This file has been cleaned of potential threats.

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

الفصل الرابع

إلكترونيات الطاقة [١]

٤-١ عناصر أشباه الموصلات المستخدمة في مجال الطاقة

تستخدم عناصر أشباه الموصلات في مجال الطاقة كعناصر تبديل أو مقومات في نظم الكترونيات القدرة على سبيل المثال عناصر أوضاع التبديل في نظم إمدادات الطاقة ودوائر الطاقة المتكاملة كما تستخدم في نظم الاتصالات كعناصر تبديل بتصميم أمثل لهذا الاستخدام وهي لا تستخدم في التطبيقات الخطية ٠

- نبذه تاريخية

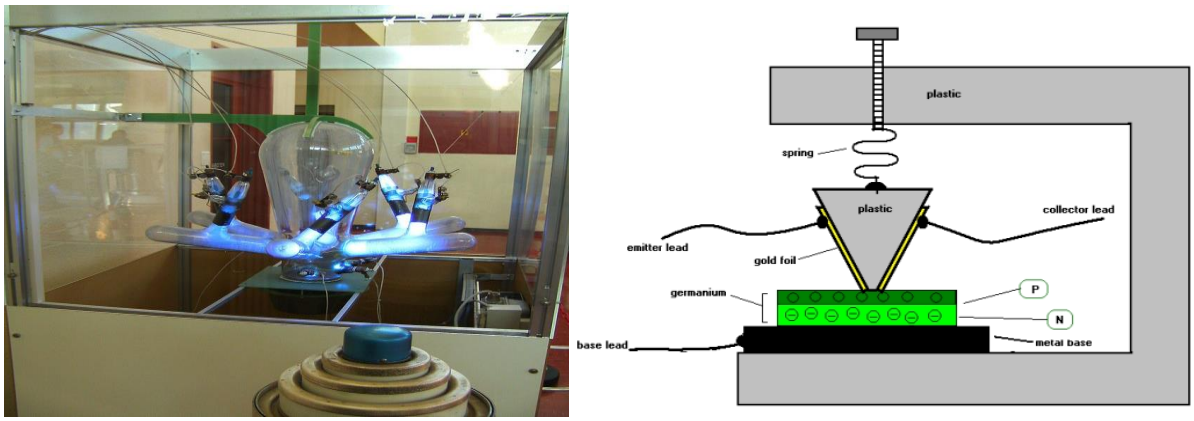
بدأت إلكترونيات الطاقة بتطوير مقوم القوس الزئبقي[٢] المستخدم منذ العام ١٩٠٢ لتحويل التيار المتردد الى تيار مستمر- من العام ١٩٢٠ تم استخدام الثايرستور وصمامات القوس الزئبقي للتحكم في شبكات نقل الكهرباء وتم تطوير صمام الزئبق مع تدرج قيم الأقطاب لجعلها مناسبة لنقل الكهرباء عالية الجهد ذات التيار المباشر- في العام ١٩٣٣ ظهر مقوم التيار من السيلينيوم- في العام ١٩٤٧ ظهر ترانزستور نقط الاتصال[٣] - في العام ١٩٤٨ ظهر ترانزستور ثنائي القطبين الذى ساهم في تحسين الاستقرار والأداء وقلة التكلفة - في العام ١٩٥٢ ظهر أول عنصر طاقة من أشباه الموصلات من مادة الجرمانيوم يتحمل جهد عكسي مانع حتى ٢٠٠ فولت وتيار كهربائي حتى ٣٥ أمبير وأصبح ثنائي القدرات العالية من أشباه الموصلات متوفر وبدأ إحلاله بدلا من الصمامات المفرغة.

---

١ المرجع من الموسوعة ويكيبيديا، الموسوعة الحرة (From Wikipedia, the free encyclopedia)

٢ صمامات الزئبق القوسي (mercury-arc valve أو mercury-vapor rectifier أوmercury-arc rectifier) نوع من المقومات الكهربائية التي تستخدم لتحويل الجهد العالي أو التيار المتردد إلى التيار المستمر ٠ وهى نوع من الصمامات الغازية ذات الكاثود البارد، ليس من المألوف أن يكون الكاثود في الصمام بركة من الزئبق السائل بدلاً من أن يكون مادة صلبة، وبالتالي الكاثود في الصمام يمثل استعادة ذاتية ٠ كنتيجة - فإن صمامات الزئبق القوسي كانت وعرة أكثر بكثير، طويل الأمد ويمكن أن يتحمل التيارات أعلى بكثير من معظم الأنواع الأخرى من صمامات التفريغ الغازي.

٣ ترانزستور نقط الاتصال ثنائي القطب ((point-contact transistor أول ترانزستور من الحالة الصلبة



الشكل (٤ – ١) نموذج مبكر للترانزستور ومقوم الزئبق

في العام ١٩٥٦ أستخدم مقوم السليكون الخاضع للسيطرة [٤] الذي ساهم إلى حد كبير في زيادة نطاق تطبيقات إلكترونيات القدرة – في عام ١٩٥٧ أستخدم الثايرستور [٥] الذي يتحمل جهد انهيار عكسي عالي نسبيا وله القدرة على تحمل قيم تيار عالية. ومع ذلك، فإن أحد عيوب الثايرستور أنه لا يتمكن من التحول الى حالة إيقاف التشغيل بالتحكم الخارجي عندما يكون في وضع التوصيل. في حالة إيقاف التشغيل يسلك الثايرستور سلوك المقاومة بمعنى ضرورة فصل تغذية الجهد عن الثايرستور. يسمى الثايرستور في حالة إيقاف التشغيل ثايرستور بوابة إيقاف [٦] الذى أستخدم عام ١٩٦٠ للتغلب على بعض القيود المفروضة على الثايرستور العادي، نظراً لإمكانية تحويله الى حالة التشغيل أو الإيقاف من خلال تطبيق إشارة٠ وفي الستينات أتاح أسلوب تحسين سرعة التبديل في الترانزستورات ثنائية القطبين بظهور محولات للترددات العالية [٧].

---

٤ مقوم السليكون الخاضع للسيطرة (silicon controlled rectifier) ذو أربع أطراف وهو اسم تجارة للثايرستور

٥ الثايرستور (thyristor) عنصر من ثلاثة أطراف يهدف إلى التحكم في التيارات المرتفعة بطرفين عن طريق الجمع التيار بقيم صغيرة بالتحكم في الطرف الثالث. وفي المقابل، يصمم الثايرستور ذات الطرفين من أجل التبديل الى حالة التشغيل في حالة الفرق في الجهد بين الطرفين كافي بما يؤدي جهد الانهيار.

٦ ثايرستور بوابة إيقاف gate turn-off thyristor (GTO) نوع خاص من الثايرستور من عناصر الطاقة من أشباه الموصلات وهو متعارض مع الثايرستور العادي وهو عنصر تبديل يمكن التحكم فيه كليا والى يمكنه التحول من حالة التشغيل الى حالة ايقاف التشغيل من خلال طرف ثالث تسمى وصلة بوابة.

٧ في الستينات أتاح أسلوب تحسين سرعة التبديل في الترانزستورات ثنائية القطبين بظهور محولات للترددات العاليةDC/DC

في العام ١٩٧٠ ظهر الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال في تطبيقات الطاقة وأصبح متاح تجاريا في ١٩٧٦ – في البداية المتقدمة لإنتاج الدوائر المتكاملة، استخدمت عناصر المقومات الدولية [٨] في العام ١٩٧٨ والتي تتحمل ٢٥ أمبير وجهد ٤٠٠ فولت بتكنولوجيا الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال – سمحت هذه العناصر بتطبيقات الترددات العالية بالمقارنة بالترانزستور ثنائي القطبية الذي يقتصر على تطبيقات الجهد المنخفض– في العام ١٩٨٢ استخدمت ترانزستورات ثنائية القطبين ذات البوابة العازلة [٩]على نطاق واسع. تحددت قدرات واقتصاديات نظم إلكترونيات الطاقة بالأجهزة النشطة المتوفرة في العام ١٩٩٠ حيث أصبحت خصائص نظم إلكترونيات الطاقة والقيود الواجب مراعاتها هي العناصر الرئيسية في تصميم أنظمة إلكترونيات الطاقة. تطورت قدرة الترانزستور ثنائي القطبية في تطبيقات بقدرة ومزايا الترانزستور ذو البوابة المعزولة (م أ س) المتأثر بالمجال. يعمل ترانزستور الطاقة (م أ س) المتأثر بالمجال بأسس متماثلة لنظرائه في تطبيقات القدرات المنخفضة، ولكنه قادر على تحمل قدر أكبر من التيار وله القدرة لدعم جهد تحيز عكسي أكبر في حالة إيقاف التشغيل. الاختلاف في التكوين غالباً ما يتم في عناصر الطاقة بهدف استيعاب كثافة التيار، وطاقة فقد ، و/ أو جهد انهيار عكسي عالى٠ الغالبية العظمى من عناصر الطاقة (ليست عناصر متكاملة) يتم تكوينها باستخدام بنية عمودية وفي حين يتم تكوين عناصر الإشارة الصغيرة باستخدام بنية أفقية٠ يتناسب معدل تدفق التيار في العناصر مع المساحة في تكنولوجيا التكوين الرأسي وتتحقق قدرة المنع بسمك الركيزة ويقع أحد أطراف التوصيل في أسفل الركيزة بهذا التكوين. يمكن استخدام عناصر الطاقة الإلكترونية كعناصر التبديل أو مكبرات للصوت. عنصر التبديل المثالي لا ينتج عنه فقد في القدرة ولا يسمح بمرور تيار أو تمرير أي قدر من التيار بدون

---

٨ المقوم الدولي ((International Rectifier من شركة تكنولوجيا لطاقة الأمريكية لإنتاج الدوائر المتكاملة التناظرية ودوائر الإشارات المختلطة، ونظم الطاقة المتكاملة وعناصر الدوائر المتقدمة، المكونات المتكاملة عالية الجودة للحاسبات،

٩ الترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة (IGBT) insulated-gate bipolar transistor عنصر أشباه الموصلات ذو ثلاث أطراف يستخدم كعنصر تبديل إلكتروني ، كما تم تطويره بالجمع بين الكفاءة العالية والتبديل السريع في العديد من التطبيقات مثل محركات التردد المتغير (VFDs) variable-frequency drives : والسيارات الكهربائية والقطارات والثلاجات متغيرة السرعة (variable speed refrigerators) وأجهزة التكييف وتطبيقات أخرى كثيرة٠

جهد في حالة الفتح أو القطع. تقترب عناصر أشباه الموصلات المستخدمة كعناصر تبديل من العناصر المثالية في ضوء هذه الخاصية المثالية٠ تعتمد معظم تطبيقات الطاقة الإلكترونية على خاصية التبديل بين الأجهزة لتشغيلها أو عدم تشغيلها، مما يجعل النظم فعالة للغاية حيث يتم فقد القليل جداً من القدرة في حالات التبديل٠ وفي المقابل، في حالة مكبرات الصوت فإن التيار المار خلال الدائرة يتغير باستمرار ووفقا للمدخلات٠ يتناسب الجهد والتيار في عناصر الطاقة لمتطلبات خط التحميل ولذا فإن الطاقة المفقودة داخل العنصر كبيرة مقارنة بالقدرة المستخدمة للتحميل٠ تسمح عناصر القدرة مثل مقوم السيلكون القابل للتحكم وعناصر الثايرستور وأيضا صمامات الزئبق والثيرترون[١٠] بالتحكم في تدفق التيار مع بدء التوصيل، كما تعتمد على العكس الدوري لتدفق التيار لإيقاف تشغيلها٠ تختلف العناصر في سرعات التبديل ففي بعض الثنائيات والثايرستور تكون ملائمة للسرعات البطيئة ومفيدة للاستخدام كعناصر للتبديل لترددات الطاقة والسيطرة؛ تعمل بعض الثايروستورات في نطاق الكيلوهرتز كما يمكن للترانزستور التبديل بين الأجهزة في نطاق أكبر من عشرات الكيلوهرتز إلى بضع ميجا هرتز في تطبيقات الطاقة ذات مستويات الطاقة منخفضة . تهيمن الصمامات المفرغة على أجهزة السيطرة عالية الطاقة (مئات الكيلو وات) في التطبيقات ذات التردد العالي جداً (مئات أو آلاف ميجا هرتز)٠ تقلل عناصر التبديل السريعة الطاقة المفقودة في التحويل من حالة التشغيل أو إيقاف التشغيل والعودة، ولكن قد ينتج عن ذلك مشاكل بتداخل إشعاعات كهرومغناطيسية ولذلك يجب أن تصمم الدوائر لإمدادات كافية للتيار لتحقيق سرعة التحول الممكن في النظام. في النظم بدون تغذية كافية للتبديل السريع قد ينتج عنها تدمير للنظام نتيجة الحرارة الزائدة. في النظم التطبيقية فإن الجهد الغير صفري يبدد طاقة في حالة التشغيل، ويحتاج بعض الوقت للمرور عبر المنطقة النشطة حتى تصل إلى مستوى الجهد المطلوب للتشغيل أو إيقاف التشغيل٠ يمثل هذا الفقد جزء كبير من إجمالي الطاقة في المحول. التعامل

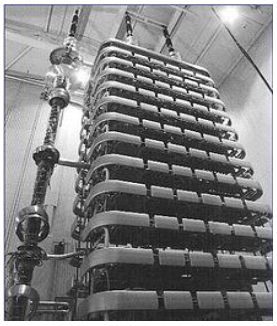
---

١٠ الثيراترون (thyratron) نوع من الصمامات المملوءة بالغاز (gas-filled tube) تستخدم كعناصر تبديل للقدرات العالية الكهربائية ونظم التقويم المتغيرة (controlled rectifier)

مع الطاقة وتبديدها عوامل حاسمة في التصميم. قد تفقد نظم الطاقة الإلكترونية العشرات أو المئات وات بسبب الحرارة وكفاءة التبديل بين حالتي التوصيل وعدم التوصيل. ففي حالة التبديل فإن طاقة التشغيل أكبر بكثير من القدرة المفقودة في التبديل. يترجم انخفاض جهد التغذية الأمامي في حالة إجراء التوصيل بالحرارة التي يجب أن تبدد. تتطلب عناصر أشباه الموصلات عالية الطاقة عوازل لامتصاص الحرارة المتولدة أو أنظمة تبريد نشطة لتنظيم حرارة الوصلات في عناصر أشباه الموصلات. تتمتع أشباه الموصلات مثل كربيد السيليكون بميزة أكثر من عناصر السيليكون والجرمانيوم في هذا الصدد نظراً لخواصها الغير مرغوبة في درجات الحرارة العالية. توجد عناصر أشباه الموصلات بتصنيفات حتى قيم الكيلو فولت للعنصر الواحد. تستخدم عناصر متعددة على التوالي في الشبكات لتكافؤ الجهد عبر كافة العناصر حتى يمكن التحكم في الجهد العالي جداً. مرة أخرى، فإن سرعة التبديل عاملاً حاسما حيث العناصر بطيئة التبديل تتحمل حصة غير متناسبة من الجهد الكلى.

صمامات الزئبق حيث كانت متاحة بقيم حتى ١٠٠ كيلو فولت في الوحدة الواحدة، ساهمت فى تبسيط تطبيقها في أنظمة الجهد العالي للتيار المباشر. معدلات التيار لعناصر أشباه الموصلات محدودة نتيجة للحرارة المتولدة داخل المقاومة بين أطراف التوصيل. يجب أن تصمم عناصر أشباه الموصلات بأسلوب يؤدى الى توزيع التيار بالتساوي داخل العنصر عبر الوصلات الداخلية لها حيث أنه بمجرد ظهور البقعة الساخنة، فإن آثار جهد الانهيار يمكن أن يدمر العنصر. تتوفر بعض عناصر مقومات السيلكون المتغيرة بقيم تيار حتى ٣٠٠٠ أمبير في العنصر الواحد. إلكترونيات القدرة هي أحد التطبيقات لعناصر إلكترونيات الجوامد للتحكم وتحويل الطاقة الكهربائية. كما تشير إلى تصميم ومراقبة وتكامل النظم الإلكترونية الخطية، يختلف وقت إعداد نظم الطاقة الإلكترونية مع التطورات الديناميكية السريعة على عكس الأنظمة الإلكترونية المعنية بنقل ومعالجة الإشارات والبيانات. مقوم التيار المتردد الى التيار المستمر هو العنصر الأكثر شيوعاً في إلكترونيات الطاقة والذي يستخدم في العديد من الأجهزة

الإلكترونية الاستهلاكية، مثل أجهزة التلفاز، أجهزة الكمبيوتر الشخصية، وشاحنات البطاريات، إلخ.



الشكل (٤ – ٢) برج من صمامات الثايرستور ذات الجهد العالي تيار مباشر بطول ٨و١٦ متر

يتراوح نطاق القدرة عادة من عشرات الى مئات الوات. من أحد التطبيقات الصناعية الهامة هي محركات متغيرة السرعة [١١] التي تستخدم للتحكم في محركات الحث [١٢]. تصل قيم الطاقة للمحركات متغيرة السرعة من مئات الوات الى عشرات ميجا وات ويمكن تصنيف نظم تحويل الطاقة وفقا لنوع قدرة الإدخال والإخراج.

- مقوم التيار المتردد الى تيار مستمر
- مقوم عاكس [١٣] التيار المستمر الى تيار متردد
- محول من تيار مستمر الى تيار مستمر [١٤]
- محول من تيار متردد الى تيار متردد

---

١١ محرك متغير السرعة (VSD) variable-speed driveأو محرك السرعة القابل للتعديل (ASD) Adjustable speed drive يصف المعدات المستخدمة للتحكم في سرعة المحرك. يعمل العديد من العمليات الصناعية مثل خطوط التجميع في سرعات مختلفة لمنتجات مختلفة. حيث تتطلب عمليات التدفق من مضخة أو مروحة، تغيير سرعة المحرك .

١٢ المحرك الحثي(induction motor) هو محرك تيار متردد يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية وهو أحد تطبيقات قانون فاراداي للحث فهو يعمل فقط في أنظمة التيار المتناوب

١٣ العاكس (inverter) هو جهاز كهربائي يقوم بتحويل التيار المستمر إلى تيار متردد .(قد تكون آلية العاكس الكهربي كهر وميكانيكية (أعضاء متحركة) أو إلكترونية (أعضاء ساكنة). ويستخدم بكثرة في السيارات وأيضا في بعض أجهزة التكييف للتحكم بسرعة الضاغط حسب الحاجة.

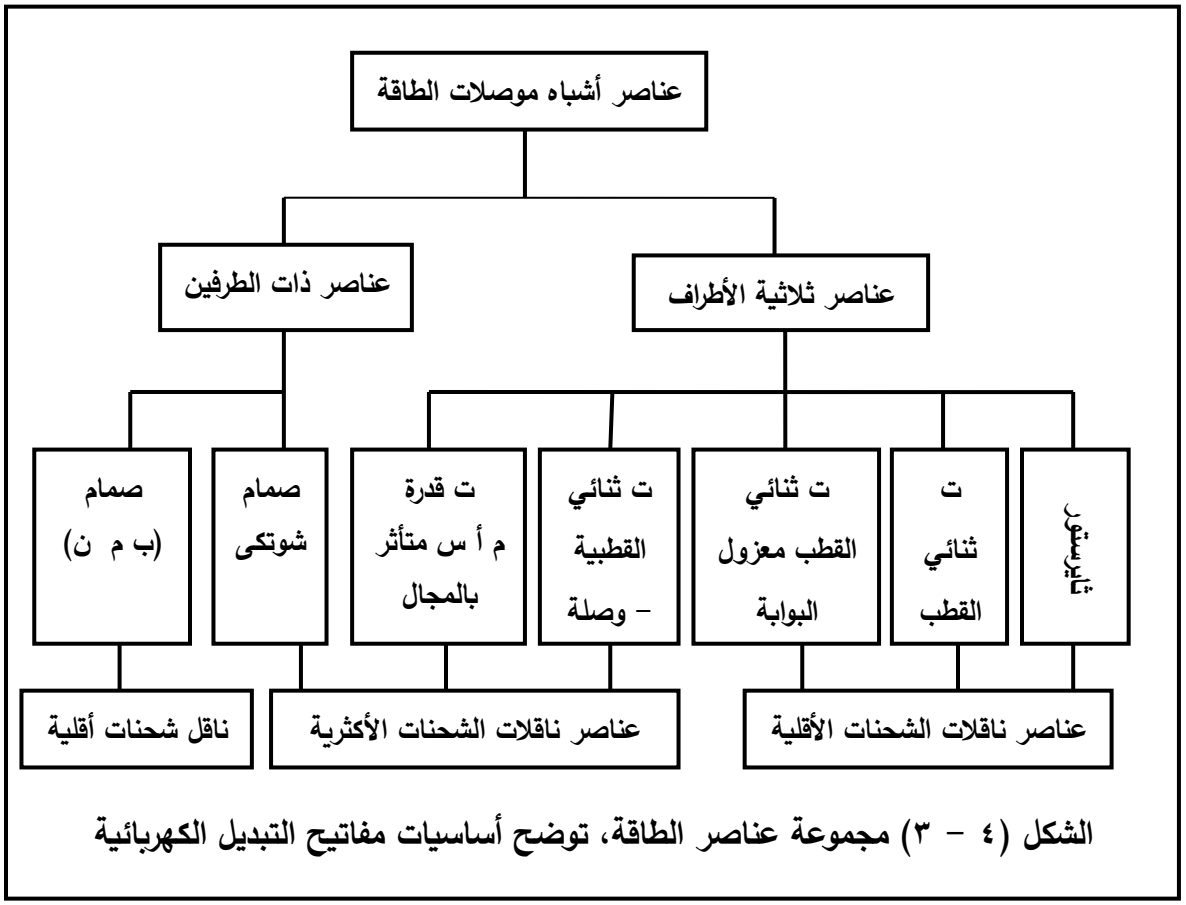
١٤ محول من تيار مستمر الى تيار مستمر (DC-to-DC converter) عبارة عن دائرة إلكترونية تقوم بتحويل مصدر تيار مباشر من مستوى الى مستوى آخر

٤-٢ عناصر الحالة الصلبة

تصنف عناصر الطاقة بأحد الفئات الرئيسية التالية (الشكل ٤- ٣)

١. العناصر ثنائية الطرفين (على سبيل المثال الصمام الثنائي) ويعتمد اعتمادا كلياً على الدائرة الكهربائية الخارجية المتصل بها.

٢. العناصر ثلاثية الأطراف ويعتمد اعتمادا كلياً ليس فقط على الدائرة الكهربائية الخارجية ولكن أيضا على الإشارة على أطراف التشغيل مثل البوابة أو القاعدة.



الشكل (٤ - ٣) مجموعة عناصر الطاقة، توضح أساسيات مفاتيح التبديل الكهربائية

وتصنيف آخر أقل وضوحا ولكن له تأثير على خواص العنصر:

١. عناصر ناقلات الشحنات الأغلبية على سبيل المثال صمام شوتكى الثنائي والترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال التي تستخدم نوع واحد من الشحنات.

٢. عناصر ناقلات الشحنات الأقلية مثل الثايرستور الذي يسمح بأداء أفضل في وضع التشغيل والترانزستور ثنائي القطبية والترانزستور ثنائي القطبية ذات البوابة المعزولة التي تستخدم كلا نوعي الشحنات الأكثرية والأقلية (الإلكترونات والثقوب) ومن المعروف أن عناصر الشحنات الأكثرية أسرع ولكن عناصر حقن الشحنات الأقلية.

٤ – ٣ الصمام الثنائي

يجب أن يشتمل الصمام الثنائي المثالي على الخواص التالية:

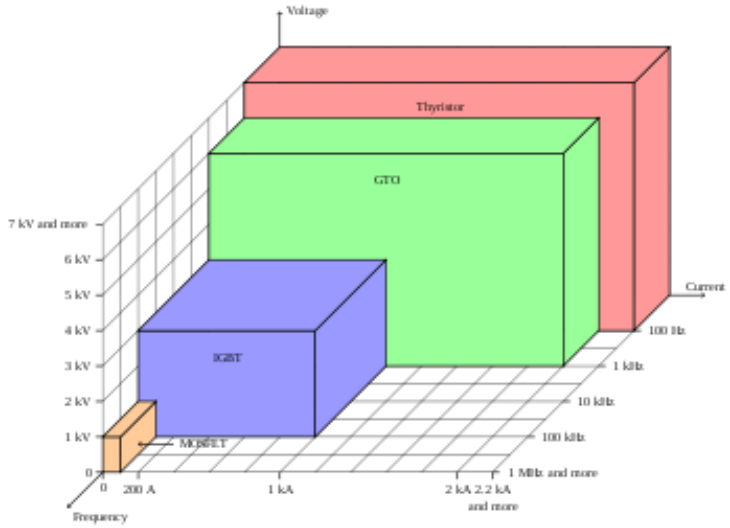
- يجب أن يساوى الجهد على الطرفين في حالة الانحياز الأمامي صفر أيا كان التيار الذي يتدفق من خلاله في حالة التشغيل.
- يجب أن يساوى التيار المتسرب على الطرفين في حالة الانحياز العكسي صفر أيا كان الجهد في حالة إيقاف التشغيل.
- يجب أن يكون التبديل بين حالتي التشغيل والإيقاف لحظيا.

في الحقيقة , تصميم الصمام الثنائي هو مفاضلة بين الأداء في حالة التشغيل وحالة إيقاف التشغيل وسرعة التبديل ، يجب الحفاظ على جهد المنع في حالة إيقاف التشغيل ويسمح بمرور التيار في حالة التشغيل – وهما على العكس تماما، فيجب أن يكون الصمام الثنائي في أحد الوضعين ، ويجب أن يتاح الوقت للتبديل من حالة إلى أخرى وبالتالي يجب أن تتناقص فترة التبديل, هذه المبدلات هي نفسها بالنسبة لجميع عناصر الطاقة؛ على سبيل المثال، فإن سرعة التبديل والأداء لصمام شوتكي الثنائي في حالة التشغيل ممتازة ، ولكن قيم التيار المتسرب في حالة إيقاف التشغيل مرتفعة, على الجانب الآخر فإن الصمام الثنائي (ب م ن) متوفر

تجاريا بسرعات تبديل مختلفة والتي يشار لها مقومات سريعة ومقومات فائقة السرعة[١٥]. ولكن أي زيادة في السرعة ترتبط بالضرورة بانخفاض الأداء في حالة التشغيل.

❖ المبدلات

يجب مراعاة التوازنات بين الجهد والتيار ومعدلات التردد في مفتاح التبديل. في الحقيقة يعتمد أي عنصر شبه موصل في تطبيقات الطاقة على بنية الصمام ثنائي (ب م ن) بهدف الحفاظ على مواصلة الجهد (الشكل ٤ – ٤) ؛ الترانزستور (م أ س) ذو المجال المستخدم في تطبيقات الطاقة له مزايا العناصر ناقلات الشحنات الأغلبية، ولذلك فإنه يمكن تحقيق تردد تشغيل عالي جداً، ولكن لا يمكن استخدامه مع الجهود العالية ؛ حيث لها حدود فيزيائية، ومن المتوقع عدم التحسن في تصميم الترانزستور (م أ س) ذو المجال من السليكون بشأن معدلات أقصى جهد.



الشكل (٤ – ٤) نطاقات التردد التيار/الجهد/التبديل في مبدلات الطاقة الإلكترونية الرئيسية

---

١٥ المقومات فائقة السرعة (Ultrafast rectifiers) مصممة كي يكون الجهد الأمامي منخفض جداً مع حدوث انتعاش عكسي فائق السرعة. وهذا يجعل المقوم الثنائي فائق السرعة فعال جداً لتصحيحات الناتج الثانوي للخرج في تطبيقات المبدلات عالية التردد في مصادر الطاقة،

ومع ذلك، له أداء ممتاز في التطبيقات ذات الجهد المنخفض تجعل منه العنصر المفضل (فعلا هو الخيار الوحيد، حاليا) للتطبيقات مع الجهد أقل من ٢٠٠ فولت٠ بتوصيل عدد من العناصر على التوازي يمكن زيادة قيم التيار لمفتاح التبديل. الترانزستور (م أ س) ذو المجال مناسب لهذا التكوين، لأن له مقاومة ذات معامل حراري إيجابي تميل لتوازن التيار بين العناصر الفردية. يعتبر الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة [٤] المكون الأخير، حيث تم تحسين أدائه بانتظام مع تطور التكنولوجيا. قد أستخدم الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة بدلا من الترانزستور ثنائي القطب في تطبيقات الطاقة؛ تستخدم وحدات الطاقة المتوفرة العديد من الترانزستورات ثنائية القطبية ذات البوابة المعزولة المتصلة على التوازى مما يمكن استخدامها لمستويات طاقة حتى عدة ميجا وات، مما ساهم لزيادة الحد الأقصى لمستويات الطاقة وبالتالي أصبح الثايرستور والترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة الخياران الوحيدان لتطبيقات الطاقة٠ الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة هو أساسا ثنائي القطب مدفوعا بأسلوب التغذية للترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال ؛ له مزايا عناصر ناقلات الشحنات الأقلية ذات الأداء الجيد في حالة التشغيل حتى بالنسبة لعناصر الجهد العالي ، مع معاقة الدخل العالية للترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال الذى يمكنه التحويل لكل من حالتي التشغيل والإيقاف مع قيم قليلة جداً من الطاقة٠ القيد الرئيسي في الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة هي قصور استخدامه للتطبيقات ذات الجهد المنخفض في حالة التشغيل من ٢ إلى ٤ فولت٠ بالمقارنة مع الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال فإن التردد المستخدم في الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة نسبيا منخفض (عادة ليس أكثر من ٥٠ كيلو هرتز) مما يتسبب في حدوث مشكلة أثناء التبديل الى حالة إيقاف التشغيل المعروفة بذيل التيار[١٦] . التناقص البطيء لتيار التوصيل أثناء التبديل الى حالة إيقاف التشغيل نتيجة الاندماج البطيء لعدد كبير من الشحنات العائمة في منطقة الانحراف السميكة في الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة أثناء التوصيل ونتيجة لذلك فأن الفقد في

---

١٦ ذيل التيار (tail current) هو جزء من تيار المجمع (I_c) حيث يستمر تيار المجمع في السريان بعد توقف مفاجئ ويبدأ ذيل التيار عندما ينخفض معدل تيار المجمع

التبديل لحالة إيقاف التشغيل في الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة[٩] أعلى بكثير من الفقد في حالة التشغيل. وبصفة عامة، في كتيبات البيانات، يشار الى قيم طاقة التبديل لحالة إيقاف التشغيل كمعامل قياس ؛ فإن هذه القيم تتضاعف مع سرعة التبديل للتطبيق المطلوب لتقدير الفقد في حالة إيقاف التشغيل. في مستويات الطاقة العالية , نجد عناصر الثايرستور على سبيل المثال مقوم السيلكون الخاضع والثايريستورات التحويل ذات البوابة[٦] وثايرستور (م أ س) قابل للتحكم[١٧] لا تزال الخيار الوحيد. يمكن تشغيل هذه العناصر بنبضة من دائرة التشغيل، ولكن لا يمكن إيقاف التشغيل عن طريق إلغاء النبضة. يتم التبديل لحالة إيقاف التشغيل في الثايرستور بمجرد عدم مرور التيار في الثايرستور. ويحدث هذا تلقائياً في نظم التيار المتردد في كل دورة للتيار، أو يتطلب تصميم دائرة بالوسائل اللازمة لتحويل التيار حول الثايرستور. تطور كل من ثايرستور (م أ س) القابل للتحكم والثايريستورات ذات بوابة التحويل للتغلب على هذا القصور، وتستخدم على نطاق واسع في تطبيقات توزيع الطاقة.

❖ المعاملات:

١. جهد الانهيار: غالبا، هناك مفاضلة بين توزيع جهد الانهيار ومقاومة التشغيل، نظراً لزيادة جهد الانهيار من خلال دمج منطقة التوصيل العائمة السميكة قليلة التخدير إلى مقاومة تشغيل عالية.

٢. مقاومة التشغيل: قيم التيار العالية تقلل مقاومة التشغيل نظراً للإعداد الكبيرة من الخلايا المتوازية وهذا يزيد من السعة الإجمالية ويبطئ السرعة.

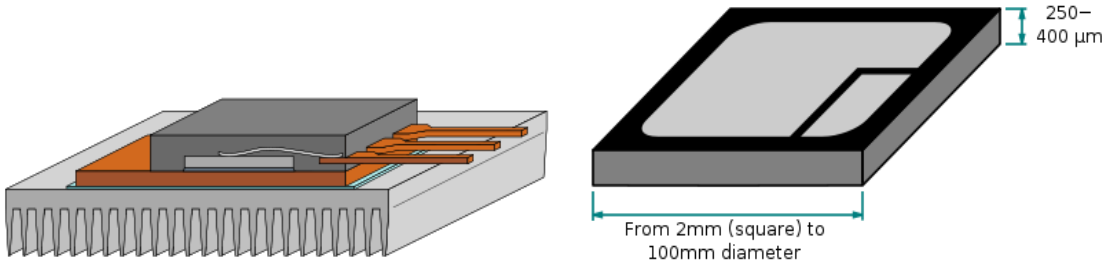
٣. زمن الصعود والهبوط: زمن التبديل من حالة التشغيل الى حالة إيقاف التشغيل

٤. توفير مساحة التشغيل: وتمثل اعتبارات الفقد الحراري والإغلاق.

---

١٧ ثايرستور م أ س قابل للتحكم (MOS-controlled thyristor (MCT) هو الثايرستور يمكنه السيطرة تماما على الجهد. وهو متشابهة في التشغيل إلى الثايريستورات تحويل بوابة (GTO)، ولكن يشتمل على بوابة معزولة تسيطر على الجهد. يشتمل على عدد اثنين من الترانزستور م أ س المتأثر بالمجال لنوعين مختلفين في الموصلية في الدائرة المكافئة . الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة أنواع التوصيل العكسي في تلك الدوائر ما يعادلها. ترانزستور منهما مسئول عن التحويل الى حالة التشغيل والثاني مسئول عن حالة إيقاف التشغيل .

٥ ٠ المقاومة الحرارية: غالبا يتم تجاهلها ولكنها عامل مهم في التصميم، أشباه الموصلات ليس لها أداء جيد في درجات الحرارة المرتفعة بسبب تيار التوصيل الكبير، عناصر الطاقة من أشباه الموصلات دائماً ترتفع درجات حرارتها. وبالتالي هناك حاجة لتبريدها بشكل مستمر؛ التغليف وتكنولوجيا التبريد توفر وسيلة لإزالة الحرارة من عناصر أشباه الموصلات لتتناسب مع البيئة خارجية٠ عموما، عناصر التيار العالي تتميز بركيزة كبيرة وتغليف المساحات السطحية ومقاومة حرارية منخفضة.



الشكل (٤ – ٥) ركيزة وعنصر طاقة شبه موصل ثلاثي الأطراف متصل بمحيط تبريد لإزالة الحرارة الناجمة عن الفقد في التشغيل

❖ بالوعة حرارة أو غرفة تبريد [١٨]

المحركات ومعظم الأجهزة الأخرى عادة ما تكون على اتصال غير مباشر لمصادر الطاقة عن طريق ترانزستور قدرة الذي يعمل بمثابة مفتاح تبديل للسماح للطاقة بالتدفق من مصدر الطاقة إلى المحرك، أو فصل المحرك عن مصدر الطاقة٠ (وحدة المعالجة المركزية في الكومبيوتر متصلة بالترانزستور تحدد بالضبط متى يتم التشغيل أو إيقاف التشغيل) ٠ تصل معظم الطاقة من المصدر الى المحرك عندما يتحول مفتاح التبديل لحالة التشغيل لسوء الحظ, بعض من الطاقة الكهربائية يتم محاصرتها بواسطة مقاومة طفيلية غير مرغوب فيها في ترانزستورات القدرة ، تتسبب في رفع درجة الحرارة. غالبا هناك ضرورة لبالوعة الحرارة للحفاظ

١٨ يشار الى (sink Heat) على أنها بالوعة حرارة أو مبدل حراري سلبي الذي ينقل الحرارة المتولدة من عناصر إلكترونية أو ميكانيكية الى داخل سائل مبرد في حركة مستمرة. ثم نقل الحرارة ويترك العنصر مع السائل في الحركة، وبالتالي يسمح بتنظيم درجة حرارة العنصر. وتستخدم مع عناصر أشباه الموصلات عالية الطاقة مثل ترانزستورات القدرة.

على عدم رفع حرارة الترانزستور التي تتسبب في التدمير الذاتي للترانزستور. عمليا تتطلب جميع الأجهزة الحديثة للكمبيوتر بالوعة حرارة أعلى وحدة المعالجة المركزية كما يتطلب الروبوت النموذجي غرفة تبريد لترانزستورات الطاقة بالروبوت.

❖ البحوث والتطوير

١. يشتمل دور التغليف على عدة نقاط منها: توصيل الركيزة بالدائرة الخارجية – تأمين وسيلة للتخلص من الحرارة المتولدة بالعنصر – حماية الركيزة من البيئة الخارجية (الرطوبة والأتربة و٠٠٠) – كثير من مسائل الموثوقية لعناصر الطاقة المتصلة بالإفراط في درجة الحرارة أو الانهيار بسبب الترددات الحرارية.

٢. ويتم حاليا البحث في عدة نقاط منها: زيادة كفاءة وأداء التبريد – قيم المقاومة بالنسبة للتردد الحراري عن طريق المطابقة المثلى لمعامل التمدد الحراري لمادة التغليف لتتقارب مع معامل التمدد الحراري للسيلكون – أقصى درجة حرارة تشغيل تتحملها مادة التغليف.

٣. البحث جار أيضا في المسائل الكهربائية مثل تخفيض قيم الحث الطفيلية لمواد التغليف حيث تقلل قيم الحث الطفيلية من تردد التشغيل، لأنها تولد فقد أثناء حالات التبديل.

٤. تتأثر خواص الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال ذو الجهد المنخفض بقيم المقاومة الطفيلية لمواد التغليف مثل: انخفاض المقاومة الجوهرية في حالة التشغيل في نطاق الميلي أوم – التطور في تكنولوجيا تكوين العناصر.

٥. تصميم الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة [٩] تحت التطوير لزيادة جهد التشغيل.

٦. في نطاق الطاقة العالية فإن الثايرستور ذات التحكم (م أ س) عنصر واعد٠ تم تحقيق تحسن كبير بالمقارنة بتكوينات الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال التقليدي باستخدام الوصلات السوبر بمبدأ توازن الشحنات[١٩] التي تسمح للمنطقة العائمة السميكة في

---

١٩ الوصلات السوبر (Super–Junction (SJ في الترانزستور (م أ س) المتأثر بالمجال تمكن الحصول على أعلى كفاءة تحويل الطاقة. ومع ذلك، ينشئ أداء تبديل سريع للغاية مما يتسبب في ظهور آثار جانبية غير مرغوب فيها، مثل شرارات جهد أو تيار أو سوء الأداء. استناداً إلى الاتجاهات الحديثة في النظم، تحسين كفاءة هو هدفا حاسما واستخدام عناصر تبديل بطيئة ليس هو حل أمثل٠

ترانزستور الطاقة (م أ س) المتأثر بالمجال لتصبح ذات تخدير عالي , مما يقلل من المقاومة الكهربائية لتدفق الإلكترون دون المساس بجهد الانهيار جنبا إلى جنب مع المنطقة المشابهة في التخدير لقطبية الشحنات الضد (الثقوب) ؛ التشابه بين الأثنين مع اختلاف نوع الموصلية يقوم بإلغاء الشحنات المتحركة وينشأ مناطق نضوب أو عزل والتي تدعم الجهد العالي خلال حالة عدم التشغيل. في الجانب الآخر، خلال حالة التشغيل فإن التخدير العالي للمنطقة العائمة يسمح بسهولة بحركة الشحنات مما يساهم في تخفيض قيم مقاومة التشغيل.

- أشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقية الواسعة

يتوقع تطور كبيرا في عناصر الطاقة من أشباه الموصلات بإحلال مواد أشباه الموصلات واسعة الفجوة الطاقية بدلا من السيليكون. في الوقت الحاضر، تعتبر مواد كربيد السليكون واعدة أكثر٠ صمام شوتكى من مادة كربيد السليكون ذات جهد انهيار ١٢٠٠ فولت متوفر تجاريا, وأيضا الترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة له جهد انهيار ١٢٠٠ فولت٠ وكلا العنصرين من عناصر ناقلات الشحنات الأغلبية, يمكن تشغيلهما عند سرعات عالية٠ تطورت الترانزستورات ثنائية القطبية لجهود عالية حتى ٢٠ كيلو فولت٠ من بين مزاياها، يمكن تشغيل عناصر كربيد السيلكون عند درجات حرارة عالية تصل الى ٤٠٠ درجة مئوية ولها مقاومة حرارية منخفضة بالمقارنة بعناصر السيلكون وتسمح بتبريد أفضل.

الجدول (٤ – ١) تصنيفات عناصر أشبه الموصلات المستخدمة في تطبيقات الطاقة

العنصر	التوصيف	التصنيف
الدايود أو صمام أشباه الموصلات الثنائي	أحادي القطبية – لا يمكن التحكم به – مبدل بين الأجهزة المستخدمة في تطبيقات مثل التقويم – دائرة مراقبة اتجاهات التيار – مانع للجهد العكسي – نموذج لمفتاح تبديل متصل على التوالي مع مصدر التيار الكهربائي عادة ٧و٠ فولت تيار مستمر – يمكن تعزيز النموذج ليشمل مقاومة وصلة، من أجل التنبؤ بدقة بقيمة الجهد الواقع على الدايود فيما يتعلق بتدفق التيار	حتى ٣٠٠٠ أمبير و٥٠٠٠ فولت لعنصر سليكون واحد– يتطلب الجهد العالي عناصر السيليكون متعددة على التوالي

مقوم سليكون يمكن التحكم فيه[٢٠]	شبه الخاضع للرقابة يعمل عند وجود نبضة على البوابة – الأنود موجب بالنسبة الى الكاثود – في وجود نبضة يعمل كأنه دايود نموذجي– عندما يكون الأنود سالب بالنسبة للكاثود يتحول لحالة عدم تشغيل ويمنع وجود الجهود الموجبة أو السالبة – جهد البوابة لا يسمح للعنصر بإيقاف التشغيل	حتى ٣٠٠٠ أمبير و٥٠٠٠ فولت لعنصر سليكون واحد
الثايرستور [٤]	يتبع مجموعة عناصر الثلاث أطراف وتشتمل على مقوم سليكون يمكن التحكم فيه – عناصر تحويل بوابة الثايرستور– ثايرستور م أ س قابل للتحكم– تحول نبضة البوابة الى وضع التشغيل– تتحول الى وضع إيقاف التشغيل عندما يكون جهد الأنود أقل من قيمة جهد الكاثود التي تحدد من خواص العنصر – الجهد العكسي يوقف التشغيل	قيمة جهد المطلوب لحالتي التشغيل وإيقاف التشغيل يتحدد من خواص العنصر – الجهد العكسي يوقف التشغيل
تحويل بوابة الثايرستور [٢١]	لا يشبه الثايرستور – يتحول من حالة التشغيل الى ايقاف التشغيل بواسطة نبضة البوابة– مسألة واحدة عند إيقاف التشغيل فإن جهد البوابة أكبر ويحتاج الى تيار أعلى أكبر من التحول الى حالة التشغيل – مطلوب دائرة امتصاص لتوفير منحنى التحويل – بدون دائرة الامتصاص لا يستخدم العنصر لتحويل الأحمال ذات الحث – بسبب تطوير الترانزستور ثنائي القطب معزول–البوابة [٢٢] فهذه العناصر غير شائعة الاستخدام في إلكترونيات الطاقة– تعتبر إعاقة الجهد التي تسيطر عليها وأحادي القطبية وثنائي القطبية	جهد إيقاف التشغيل جهد سالب من البوابة الى المنبع فقط لزمن قليل وقيمة التيار في حدود ثلث تيار الأنود. مطلوب دائرة امتصاص لتوفير منحنى التحويل

٢٠ مقوم سليكون يمكن التحكم فيه Silicon–controlled rectifier (SCR)

٢١ تحويل بوابة الثايرستور (gate turn–off thyristor (GTO) هو نوع خاص من الثايرستور، وهو عنصر أشباه الموصلات عالي الطاقة. أنه اخترع في "جنرال الكتريك" بدلاً من الثايرستور العادي، وهو مفتاح تبديل ذو التحكم الكامل الذي يمكن تشغيل وإيقاف تشغيله بواسطة الطرف الثالث (طرف البوابة)،

٢٢ الترانزستور ثنائي القطب معزول–البوابة (The Insulated–gate bipolar transistor (IGBT

ترياك [٢٣]	هو عنصر عبارة عن زوج متكامل من الثايريستورات متصلة بالتوازي معكوسة على رقاقة واحدة٠ يشبه مقوم سليكون يمكن التحكم فيه [١٢] في وجود نبضة على طرف البوابة يتحول الى حالة التشغيل ٠ الفرق الأساسي بينهما هو أن موجه إيجابية وسلبية على حد سواء يمكن أن تحول العنصر الى حالة التشغيل بشكل مستقل عن بعضها البعض ٠ متشابه مع مقوم سليكون في حالة التحوا الى حالة التشغيل – لا يمكن إيقاف تشغيل الترياك. ويعتبر الترياك مانع ثنائي القطبية وعكس الجهد.	باستخدام نبضة بوابة إيجابية أو سلبية يتحول الى حالة التشغيل أو إيقاف التشغيل بشكل مستقل
الترانزستور ثنائي القطبية	لا يمكن استخدامه في الطاقة العالية؛ ; أبطأ وذات فقد أكبر بمقارنتها بالترانزستور م أ س المتأثر بالمجال. يجب أن يكون تيار القاعدة كبير حتى يمكن أن يتحمل التيار المرتفع – الترانزستور ثنائي القطبية ذو فقد قدرة عالية – وهو أيضا مشابه بالترانزستور م أ س المتأثر بالمجال. وتعتبر أيضا أحادي القطب ولا يحجب الجهد العكسي بشكل جيد، ما لم يتم تركيبه في أزواج مع الصمامات الثنائية للحماية. لا يستخدم في دوائر التبديل في الإلكترونيات الطاقة بسبب الفقد في القدرة المرتبطة بالمقاومة ومتطلبات تيار القاعدة – ذو كسب تيار قليل في حزم الطاقة العالية، مما يتطلب وضعهم في تكوينات دارلينجتون من أجل التعامل مع التيارات التي تطلبها دوائر إلكترونية الطاقة. بسبب تكوينات الترانزستورات، ويمكن أيضا أن يتم توصيلهما على التوازي لزيادة طاقة المناولة، ولكن يجب أن تقتصر على حوالي ٥ عناصر تتشارك في التيار.	الحد الأقصى لجهد الخرج حوالي ١٥٠٠ فولت ومعدل تيار مرتفع ويمكن توصيل ٥ عناصر على التوازي تتشارك في التيار لزيادة طاقة المناولة – فإن سرعة التبديل في حدود مئات النانو ثانية إلى الميكرو ثانية٠

٢٣ ترياك (TRIAC) اختصار الى صمام ثلاثي للتيار المتردد (triode for alternating current) هي علامة تجارية عامة لمكونات إلكترونية ثلاثية الأطراف ويسرى فيها التيار في أي من الاتجاهين عند التشغيل. اسمها الرسمي هو الثايرستور عنصر ثلاثي ثنائي الاتجاه شبيهة بعنصر تحويل (relay) يمكن من خلاله تحويل الجهد وتيار قيمته صغيرة الى جهد وتيار أكبر بكثير ٠

ترانزستور قدرة م أ س متأثر بالمجال	الفائدة الرئيسية هو أن تيار البوابة غالبا يساوى صفر حيث أنه ذو قناة نضوب، الجهد، وليس التيار، ضروري لإنشاء مسار توصيل من المستنزف الى المنبع. البوابة لا تساهم في تيار المستنزف أو المنبع. تيار تشغيل البوابة أساسا صفر مع الفقد في القدرة على البوابة يحدث فقط خلال التحول. الفقد نتيجة إلى المقاومة في حالة التشغيل. تظهر الحسابات ارتباط مباشر لمقاومة التشغيل بين المستنزف والمنبع ومعدل حجب الجهد يساوى جهد الانهيار – يتراوح زمن التبديل من عشرات النانو ثانية الى مئات الميكرو ثانية يعتمد على خواص العنصر. كلما زاد التردد يزداد الفقد ٠ يمكن توصيل ترانزستورات القدرة م أ س المتأثرة بالمجال على التوازي لزيادة تيار التبديل وبالتالي طاقة التحويل – ترانزستورات م أ س المتأثرة بالمجال ليست ثنائية القطبية ولا تحجب الجهد العكسي.	يتراوح جهد التبديل من الفولت الى ١٠٠٠ فولت مع تيار يصل الى ١٠٠ أمبير٠ العناصر الحديثة لها خصائص تشغيل أعلى ٠
الترانزستور ثنائي القطب ذو بوابة معزولة [١٦]	ذو مقاومة بوابة عالية، وبالتالي يتطلب تيار بوابة منخفض. يشبه الترانزستور ثنائي القطب ذو جهد منخفض في حالة التشغيل، ومن ثم فقد بسيط في الطاقة عبر التبديل في وضع التشغيل. مشابه الى عناصر تحويل بوابة الثايرستور [١٤] ويستخدم لمنع كل من الجهود الموجبة – ذو سعة دخل منخفضة بالمقارنة بالترانزستور م أ س المتأثر بالمجال الذي يحسن تأثير ميلر للتغذية العكسية خلال معدل تغير الجهد مع الزمن للتحويل لحالة التشغيل وحالة إيقاف التشغيل	تيار التشغيل مرتفع أعلى من ١٥٠٠ أمبير وجهد التبديل حتى ٣٠٠٠ فولت – ذو سعة دخل منخفضة
ثايرستور م أ س قابل للتحكم [١٤]	يشبه الثايرستور ويمكن تشغيله أو إيقاف تشغيله بواسطة نبضة للبوابة ٠ يمر القليل جداً من التيار والسماح لإشارات التحكم في الطاقة منخفضة جداً. يتكون من عدد مدخلين ومرحلتين خرج من ترانزستور ثنائي القطبية ٠ مدخل الترانزستور م أ س المتأثر بالمجال تم تكوينه ليسمح بالتحكم بالتشغيل أثناء كل من نصفي النبضة الموجبة والسالبة. يتكون خرج ترانزستور ثنائي القطبية	التبديل السريع بين الترددات، الجهد العالي إلى حد ما ومعدلات تبار متوسطة حوالي ١٠٠ أمبير

	للسماح بالتحكم في الاتجاهين وجهد منع عكسي منخفض. من مزاياه التبديل السريع بين الترددات،	
الثايرستور كوموتاتيد بوابة متكاملة [٢٤]	يشبه عناصر تحويل بوابة الثايرستور [١٤] ولكن دون المتطلبات التيار المرتفع لتحميل أو إيقاف التحميل. ويستخدم للتبديل السريع مع قيم تيار بوابة صغيرة- ذو مقاومة الإدخال مرتفعة بسبب برامج تشغيل بوابة الترانزستور م أ س المتأثر بالمجال- ذو مقاومة خرج صغيرة مما لا يتسبب في فقد الطاقة – سريع جدا وزمن العبور أسرع من الترانزستور ثنائي القطبية – يتكون من بوابة مع مدخل بصري معزول، مقاومة التشغيل صغيرة – خرج الترانزستور ثنائي القطبية الذي يؤدي إلى انخفاض الجهد وفقد الطاقة منخفض إلى حد ما مستويات جهد التبديل والتيار مرتفعة٠	قادرة على التحويل من ٥٠٠٠ فولت تيار متردد و٥٠٠٠ أمبير بترددات عالية جداً،

٤ – ٤ الصمام الثنائي (ب م ن) [٢٥]

الشكل (٤ – ٦) تكوين الصمام الثنائي (ب م ن)

الصمام الثنائي (ب م ن) هو صمام ثنائي يشتمل على منطقة واسعة غير مخدرة من مادة شبه موصل جوهرية تتوسط طبقتين شبه موصل أحدهما من النوع (ب) والأخرى من النوع (ن)٠ وعادة ما تكون المنطقتين (ب) و(ن) ذات تخدير عالي التركيز حيث تستخدم المنطقتين كموصلات أومية٠المنطقة الجوهرية المتوسطة تجعل منه مقوم فقط (وهى أحد وظائف الصمام

---

٢٤ الثايرستور كوموتاتيد بوابة متكاملة (IGCT) integrated gate-commutated thyristor عنصر قدرة شبه موصل لتحويل التيار الكهربائي في المعدات الصناعية. ينتمي الى مجموعة الثايرستور تحويل بوابة (GTO) gate turn- off thyristor مشابه له (GTO)٠ وهو عنصر تبديل يمكن التحكم فيه بشكل كامل، بمعنى أنه يمكن التحويل لكل من حالتي التشغيل وإيقاف التشغيل بالحكم في طرف البوابة ٠ التحكم في البوابة إلكترونيا متكامل مع الثايرستور.

٢٥ الصمام الثنائي (ب م ن) (PIN diode)

الثنائي النموذجي المعروف) ، مما يجعل من الصمام الثنائي (ب م ن) مناسب لتطبيقات[٢٦] المخفضات الكهربائية، ومفاتيح التبديل السريعة، أجهزة الاستشعار البصرية، وتطبيقات إلكترونيات الطاقة والجهد العالي .

- **التشغيل**

يعمل الصمام الثنائي (ب م ن) تحت ما يعرف بمستوى الحقن العالي [٢٧] وبعبارة أخرى، فإن المنطقة الجوهرية المتوسطة أغرقت بحاملات الشحنات من المنطقتين (ب) و(ن) ٠ وتكون وظيفتها تشبه لملء دلو من الماء مع وجود فتحات على شكل ثقوب في الجانب. بمجرد أن يصل مستوى المياه الى مستوى الفتحات تبدأ سكب الماء وبالمثل، فإن الصمام الثنائي يبدأ بتوصيل التيار الكهربائي بمجرد وصول الإلكترونات والثقوب إلى مستوى التوازن حيث يتساوى عدد الإلكترونات مع عدد الثقوب في المنطقة الجوهرية المتوسطة. عند توصيل الصمام بجهد أمامي فإن تركيز الشحنات المحقونة عادة أكبر بمرات عديدة من تركيز الشحنات في مستوى المادة الجوهرية. ونتيجة للحقن عالي التركيز، والذي يرجع إلى **عملية الاستنزاف**، يمتد المجال الكهربائي بعمق (تقريبا الطول الكلى) للمنطقة الجوهرية المتوسطة (م). ويساعد المجال الكهربائي في تسريع نقل حاملات الشحنة من المنطقة (ب) الى المنطقة (ن) مما يؤدي إلى تشغيل أسرع في الصمام الثنائي، مما يجعله مناسب لتطبيقات الترددات العالية.

- **الخصائص**

تطبق المعادلات القياسية لإشارات التردد المنخفض للصمام الثنائي النموذجي على الصمام الثنائي (ب م ن) ٠ تقترب خصائص الصمام الثنائي (ب م ن) من الكمال عند الترددات المرتفعة حيث تسلك مقاومة الصمام السلوك الخطي. يوجد العديد من الشحنات المخزنة فى المنطقة

---

٢٦ المخفضات الكهربائية، ومفاتيح التبديل السريعة، أجهزة الاستشعار البصرية، إلكترونيات الطاقة والجهد العالي (**attenuators, fast switches, photo detectors, and high voltage power electronics**)

٢٧ يعنى مستوى الحقن العالي في أشباه الموصلات أن عدد الشحنات المتولدة كبيرة بالمقارنة بكثافة المواد المنشطة الأساسية في المادة. في هذه الحالة فإن معدل تلاحم ناقلات الشحنات الأقلية يتناسب مع مربع عدد الشحنات.

