١.١ مقدمة:

الإلكترونيات هو العلم والتكنولوجيا الذي يعنى بدراسة انبعاث وحركة حاملات الشحنة الكهربائية في الفراغ أو في الأوساط الغازية أو أشباه الموصلات. وتكمن أهمية الأجهزة الإلكترونية في قدرتها على القيام بالعديد من الوظائف أهمها: التقويم الموجي، التشكيل الموجي، تكبير الإشارة، توليد الإشارة، السيطرة، تحويل الطاقة الضوئية إلى كهربائية وبالعكس.

ان المكوّنات (النبائط) الإلكترونية يمكن تصنيفها حسب طبيعة الوسط التي تعمل ضمنها إلى:

١- نبائط الأنابيب المفرغة ومن أمثلتها أنبوبة الأشعة المهبطية (CRO) والصمامات المفرغة بأنواعها.

٢- نبائط الحالة الغازية ومن أمثلتها الصمامات المملوءة بالغاز (Gas-Filled Tubes).

٣- نبائط الحالة الصلبة ويطلق عليها أيضا نبائط أشباه الموصلات ومن أمثلتها الثنائي البلوري، الترانزستور، الثايروستور، الدوائر المتكاملة، وغيرها.

في الشكل (١-١) صور لمجموعة من النبائط الإلكترونية، والتي تضم الصمام المفرغ، ترانزستور ودائرة متكاملة.

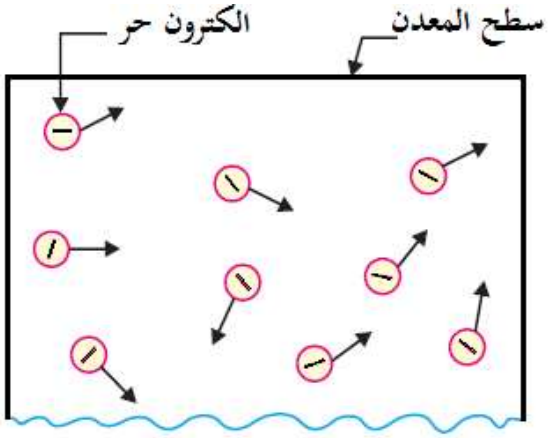
شكل (١-١) أنواع مختلفة من النبائط الإلكترونية

٢.١ الانبعاث الإلكتروني:

هناك العديد من الأجهزة الإلكترونية التي يعتمد مبدأ عملها على انبعاث الإلكترونات من اسطح مواد معينة مثل الاوسليسكوب (Oscilloscope) والمجهر الإلكتروني (Electron Microscope) والصمامات المفرغة، وعلى الرغم من الصمامات المفرغة لم تعد لها تستعمل في هذه الأيام إلا ان جهازي الاوسليسكوب والمجهر الإلكتروني كانت ولا تزال من اهم الأجهزة في مجال الإلكترونيات، فالأول يعتبر اهم جهاز قياس في الإلكترونيات والثاني يعتبر أداة أساسية في فحوصات وتصنيع المواد في الأبعاد الدقيقة والنانوية، وعمل كلا الجهازين يعتمد على الحزمة الإلكترونية وتفاعلها مع المادة والمجالات الكهربائية والمغناطيسية، وللحصول على الحزمة الإلكترونية هناك أداة تسمى بالقاذفة الإلكترونية (Electron Gun) تكون مهمتها توفير مصدر للإلكترونات المكونة للحزمة الإلكترونية. الشكل (١-٢) يمثل صورة لجهازي الاوسليسكوب والمجهر الإلكتروني.

شكل (١–٢) صورة لجهازي الاوسليسكوب والمجهر الإلكتروني

تعتبر المعادن من المواد الأكثر استعمالاً في التطبيقات المتعلقة بالانبعاث الإلكترونات وذلك لاحتوائها على وفرة من الإلكترونات الحرة (Free Electrons)، في درجة حرارة الغرفة تكون الكترونات المادة المعدنية في حالة حركة عشوائية كما موضح بالشكل (١–٣). ان تلك الإلكترونات تكون لها الحرية في الانتقال من ذرة إلى أخرى داخل المعدن ولكنها لا تستطيع ان تنبعث من سطح المعدن وذلك لان أي الكترون يغادر سطح المعدن يجعل السطح مشحوناً بشحنة موجبة تعادل شحنة الإلكترون مما يولد قوة تجاذب تعمل على إعادة الإلكترون إلى السطح، وبتعبير آخر فان أي الكترون يحاول ان يغادر سطح المعدن سيواجه قوة تمنعه من الانبعاث مما يكون ما يشبه الحاجز الذي يمنع انبعاث الإلكترونات ويسمى بالسطح الحاجز (Surface barrier).



شكل (١–٣) حركة الإلكترونات الحرة داخل المعدن في درجة حرارة الغرفة

من ذلك نجد انه للحصