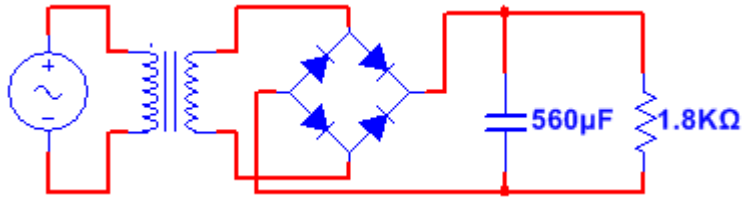
س8: في الشكل التالي أوجد: ذروة الإدخال، فولتية الحمل المستمرة، تيار الحمل المستمر، تردد فولتية الإخراج، عامل التموج، كفاءة التعديل، PIV على كل ثنائي.



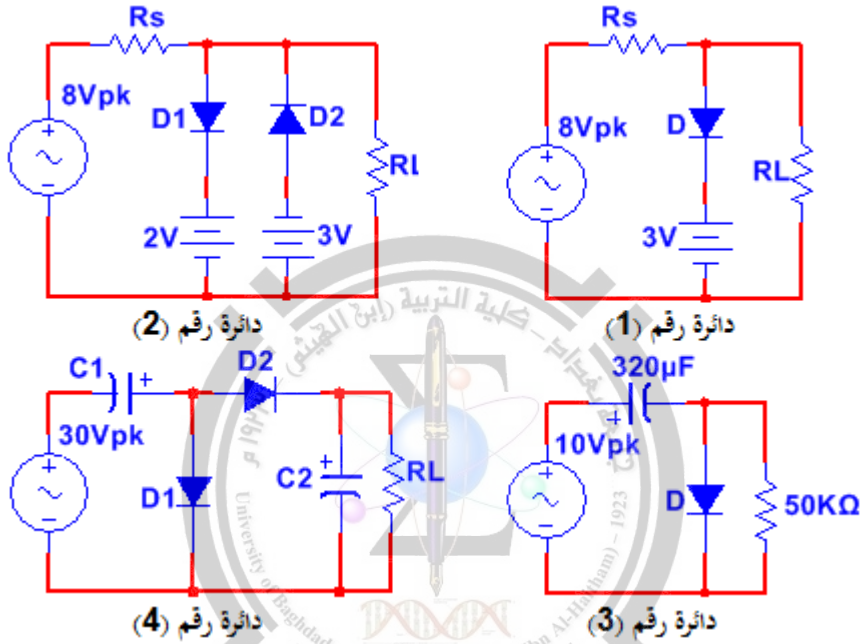
س9: ان ذروة إشارة الموجة الكاملة عند إدخال الملف الخانق في الشكل التالي تساوي (28V) ما مقدار تموج الإخراج، اذا كان للملف الخانق مقاومة dc مقدارها (35Ω) فما مقدار فولتية الإخراج المستمرة؟



س10: للفولتية الثانوية في الشكل التالي قيمة عظمى مقدارها (32V) وترددها (60Hz)، أوجد: فولتية الحمل المستمرة، القيمة الفعالة rms للتموج، وعامل التموج.



س11: في كل دائرة من الدوائر التالية اذكر اسم الدائرة، ثم ارسم شكل الفولتية الخارجة، اعتبر ان كل الثنائيات مثالية.



س12: ما مقدار التيار المار في الثنائي الباعث للضوء في الدائرة التالية اذا علمت ان فرق الجهد على طرفي الثنائي الباعث هو (2.034V) ثم قارن نتيجتك مع نتيجة المحاكاة.