الجوهرية المتوسطة، عند الترددات المنخفضة، يمكن التخلص من الشحنات ويتحول الصمام الى حالة إيقاف التشغيل. عند الترددات العالية لا يوجد وقت كافي للتخلص من الشحنات، وبالتالي يستمر الصمام في التوصيل الكهربائي ولا يتحول الى حالة إيقاف التشغيل حيث أن زمن الاستجابة العكسي قصير [٢٨]. مقاومة الترددات العالية تتناسب عكسيا مع التيار المباشر للتغذية في الصمام الثنائي. في حالة تغذية الصمام (ب م ن) تغذية مناسبة فإن الصمام يسلك مسلك المقاومة المتغيرة وتتغير مقاومة الصمام عند الترددات العالية على نطاق واسع (من ٠,١ أوم إلى ١٠ ك أوم) في بعض الحالات ؛ نجد أن نطاق الاستفادة أصغر على الرغم من أن المنطقة الجوهرية واسعة وهذا يعني أن قيم السعة في الصمام منخفضة عند التحول الى التغذية العكسية ٠ في الصمام الثنائي (ب م ن) نجد منطقتي النضوب تقريبا داخل المنطقة الجوهرية, حيز النضوب أكبر بكثير من حيز النضوب في الصمام الثنائي (ب ن) النموذجي ، وغالبا بحجم ثابت، ولا يعتمد على قيمة جهد التحيز العكسي المطبق على الصمام (ب م ن) ٠ مما يزيد من حجم منطقتي النضوب حيث يمكن أن تتولد أزواج الإلكترونات والثقوب بواسطة الفوتون الحادث٠ بعض عناصر الاستشعار مثل الثنائيات (ب م ن) والترانزستورات الضوئية[٢٩] نجد أن الوصلة بين القاعدة والمجمع عبارة عن ثنائي (ب م ن) مستخدما الوصلة (ب م ن) في تكوين الترانزستور. يشتمل تصميم الصمام (ب م ن) بعض الميزات والعيوب منها زيادة أبعاد المنطقة الجوهرية (وكثافة الشحنات المخزنة) تجعل من الصمام الثنائي وكأنه مقاومة في الترددات المنخفضة وذلك يؤثر سلبا على الزمن اللازم لتحويل الصمام الى حالة

---

٢٨ عند تحويل الصمام الثنائي من حالة التشغيل الى حالة إيقاف التشغيل وحيث أن هناك شحنات مخزنة في المنطقة الجوهرية المتوسطة في الصمام التي يجب أولا تفريغها والتخلص منها قبل أن يمنع الصمام التيار العكسي. يحتاج تفريغ الشحنات زمن محدد يشار له زمن الاستجابة العكسي (reverse recovery time)٠

٢٩ يستخدم الترانزستور الضوئي (phototransistors) الضوء بدلا من الكهرباء لسريان التيار الكهربائي من جانب الى الجانب الآخر ٠ ويستخدم في العديد من أجهزة الاستشعار للكشف عن وجود الضوء. يجمع الترانزستور الضوئي بين صمام ثنائي ضوئي (ب م ن) وترانزستور معا لتوليد التيار الخارج بقيم أكبر من الصمام الثنائي الضوئي (ب م ن) (PIN diode) فقط ٠

إيقاف التشغيل ويؤثر سلبا أيضا على السعة، يمكن تصميم الصمام (ب م ن) لتطبيقات معينة مطلوبة.

❖ تطبيقات

للصمام الثنائي (ب م ن) عدة تطبيقات منها عناصر التبديل لترددات الراديو والمخفضات الكهربائية وأجهزة الاستشعار البصرية وعناصر تحول الأوجه.

- عناصر التبديل لترددات الراديو في نطاق الترددات الميكروية

للصمام الثنائي (ب م ن) قيم سعة منخفضة في حالة التغذية العكسية أو جهد يساوى صفر مما لا يسمح بمرور إشارات ترددات الراديو ٠ في ظل تغذية أمامية بقيمة ١ مللي أمبير، فإن مقاومة الترددات العالية للصمام الثنائي (ب م ن) حوالي ١ أوم ، مما يجعل من الصمام جيد التوصيل لترددات الراديو وبالتالي فإن الصمام الثنائي (ب م ن) يعتبر عنصر تبديل جيد في نطاق الترددات العالية. على الرغم من أن عناصر التناوب أو التبديل للترددات العالية يمكن استخدامها بوصفها مفاتيح تبديل شديدة البطأ (في حدود ١٠ مللي ثانية) إلا أن الصمام الثنائي (ب م ن) يمكنه التبديل بسرعة أكبر بكثير حوالي ١ ميكرو ثانية.

الشكل (٤ – ٧) صمام ثنائي (ب م ن) كعنصر تبديل لترددات الراديو فى نطاق الترددات الميكروية

قيم السعة للصمام الثنائي (ب م ن) حوالى ١ بيكو فاراد عند تردد ٣٢٠ ميجا هيرتز وتصل المفاعلة كقيمة تخيلية حوالي – ٥٠٠ أوم لقيمة السعة ١ بيكو فاراد كعنصر متصل على التوالي في نظم معاوقه المطابقة ٥٠ أوم ٠ قيمة التوهين في حالة عدم التشغيل منخفضة

بالمقارنة الى مجموع الأحمال والصمام ومعاوقة المنبع أي حوالى ٢٠ ديسبل التي قد لا تكون كافية٠ في التطبيقات التي تحتاج إلى قيم عزل عالية ، قد تستخدم مجموعة عناصر على التوالي والتوازي مع تغذية العناصر المتصلة على التوازي بشكل متكامل مع العناصر المتصلة على التوالي. إضافة العناصر على التوازي يخفض بفاعلية معاوقة المنبع والحمل مما يقلل من نسبة المعاوقة ويزيد قيمة التوهين في حالة عدم التشغيل. ومع ذلك، بالإضافة إلى التعقيدات المضافة، ترتفع قيم التوهين في حالة التشغيل بسبب مقاومة المنع المتصلة على التوالي في حالة التشغيل وسعة العناصر المتصلة على التوازي في حالة إيقاف التشغيل. يستخدم الصمام الثنائي (ب م ن) كعنصر تبديل ليس فقط لاختيار الإشارة، ولكن يستخدم لاختيار العنصر على سبيل المثال، بعض عناصر التذبذب ذات الضوضاء المنخفضة تستخدم الثنائيات (ب م ن) لنطاق التبديل لملفات الحث.

❖ المخفضات المتغيرة (المخففات) [٣٠] لترددات الراديو والموجات الميكروية عن طريق تغيير تيار التغذية في الصمام الثنائي (ب م ن)، فمن الممكن التغير السريع لمقاومة ترددات الراديو. في الترددات العالية، يعتبر الصمام الثنائي (ب م ن) كمقاومة قيمتها دالة عكسية للتيار الأمامي.

الشكل (٤ – ٨) مخفف ترددات الراديو والموجات الميكروية

٣٠ المخفف أو المخفض (attenuator) عنصر إلكتروني يخفض السعة أو قوة إشارة دون تشويه كبير لشكل الموجة. على عكس مكبر الصوت. يوفر مكبر الصوت كسب أكبر من الواحد، بينما الكسب في المخفف أقل من ١. المخففات عناصر سلبية (passive devices) يتم تكوينها باستخدام شبكات مقسم الجهد بسيط (simple voltage divider networks). وهي دائرة تمنع أو تعارض نطاق تردد معين وتستخدم لتصفية والحد من الضوضاء في الدائرة. مخففات ترددات الراديو محورية التكوين (coaxial in structure) يتم التعبير عن التوهين بوحدات الديسيبل أو القدرة النسبية.

ونتيجة لذلك، يستخدم الصمام الثنائي (ب م ن) في بعض التصاميم للمخففات المتغيرة كمعدل سعة [٣١] أو لضبط مستوى خرج الدوائر. يستخدم الصمام الثنائي (ب م ن) على سبيل المثال كقنطرة ومقاومة على التوازي في عناصر التوهين المشار لها قنطرة على شكل حرف تى[٣٢]. يمكن استخدام الثنائيات (ب م ن)، كتحويلة لبوابتين متصلة على شكل عمودي – يتم توصيل الإشارة المطلوب تخفيضها إلى مدخل البوابة، ويتم الحصول على خرج الموهن من بوابة معزولة ومن مزايا هذا النهج) ما يلي:

١. يشتمل الصمام الثنائي (ب م ن) على محركات غير ضرورية ويتم توصيل نفس قيمة التغذية لكلا الصمامين حبت الفقد في المخفف يساوي الفقد في العودة، والتي يمكن أن تختلف على نطاق واسع جدا.
٢. فقد الموهن يساوى الفقد المرتجع من التحويلات المتغيرة على نطاق واسع.

❖ المحددات

يستخدم أحيانا الصمام الثنائي (ب م ن) كعنصر حماية إدخال للأجهزة كأطراف اختبار الترددات العالية. فإذا كانت إشارة الدخل في نطاق التطبيق، فإن الصمام الثنائي (ب م ن) له تأثير سعة صغيرة. في حالة أن تكون إشارة الدخل كبيرة، يبدأ الصمام الثنائي (ب م ن) في التوصيل ويصبح وكأنه مقاومة على التوازي لتوصيل معظم الإشارة إلى الأرض.

❖ عناصر الاستشعار والمكتشفات الضوئية [٣٣]

ظهر الصمام الثنائي الضوئي (ب م ن) في العام ١٩٥٠م واستخدم في عناصر شبكات الألياف البصرية وعناصر التبديل. يتم تغذية الصمام الثنائي (ب م ن) بجهد عكسي تحت

---

٣١ معدل سعة (AM) Amplitude modulationتقنية تستخدم في الاتصالات غالبا فى تقنيات إرسال المعلومات من خلال موجة راديو حاملة.

٣٢ موهن القنطرة على شكل حرف (T) Bridged–T Attenuator تصميم سلبي الكامل (purely resistive) وهو مختلف عن الموهن ذات اللوح تي المتناظر (symmetrical T–pad Attenuator) . كما يوحى الاسم فإن موهن القنطرة (T) يشتمل على عنصر سلبي إضافي يكون قنطرة شبكة بين المقاومتين على التوالي .

٣٣ عناصر الاستشعار والمكتشفات الضوئية (detector and photovoltaic cell Photo)

الانحياز العكسي عادة ينقطع التوصيل ما عدى قيم تيار صغيرة كتيار إظلام أو التيار المتسرب. عندما يدخل فوتون بطاقة كافية الى منطقة الاستنزاف أو النضوب للصمام الثنائي، يتم توليد أزواج من الإلكترونات والثقوب . يستقطب مجال الجهد العكسي حاملات الشحنات الى الخارج ويسرى تيار كهربائي. يمكن لبعض أجهزة الكشف استخدام ظاهرة تضاعف الانهيار [٣٤]. تنطبق نفس الآلية على تكوينات (ب م ن) للخلايا الشمسية وفي هذه الحالة، تعتبر استجابة العنصر (ب م ن) للطول الموجي الطويل أفضل بالمقارنة لثنائيات أشباه الموصلات التقليدية (ب ن). في حالة إشعاع طول موجي طويل، تخترق الفوتونات التي تولدت من أزواج الإلكترونات والثقوب في وبالقرب من منطقة النضوب حتى عمق الخلية والتي تساهم في سريان التيار. تمتد منطقة الاستنزاف أو النضوب في تكوينات (ب م ن) عبر المنطقة الجوهرية المتوسطة في عمق العنصر٠ عرض منطقة الاستنزاف الواسع يساعد على توليد أزواج الإلكترونات والثقوب في عمق الصمام مما يزيد من كفاءة الكم للخلية٠ كفاءات الكم للصمامات الثنائية الضوئية (ب م ن) المتاحة تجاريا أعلى من ٨٠-٩٠٪ في نطاق الاتصالات ذات الطول الموجي ~ ١٥٠٠ نانومتر، وعادة ما تكون مصنوعة من الجرمانيوم أو جاليوم أرسنيد ولها استجابة سريعة (أعلى من الوصلات النموذجية ب ن)، وقد تصل إلى عدة عشرات من جيجا هيرتز، مما يجعلها مثالية للسرعات العالية في تطبيقات الاتصالات البصرية. الصمامات الثنائية الضوئية (ب م ن) من السيلكون ذات كفاءات كم أعلى، ولكن يمكنها فقط الكشف عن أطوال موجات أقل من قيمة الفجوة الطاقية للسيليكون، أي ~ ١١٠٠ نانومتر. عادة ، يستخدم السيليكون الغير متبلور في عناصر الأفلام الرقيقة ذات التكوين (ب م ن). من ناحية أخرى، تستخدم تكوينات (ب م ن) في عناصر كادميوم تليراید مع عكس التكوين (ن م ب) فإن المنطقة الجوهرية من كادميوم تليراید تتوسط منطقة من كبريتات الكادميوم ذات تطعيم من

---

٣٤ عناصر الانهيار الجليدي الضوئي (APD) avalanche photodiode هو عنصر من أشباه الموصلات عالي الحساسية يستغل التأثير الكهروضوئي في تحويل الضوء إلى كهرباء ٠ يمكن اعتبار عناصر الانهيار الجليدي الضوئي كعناصر كشف ضوئي توفر كمرحلة أولى تحقيق كسب من خلال تضاعف الانهيار (avalanche multiplication). من الجانب الفني، يمكن استخدام عناصر أشباه الموصلات التناظرية إلى إلى المضاعفات الضوئية (multipliers photo to)

النوع (ن) ومنطقة من زنك تليرايد ذات تطعيم من النوع (ب). تنتج الفوتونات على الطبقة المطعمة (ن) عكس الصمام الثنائي (ب م ن) ويمكن للثنائي الضوئي (ب م ن) كشف الأشعة السينية وأشعة فوتونات جاما.

٤ – ٥ صمام شوتكى الثنائي

يعرف أيضا باسم صمام حاملات الشحنات الساخنة [٣٥] وهو ثنائي شبه موصل بانحياز أمامي منخفض وذو سرعة تبديل عالية. استخدمت قديما عناصر كاشف القط الخط الطولي[٣٦] للمحولات اللاسلكية كما أستخدم المقوم المعدني في تطبيقات الطاقة ويمكن اعتبار ثنائي شوتكى بدائى٠ عندما يتدفق تيار أمامي خلال صمام شوتكى ينشأ انخفاض في الجهد بسيط على طرفيه يتراوح بين ١٥و٠ الى ٤٥و٠ فولت بينما ينشأ في الصمام الثنائي النموذجي من السيليكون انخفاض جهد يتراوح بين ٦و٠ الى ٧و٠ فولت ، يمكن استخدام هذا الانخفاض في الجهد للحصول على سرعة تبديل عالية وكفاءة نظام أفضل.

الشكل (٤ – ٩) كاشف القط الخط الطولي

تتكون الوصلة في صمام شوتكى بين قطب معدني – وشريحة شبه موصل ينشأ عنهما حاجز شوتكى. المعادن النموذجية المستخدمة مثل مولبيديوم – بلاتين – كروم أو تنجستن،

---

٣٥ حاملات الشحنات الساخنة hot carrier diode (Schottky diode) ويعود اسم شوتكى للفيزيائي الألماني والتر شوتكى

٣٦ كاشف القط–الخط الطولي (cat's–whisker detector) أحيانا يسمى الكاشف البلوري وهو مكون إلكتروني قديم يتكون من سلك طويل يلامس بلورة شبه موصل خام ويعمل مقوم نقطة الاتصال

وبعض سيلسيدات على سبيل المثال سيليسيد البلاديوم وسيليسيد البلاتين بينما يكون شبه الموصل من السيليكون نوع (ن). القطب المعدني بمثابة الأنود، وشريحة شبه الموصل من النوع (ن) بمثابة الكاثود في الصمام الثنائي. يؤدى حاجز شوتكي التبديل السريع جداً وينشأ انخفاض قليل في الجهد الأمامي. يحدد اختيار مادة الأنود المعدنية ومادة الكاثود شبه الموصل بنوعيه (ن) و(ب) قيمة الجهد الأمامي لصمام شوتكى٠ ينشأ حاجز شوتكي كلما زاد تيار التسرب العكسي زيادة كبيرة مع انخفاض الجهد الأمامي، لا يمكن أن يكون الجهد الأمامي منخفض جدا، حيث تكون القيم المستخدمة حوالي ٥و٠ الى ٧و٠ فولت، ولا يستخدم شبه الموصل من النوع (ب) إلا نادراً. سيليسيد التيتانيوم وغيرها من مواد السيليسيدات المقاومة للحرارة والقادرة على تحمل درجات الحرارة اللازمة للمنبع/ والمستنزف في تقنية المعدن – أكسيد – أشباه الموصلات المكملة [٣٧]، عادة ما يكون الجهد الأمامي المستخدم منخفضا للغاية، التقنيات التي تستخدم مواد السيليسيدات عادة لا تستخدم في ثنائي شوتكى. بزيادة كثافة تخدير الشبه موصل يقل عرض منطقة النضوب. في حالة أن تكون عرض منطقة النضوب أقل من عرض معين، تتمكن ناقلات الشحنات الانتقال من خلال نفق فى منطقة النضوب عند مستويات أعلى لكثافة التخدير، لا تتصرف الوصلة كمقوم ولكنها تصبح كمقاومة ٠ تتشكل الوصلات بين مادة السيليسيد ومنطقة شبه موصل خفيفة التخدير من النوع (ن) كما تتشكل مقاومة اتصال بين السيليسيد ومنطقة شبه الموصل كثيفة التخدير من النوع (ن) أو (ب). تشكل مناطق شبه الموصل من النوع (ب) خفيفة التخدير مشكلة كنتيجة فإن الوصلة الناتجة ذات قيمة مقاومة عالية، ولكن أيضا انخفاض الجهد الأمامي وتيار تسرب عكسي كبير في تكوين صمام ثنائي جيد٠ كلما كانت حواف وصلة شوتكى حادة إلى حد ما، يحدث مجال كهربائي عالي حول الوصلة، مما يحد من قيمة جهد الانهيار المرتفع. تستخدم استراتيجيات

---

٣٧ المعدن – أكسيد–أشباه الموصلات المكملة Complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) وهي تكنولوجيا تكوين الدوائر المتكاملة

مختلفة من استهلاك الحلقات الحارسة من مساحة الركيزة وتستخدم أساسا للصمامات الثنائية الكبيرة للجهد العالي. بينما التداخل المعدني يستخدم أساسا للصمامات الصغيرة للجهد المنخفض. وكثيراً ما يستخدم صمام شوتكي كمشبك مضاد للتشبع في ترانزستور شوتكي. صمام شوتكي المصنع من سيليسيد البلاديوم ممتاز بسبب انخفاض الجهد الأمامي الذي يجب أن يكون أقل من الجهد الأمامي للوصلة بين القاعدة والمجمع. المعامل الحراري لشوتكي أقل من المعامل الحرارة للوصلة بين القاعدة والمجمع، مما يحد من استخدام سيليسيد البلاديوم في درجات الحرارة المرتفعة. تعتبر المقاومات الطفيلية للمنطقة (ن$^{+}$) المدفونة والمنطقة الفوقية من النوع (ن) لصمامات شوتكى للطاقة معاملات مهمة٠ مقاومة المنطقة الفوقية أكثر أهمية مما عليه في الترانزستور، حيث يجب أن يتدفق التيار عابرا السمك بالكامل. فهي بمثابة مقاومة موزعة على كامل مساحة الوصلة، وفي ظل الظروف العادية، يمنع التهرب الحراري المحلى. بالمقارنة بصمامات الطاقة الثنائية (ب ن) فإن صمام شوتكى أقل وعورة٠ تتصل الوصلة مباشرة مع المعدن الحساس حراريا، وبالتالي يبدد صمام شوتكى طاقة أقل بالمقارنة من وصلة (ب ن) المدفونة في العمق ومساوية في الأبعاد قبل الانهيار وبخاصة أثناء جهد الانهيار العكسي. الميزة النسبية للجهد الأمامي المنخفض في صمامات شوتكي يتناقص في وجود أعلى التيارات الأمامية مرتفعة حيث يهيمن انخفاض الجهد على المقاومة المتصلة على التوالي.

❖ زمن الاسترداد العكسي [٣٨]

الاختلاف الأكثر أهمية بين الصمام الثنائي (ب ن) وصمام شوتكى الثنائي هو زمن الاسترداد العكسي (t_{rr})، في الصمام الثنائي (ب ن) زمن الاسترداد العكسي في حدود مئات النانو ثانية الى أقل من ١٠٠ نانو ثانية للصمامات السريعة عند التبديل من حالة التشغيل الى حالة إيقاف التشغيل. صمام شوتكى ليس له زمن استرداد حيث لا يوجد شيء للتعافي منه بمعنى لا يوجد

---

٣٨ زمن الاسترداد العكسي (reverse recovery time) في حالة الانحياز الأمامي للصمام وتحويلة فورا إلى حالة الانحياز العكسي، سيقوم الصمام بالتوصيل في الاتجاه العكسي لفترة قصيرة مثل استبعاد الجهد الأمامي. التيار عن طريق الصمام الثنائي سيكون إلى حد كبير في اتجاه العكسي خلال زمن الانتعاش القليل ويشار له (t_{rr}).

حاملات شحنات في منطقة النضوب عند الوصلة. زمن التبديل حوالي ١٠٠ بيكو ثانية لصمامات الإشارات الصغيرة وتصل الى عشرات نانو ثانية للثنائيات الخاصة ذات سعة الطاقة العالية. في وصلات (ب ن) يوجد أيضا زمن استرداد عكسي عند التبديل، حيث تسبب زيادة التداخل الكهرومغناطيسي [٣٩] كضوضاء في أشباه الموصلات عالية الطاقة أما مع صمام شوتكى فإن التبديل أساسا لحظي مع حمل سعة طفيف، وهو لا يعنى شيء. فى صمامات شوتكى عالية الجهد على وجه الخصوص فإن التبديل اللحظي ليس دائما هو القاعدة ، يحتاج التكوين الحلقى الحارس التحكم في انهيار المجال الناتج من المكونات الطفيلية في الصمام الثنائي (ب ن) مع سمات زمن الاسترداد المعتاد التي ستتأثر إلى حد كبير ولهذا السبب فإن قيم زمن الاسترداد العكسي في حالة التيار الأمامي المنخفض جداً في حدود ١٠ ميلي أمبير الى أقل من واحد أمبير٠ يتم توزيع نماذج صمام شوتكي غالبا دون تقرير فنى لمعاملات التشغيل ولكن معظم التطبيقات تستخدم ثنائيات شوتكي التي تعمل في نطاق أعلى من ٥٠ فولت . غالبا ما يقال إن صمام شوتكى هو عنصر شبه موصل لناقلات الشحنات الأغلبية وهذا يعني أنه إذا كانت منطقة أشباه الموصلات مطعمة بشوائب من النوع (ن)، فإنها تلعب دوراً هاما في تشغيل العنصر. يتم حقن حاملات الشحنات الأغلبية بسرعة في نطاق التوصيل للوصلة المعدنية على الجانب الآخر من الصمام الثنائي لتصبح إلكترونات حرة متحركة٠ ولذلك، لا تشارك الشحنات من النوع (ن) و(ب) في الاندماج العشوائي البطيء، حتى أن الصمام الثنائي يمكنه وقف التوصيل أسرع من مقوم الصمام الثنائي التقليدي. تسمح هذه الخاصية بدورها بمساحة أصغر مما يجعل أيضا الانتقال أسرع وهذا سبب آخر لاستخدام صمام شوتكي كعنصر تبديل في محولات الطاقة. تعنى السرعة العالية للصمام الثنائي أن الدائرة يمكن أن تعمل بترددات في النطاق ٢٠٠ كيلوهرتز إلى ٢ ميجاهرتز، تسمح باستخدام لفائف صغيرة ومكثفات بكفاءة أكبر مما هو ممكن مع أنواع أخرى من الصمامات الثنائية. المساحة الصغيرة

---

٣٩ التداخل الكهرومغناطيسي Electromagnetic interference (EMI) يسمى أيضا تداخل ترددات الراديو –radio frequency interference (RFI) عندما تكون في نطاق الترددات الراديوية، يتولد اضطراب بواسطة مصدر خارجي يؤثر على الدائرة الكهربائية بالحث الكهرومغناطيسي، الربط الكهربائي، أو التوصيل

لصمام شوتكي هي بمثلبة القلب في كاشفات الترددات اللاسلكية التي كثيرا ما تعمل بترددات تصل إلى ٥٠ جيجا هرتز. القيود الأكثر وضوحا في صمامات شوتكى فإن معدل الجهد العكسي منخفض مع ارتفاع تيار التسرب العكسي نسبيا. في وصلات شوتكى سليكون – معدن فإن الجهد العكسي النموذجي ٥٠ فولت أو أقل ٠ تتوفر بعض التصميمات للجهود العالية ٢٠٠ فولت والتي تعتبر جهد عكسي عالى٠ تيار التسرب العكسي حيث أن قيمته ترتفع مع ارتفاع درجة الحرارة تتسبب في عدم الاستقرار الحراري. وكثيراً ما يحد هذا من فائدة الجهد العكسي إلى أقل بكثير من المعدل الفعلي بينما ارتفاع الفولتية العكسية قابل للتحقيق، مما سيؤدى الى جهد انهيار أمامي عالي بالمقارنة بأنواع الصمامات الأخرى القياسية مثل ثنائيات شوتكي لن يكون لها ميزة ما لم يكن مطلوباً التبديل بسرعة كبيرة.

❖ صمام شوتكى من كربيد السيلكون

صمام شوتكى المصنع من كربيد السيلكون له تيار تسرب منخفض وجهد عكسي عالي بالمقارنة بصمام شوتكى المصنع من السليكون، في العام ٢٠١١ توفرت صمامات شوتكى من كربيد السيلكون بمعدلات تشغيل تصل الى ١٧٠٠ فولت٠ كربيد السيلكون يتميز بخواص حرارية جيدة وموصلية حرارية عالية وأن درجات الحرارة ذات تأثير بسيط في حالات التبديل. مع التغليف الخاص، يمكن أن تعمل صمامات شوتكى من كربيد السليكون عند درجات الحرارة لما يزيد على ٢٠٠ درجة مئوية التي تسمح بالتبريد الإشعاعي في تطبيقات الفضاء الجوي.

❖ التطبيقات

- عناصر الاستشعار بالجهد [٤٠]

---

٤٠ مستشعر الجهد (voltage clamp) أسلوب تجريبي لقياس أيونات التيار (ion currents) من خلال أغشية الخلايا المنفعلة (membranes of excitable cells) ، مثل الخلايا العصبية (neurons) ، بينما يحافظ على جهد الغشاء على المستوى المطلوب. مستشعر الجهد الأساسي يقوم بقياس تكراري لجهد الغشاء المحتمل ثم يقوم بتغيير جهد الغشاء المحتملة (الجهد) إلى القيمة المطلوبة عن طريق إضافة التيار اللازم.

انخفاض الجهد الأمامي في صمامات السيلكون القياسية حوالي ٦و٠ فولت وفى الجرمانيوم ٢و٠ فولت أما في صمامات شوتكى فإن انخفاض الجهد الأمامي عند تيار ١ ميلي أمبير في حدود ١٥و٠ الى ٤٦و٠ فولت٠ مما يجعلها مفيدة في تطبيقات استشعار وقياس الجهد ومنع تشبع الترانزستور.

- عناصر الحماية من التفريغ الكهربائي ومن التيار العكسي

حيث أن صمامات شوتكى ذات جهد أمامي منخفض، وبالتالي يتبدد قليل من الطاقة كحرارة مما يجعلها الخيار الأكثر كفاءة للتطبيقات الحساسة للكفاءة على سبيل المثال، تستخدم في النظم الكهربائية الضوئية المستقلة خارج الشبكة لتمنع تفريغ بطاريات الألواح الشمسية خلال الليل وتسمى صمامات صد أو منع كما أنها تستخدم في النظم الموصولة مع دوائر متعددة متصلة بالتوازي، لمنع سريان التيار العكسي من التدفق من الدوائر المتاخمة من خلال مظللة دوائر في حالة فشل في "تجاوز الثنائيات".

- مصادر الطاقة بأنماط التبديل

تستخدم صمامات شوتكى كمقومات في مصادر الطاقة بأنماط التبديل حيث أن الجهد الأمامي المنخفض وزمن الاسترداد السريع يؤدى الى زيادة الكفاءة وأيضا تستخدم في إمدادات شبكات الطاقة في نظام الدوائر المغلقة [٤١] في خطوط الإنتاج والتي تشتمل على مصادر كهربائية داخلية ومصدر الطاقة الرئيسي. تظهر المشاكل حيثما يتواجد تيار التسرب العكسي المرتفع، كأي دائرة استشعار للجهد لها معاوقة مرتفعة على سبيل المثال رصد الجهد في البطارية أو الكشف عما إذا كان محول التيار الكهربائي موجود من عدمه فسوف تظهر قيم الجهد من مصدر الطاقة الأخرى من خلال التسرب فى الصمام الثنائي. صمامات شوتكى للإشارات الصغيرة كثيرة الاستخدام في تطبيقات الترددات العالية مثل الكاشفات والخلاطات

٤١ معظم العناصر والنظم الحديثة تحتاج مخططات طاقة متكررة٠ تجمع السعة الكهربائية أو اختبار مجموعة مصادر٠ ويشار لهذا الأسلوب بنظم مغلقة (ORing. Systems) .٠ النظم التي تستخدم او رينج في كل مكان وتختلف في الحجم والتعقيدات٠ وتشمل النظم مثل المصادر المتحركة والمبدلات المستخدمة في الإتصالات٠

والعناصر الغير خطية، والتي حلت محل الصمامات الثنائية من الجرمانيوم وهي أيضا مناسبة للحماية من التفريغ الكهرو إستاتيكى[٤٢] من الأجهزة الحساسة مثل عناصر أشباه الموصلات من مواد العمود الثالث والخامس من الجدول الدوري ، وصمامات ليزر الثنائية وبدرجة أقل تتعرض خطوط الدوائر معدن أكسيد سليكون المكمل٠ وصلات شوتكى معدن – شبه موصل هي عناصر مستقبلية بدلا من العناصر المنطقية حيث أنها تستخدم مستشعرات الجهد بالتوازي مع وصلات المجمع – القاعدة في الترانزستورات ثنائية القطب لمنع تشبعها الذى يقلل إلى حد كبير التأخير في التحويل. عندما تتطلب التطبيقات طاقة تبديد قليلة، تستخدم عناصر موسفت ودوائر تحكم بدلا منها، في نمط عمليات معروفة باسم مقومات نشطة. يتكون الصمام الثنائي السوبر من صمام (ب ن) أو من صمام شوتكى ومكبر عمليات تأمن غالبا خواص صمام ثنائي مثلى بسبب تأثير الارتجاع العكسي بالرغم من استخدامها لمنع ترددات مكبر العمليات المستعمل.

٤ – ٦ الثايرستور

يرجع أصل التسمية عندما توفرت صمامات مليئة بالغاز تسمى ثيراترون لها قدرة التبديل الإلكتروني، من خلال جهد صغير للحصول على قيم تيار كبيرة فالاسم ثايرستور مشتق من شكل تجميعي من "ثيراترون" و "الترانزستور". في العام ١٩٥٦ أستخدم الثايرستور تجارياً٠ تتحكم الثايريستورات في كمية الطاقة والجهد ولها تطبيقات واسعة النطاق [٤٣] في السيطرة

---

٤٢ التفريغ الكهرو إستاتيكي (ESD) Electrostatic dischargeهو تدفق مفاجئ للكهرباء بين كائنين مشحونة كهربائياً بسبب بالاتصال، التلامس الكهربائي أو انهيار العازل الكهربائي. يمكن أن يكون سبب تراكم الكهرباء الساكنة عن طريق الشحن التربو (charging tribo) أو بالحث الكهربائي (electrostatic induction). يحدث التفريغ الكهرو إستاتيكي عندما يتم تتلامس سطحين مشحونين أو انهيار العازل بينهما، غالباً ما تحدث شرارة مرئية

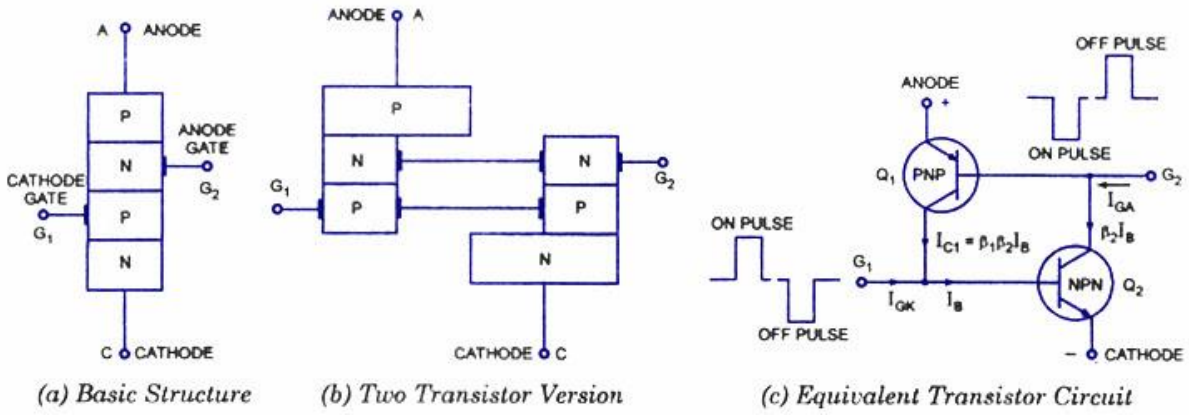
٤٣ في دوائر تبديل الطاقة، دوائر استبدال التتابع، دوائر العاكس، دوائر المذبذب، كاشف مستوى الدوائر، الدوائر المروحية، الدوائر تعتيم الضوء، الدوائر الموقت منخفضة التكلفة، دوائر المنطق، ودوائر التحكم في سرعة (power-switching circuits, relay-replacement circuits, inverter circuits, oscillator circuits, level-detector circuits, chopper circuits, light-dimming circuits, low-cost timer circuits, logic circuits, speed-control circuits, phase-control circuits, etc)

على الطاقة الكهربائية، تتراوح بين المخفتات [٤٤] الخفيفة والتحكم في سرعة المحركات الكهربائية لنقل الكهرباء ذات الجهد العالي للتيار المباشر ودوائر تبديل الطاقة، وعناصر التتابع، دوائر العاكس، دوائر المذبذب، كاشف مستوى الدوائر، الدوائر المروحية، دوائر تعتيم الضوء، الدوائر الموقتة منخفضة التكلفة، دوائر المنطق، ودوائر التحكم في السرعة، دوائر السيطرة على الوجه. أصلاً، اعتمد الثايرستور فقط على عكس التيار للتحويل الى وضعي التشغيل وإيقاف التشغيل، مما يجعل من الصعب استخدامه في تطبيقات التيار المباشر؛ أحدث أنواع العناصر يمكن تشغيلها وإيقاف تشغيلها من خلال إشارة بوابة التحكم والمعروفة باسم بوابة إيقاف الثايرستور. الثايرستور ليس عنصر نسبي مثل الترانزستور وبعبارة أخرى، الثايرستور يمكنه فقط التشغيل أو إيقاف التشغيل، وهذا يجعل من الثايرستور عنصر غير مناسب كمكبر للصوت التناظري، ولكنه مفيد كمفتاح تبديل. يتكون الثايرستور من أربع طبقات، ثلاثي الأطراف، كل طبقة تتكون من مادة شبه موصل بالتناوب من النوع (ن) أو النوع (ب) على سبيل المثال (ب ن ب ن) الأطراف الأساسية تسمى الأنود والكاثود.

الشكل (٤ – ١٠) ثايرستور ١٠٠ أمبير و١٢٠٠ فولت على بالوعة حرارة – موضح طرفي تحفيز البوابة

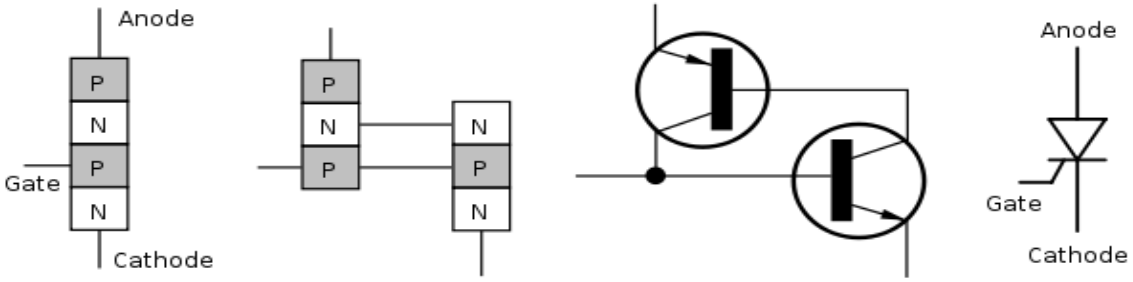
٤٤ المخفتات عناصر تستخدم لخفض درجة سطوع الضوء عن طريق تغيير الشكل الموجي للجهد المتصل بالمصباح، فمن الممكن تخفيض كثافة الضوء الناتج٠ على الرغم من أن عناصر الجهد المتغير مستخدمة لأغراض مختلفة، فإن مصطلح مخفف يهدف إلى التحكم في الضوء الخارج من مقاوم التوهج بالهالوجين (resistive incandescent, halogen) ، ومؤخرا أستخدم فى مصابيح الفلورسنت المدمجة (compact fluorescent lights (CFLs والثنائيات المشعة للضوء (LEDs)٠ مطلوب أجهزة متخصصة للتعتيم الفلوري (fluorescent dim) وبخار الزئبق (mercury vapor) وغيرها

طرف التحكم يسمى البوابة متصلة بالمنطقة (ب) بالقرب من الكاثود، (البديل يسمى مفتاح تحكم سليكون [٤٥] يوضح كل الطبقات الأربع بأطراف خارجة) ٠ ويمكن فهم تشغيل الثايرستور فيما يتعلق بزوج من الترانزستورات ثنائية القطبية مزدوجة جنبا الى جنب مرتبة لتسبب حالة الإغلاق الذاتي:



(a) Basic Structure (b) Two Transistor Version (c) Equivalent Transistor Circuit

الشكل (٤ – ١١) مفتاح السليكون الخاضع للتبديل

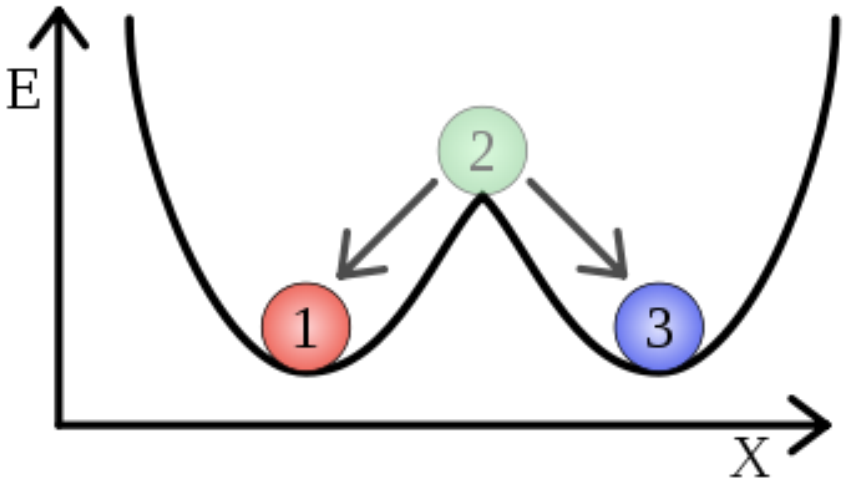


الشكل (٤ – ١٢) بنية على المستوى الفيزيائي والإلكتروني، ورمز الثايرستور

---

٤٥ مفتاح السليكون الخاضع للتبديل ((Silicon controlled switch (SCS))، مثل مقوم السيلكون الخاضع (SCR) من طرف واحد، عنصر من السيلكون أربع طبقات وثلاث وصلات ب – ن – ب – ن بأربع أطراف هي الكاثود، كاثود –البوابة، الأنود – البوابة، الأنود كما هو موضح في الشكل. فى الحقيقة، مفتاح السليكون الخاضع للتبديل (SCS) عنصر طاقة منخفضة بالمقارنة مع مقوم السيلكون الخاضع (SCR). أنه يتعامل مع التيارات بقيم ميللي أمبير بدلاً من أمبير. مفتاح السليكون الخاضع للتبديل SCS يختلف عن مقوم السيلكون الخاضع (SCR) في الجوانب التالية. له بوابة إضافية (بوابة –الأنود). وهي أصغر من مقوم السيلكون الخاضع (SCR). لها تيار تسرب أصغر وتحتفظ بالتيار بالمقارنة مع مقوم السيلكون الخاضع (SCR) ٠ أنها تحتاج إلى إشارات صغيرة محفزة. وتعطي خواص تحفيز موحدة من عينة الى عينه.

يعمل الثايرستور بمثابة مفتاح تبديل ثنائي الاستقرار [٤٦] يتم تشغيله عندما يصل البوابة تيار محفز ويستمر فى التوصيل في حين لم يتم عكس التيار الكهربائي عبر الثايرستور (جهد أمامي). يهدف الثايرستور ثلاثي الأطراف إلى مراقبة التيار الأكبر على طرفيه عن طريق جمع التيار الأكبر مع التيار الأصغر على طرفه الآخر المعروفة كطرف تحكم. وفي المقابل، تم تصميم طرفي تشغيل الثايرستور في حالة ما يكون فرق الجهد بين الطرفين كبير بما يكفي (جهد الانهيار). بعض المراجع تحدد مفهوم مقوم السيلكون الخاضع والثايرستور كعنصرين مترادفين. بعض المراجع الأخرى تحدد أن الثايرستور مجموعة عناصر على الأقل مكون من أربع طبقات من مادة شبه موصل من النوع (ن) و(ب) بالتناوب ويستخدم الثايرستور لثلاث حالات:



الشكل (٤ – ١٣) النقاط ١ و٣ يمثلان حالتي الاستقرار

١. وضع المنع العكسي: يتم تطبيق الجهد في الاتجاه الذي يتم منعه بواسطة الصمام ثنائي

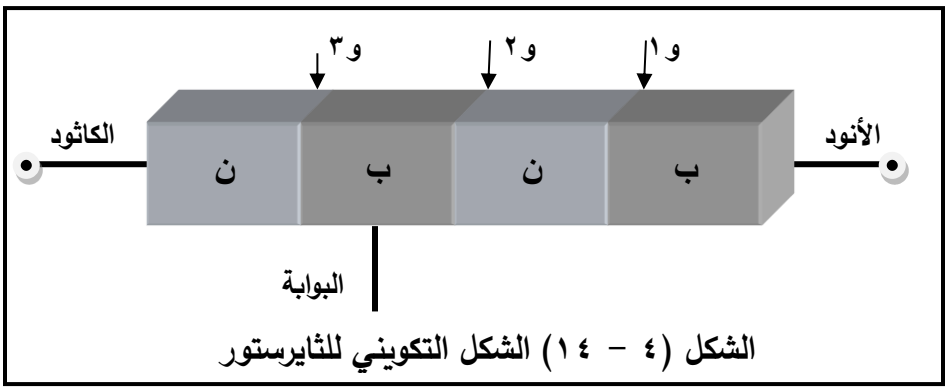
٤٦ عنصر ثنائي الاستقرار(Bi – stability) تعنى نظام ذو حالتي اتزان مستقر والذي يمكن تشغيله في أي من الحالتين. لا يتطلب أن تكون حالتي التشغيل متماثلين فيما يتعلق بالطاقة المخزونة. من حيث الطاقة الكامنة، لدى عنصر ثنائي الاستقرار حدين للطاقة الكامنة مفصولين عن بعضهما الحد الأدنى والحد الأقصى.

٢. وضع المنع الأمامي: يتم تطبيق الجهد في الاتجاه الذي يتسبب فى تشغيل الصمام الثنائي بدون إثارة الثايرستور لحالة التوصيل

٣. وضع التوصيل الأمامي: لتحفيز الثايرستور للتوصيل واستمراريته حتى ينخفض التيار الأمامي الى أقل من قيمة تيار المنع ويسمى عقد التيار [٤٧]

- وظيفة البوابة في الثايرستور

يتكون الثايرستور من ثلاث وصلات (ب ن) على التوالي (و١)، (و٢) , (و٣) من الأنود.



الشكل (٤ – ١٤) الشكل التكويني للثايرستور

عندما يكون الأنود منحاز بجهد تغذية موجب بين الأنود والكاثود [٤٨] بالنسبة الى الكاثود وبدون جهد تغذية على البوابة، فإن الوصلتين (١)، و(٣) منحازين بجهد أمامي، بينما الوصلة (٢) منحازة بجهد عكسي. في حالة انحياز الوصلة (٢) بجهد عكسي، لا يحدث التوصيل (وهي حالة إيقاف التشغيل). بزيادة الجهد بين الأنود والكاثود بقيمة أكبر من جهد الانهيار للثايرستور[٤٩]، يحدث جهد انهيار جليدي [٥٠] في الوصلة (٢) ويبدأ الثايرستور في التوصيل (حالة التشغيل). إذا تم توصيل جهد موجب على طرف البوابة بالنسبة الى الكاثود، يحدث

٤٧ عقد التيار (holding current) للأجهزة الكهربائية والكهرومغناطيسية والإلكترونية هو الحد الأدنى للتيار الذي يجب أن يمر في الدائرة من أجل استمرارية التوصيل إلى مفتاح تبديل واحد أو إلى الجهاز بالكامل.

٤٨ جهد تغذية موجب بين الأنود والكاثود (V_{AK})

٤٩ جهد الانهيار للثايرستور(V_{BO})

٥٠ جهد انهيار جليدي avalanche breakdown

انهيار للوصلة (٢) عند جهد أقل من الجهد بين الأنود والكاثود عن طريق تحديد قيمة مناسبة لجهد البوابة، يمكن أن يتحول الثايرستور الى حالة التشغيل بسرعة وبمجرد حدوث الانهيار الجليدي يستمر الثايرستور في التوصيل، بغض النظر عن جهد البوابة، حتى حدوث أحد الحالات التالية:

١. عدم وجود الجهد التغذية بين الأنود والكاثود

٢. أن تكون قيمة التيار في الثايرستور بين الأنود والكاثود أقل من قيمة عقد التيار [٦] المحدد من قبل المصنع ومن ثم يمكن أن يكون جهد البوابة مجرد نبضة جهد، مثل جهد الخرج من الترانزستور أحادي القطبية كمذبذب استرخاء [٥١]. تتميز نبضات البوابة من حيث الجهد المحفز للبوابة وتيار البوابة المحفز [٥٢]. يتغير تيار البوابة المحفز عكسيا مع عرض نبضة البوابة بطريقة توضح أن هناك حد أدنى لشحنة البوابة المطلوبة لتحفيز الثايرستور.

❖ خواص التبديل في الثايرستور

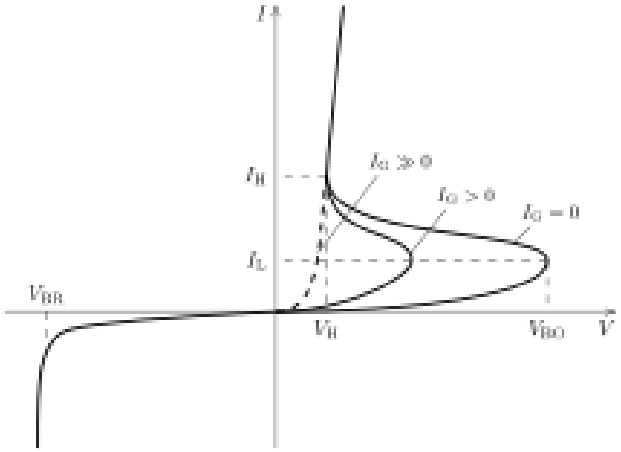
في الثايرستور التقليدي، بمجرد تحويل الثايرستور الى حالة التشغيل، يستمر الثايرستور في حالة توصيل بمعنى عدم حاجته لاستمرار تيار البوابة ليظل فى حالة تشغيل. يقوم بتوفير التيار المتجاوز لتيار الإغلاق [٥٣] طالما أن الأنود ما زال منحاز إيجابيا، لا يتمكن الثايرستور من التبديل الى حالة إيقاف التشغيل حتى ينخفض تيار الأنود الى أقل من قيمة عقد التيار[٦]. يتمكن الثايرستور التبديل لحالة إيقاف التشغيل في حالة أن تتسبب الدائرة الخارجية في انحياز الأنود بجهد سلبي (بطريقة تسمى متعادلة أو خط أو تخفيف). بعض التطبيقات يحدث عند التبديل لثايروستور ثاني لتفريغ المكثف في كاثود الثايرستور الأول.

---

٥١ مذبذب الاسترخاء (relaxation oscillator) هو دائرة مذبذب إلكترونية غير خطية التي لا تنتج إشارة خرج جيبيه متكررة، مثل موجه مثلثة أو موجة مربعة ٠ تتكون الدائرة من حلقة تغذية عكسية (feedback loop) تحتوي على مفتاح تبديل مثل ترانزستور، أو عنصر مقارن (comparator) ، أو عنصر تتابع (relay) ، أو مكبر عمليات أو عنصر مقاومة سلبية مثل صمام النفق الثنائي(tunnel diode) ٠

٥٢ الجهد المحفز للبوابة (V_{GT}) وتيار البوابة المحفز (I_{GT})

٥٣ تيار الإغلاق (I_L) أو عقد التيار



الشكل (٤ – ١٥) خواص الجهد والتيار

يسمى هذا الأسلوب بالتخفيف القصرى [٥٤]. بعد فصل التيار عن الثايرستور، يجب أن ينقضي زمن تأخير محدد قبل أن يعود الأنود مرة أخرى منحازا بجهد موجب وإبقاء الثايرستور في حالة إيقاف تشغيل ويسمى التأخير بالحد الأدنى الزمنى [٥٥] لإيقاف دائرة التخفيف. محاولة تغذية الأنود بجهد موجب في زمن إيقاف دائرة التخفيف يتسبب في تحفيز الثايرستور ذاتيا بالإبقاء على ناقلات الشحنات (الثقوب والإلكترونات) التي لم تندمج بعد. يتطلب الثايرستور لتطبيقات الترددات العالية أكبر من تردد مصدر التيار المتردد المحلي (٥٠ أو ٦٠ هرتز) قيم زمنية أصغر لإيقاف دائرة التخفيف. يمكن تصنيع الثايريستورات السريعة بإدخال أيونات المعادن الثقيلة مثل الذهب أو البلاتين التي تعمل كمراكز تجميع الشحنات في السيليكون. اليوم، الثايريستورات السريعة عادة تتم بتوليد إلكترون أو بروتون من السيليكون أو بزرع الأيونات.

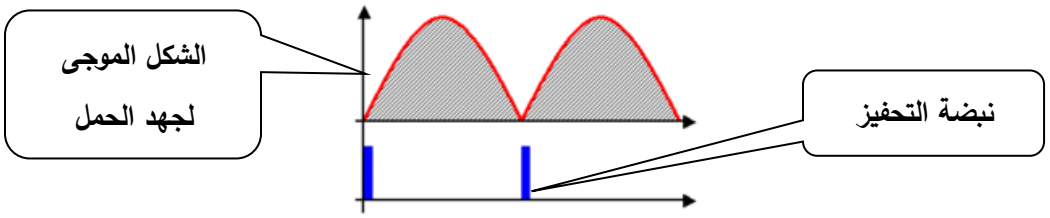
---

٥٤ يمكن إيقاف الثايرستور بتغذية عكسية لمقوم السيلكون الخاضع أو (SCR) أو باستخدام مكونات نشطة أو سلبية. ويمكن تخفيض التيار في الثايرستور إلى قيمة أقل من قيمة حفظ التيار (holding current) . ومنذ ، إيقاف تشغيل الثايرستور قسراً (turned off forcibly) فإنه يطلق عليها عملية تخفيف قسري (commutation process) . المكونات الأساسية في الإلكترونيات والمكونات الكهربائية مثل الحث والسعة (inductance and capacitance) تستخدم كعناصر تخفيف . ويمكن ملاحظة التخفيف القسري أثناء استخدام مصادر التيار المستمر ؛ ومن ثم فإنه يسمى أيضا تخفيف. التيار المستمر (as DC commutation) . تسمى الدائرة الخارجية المستخدمة لعملية الاستبدال القسري كدائرة تخفيف (commutation circuit) وتسمى العناصر المستخدمة في هذه الدائرة كعناصر تخفيف (commutating elements).

٥٥ الحد الأدنى الزمنى لإيقاف دائرة التخفيف (t_q) circuit commutated turn off time

التوليد متعدد الاستخدامات أفضل من التخدير بذرات المعادن الثقيلة لأنه يسمح بضبط وتعديل كمية الشوائب الواجبة في الخطوات الأخيرة حتى في مرحلة متأخرة في معالجة السيليكون.

❖ التطبيقات



الشكل (٤ – ١٦) تنظيم جهد الحمل بالتحكم في الشكل الموجي في الثايرستور

تستخدم الثايريستورات بشكل رئيسي فى تطبيقات التيارات والجهود العالية، وغالباً ما تستخدم لمراقبة التيارات المترددة، حيث يؤدي تغير القطبية للتيار بالتناوب لإيقاف تشغيل الثايرستور تلقائياً، والمشار إليها كعملية عبور صفر [٥٦]. يمكن القول إن الثايرستور يعمل بشكل متزامن بمجرد التشغيل، يسرى التيار مع الشكل الموجي للجهد المستخدم على الكاثود إلى وصلة الأنود بدون ضرورة لتعديل جهد البوابة، بمعنى أن الثايرستور منحاز كليا في حالة التشغيل. وهذا لا يؤدى الى الخلط بعمليات غير متكافئة، مثل أن يكون الخرج أحادي الاتجاه، يتدفق التيار فقط من الكاثود إلى الأنود، وذلك هو عملية غير متماثلة في طبيعتها. يمكن استخدام الثايريستورات كعناصر تحكم تشغيل وحدات تحكم زوايا المرحلة، يعرف أيضا باسم وحدات تحكم إطلاق الوجه [٥٧]. يمكن استخدامها في إمدادات الطاقة للدوائر الرقمية، حيث تستخدم كنوع من زيادة قواطع الدائرة لمنع حدوث فشل في التيار الكهربائي من إتلاف المكونات المتتالية. يستخدم الثايرستور مع الصمام زينر الثنائي المتصل ببوابة الثايرستور، وفى حالة ارتفاع الجهد أعلى من جهد زينر، سيتم تشغيل الثايرستور مسببا قصر خرج مصدر الكهرباء بالأرض (بشكل عام تعمل قواطع المنبع أو الفيوز). وهذا نوع من دوائر الحماية المعروف باسم

---

٥٦ دائرة عبور الصفر ((zero cross circuit) هي دائرة كهربائية التي تبدأ التشغيل مع تحميل جهد التيار المتردد فيما يقرب من قيمة الصفر فولت في موجة التيار المتردد

٥٧ تحكم إطلاق الوجه (PFC)، وتسمى أيضا قطع الوجه، أسلوب لتعديل عرض النبضة (PWM) للحد من الطاقة، تطبق في جهد التيار المتغير(AC). يعمل من خلال تعديل (modulating) الثايرستور، مقوم السيلكون الخاضع (SCR)، ترياك، ثيراترون، أو عناصر أخرى الشبيهة بصمام ثنائي داخل وخارج التوصيل في مرحلة محددة من الشكل الموجي المستخدم

دائرة رجل الغراب [٥٨]، وله ميزة عن القواطع القياسية في أن يقوم بإنشاء مسار الموصلية عالية إلى الأرض لمصدر الجهد المتضرر ويحتمل أن تكون للطاقة المخزونة في النظام. أول تطبيق على نطاق واسع للثايرستور المرتبط بالتحفيز في المنتجات الاستهلاكية ذات الصلة بإمدادات طاقة مستقرة داخل أجهزة الاستقبال التلفزيوني الملون في أوائل السبعينات. تم الحصول على إمدادات طاقة مستقرة عالية الجهد للتيار المباشر للأجهزة بتحريك ميل نقطة التبديل للثايرستور صعودا وهبوطاً لنصف الموجه الموجب لدخل التيار المتردد (إذا أستخدم ميل ارتفاع جهد الخرج سوف يرتفع دائماً نحو ذروة جهد الدخل عندما يتم تشغيل الثايرستور وهكذا لا يتحقق الهدف من السيطرة على التغير في الجهد). يمكن تحديد نقطة التبديل الدقيقة بتحميل خرج مصدر التيار المباشر، فضلا عن التقلبات في إدخال التيار المتردد وقد أستخدم الثايرستور لعقود في تطبيقات عناصر مخفتات الإضاءة في التلفزيون والأفلام السينمائية، والمسرح، حيث أنها حلت محل تكنولوجيات أقل شأنا مثل المحولات الأتوماتية أو رهيوستات[٥٩]. كما أنها استخدمت في التصوير الفوتوغرافي كجزء أساسي من ومضات الفلاش.

---

٥٨ دائرة رجل الغراب (crowbar circuit) هي دائرة كهربائية تستخدم لمنع إلحاق أضرار في بعض دوائر إمدادات الطاقة نتيجة لارتفاع الجهد.

٥٩ مقياس الجهد الانزلاقي (potentiometer)، هو مقاومة ثلاثية الأطراف مع وصلة منزلقة تشكل مقسم الجهد قابل لتعديل (adjustable voltage divider). إلا إذا كان يتم استخدام طرفين فقط، واحدة فى النهاية والأخرى منزلقة، يعمل بمثابة مقاومة متغيرة أو رهيوستات (rheostat).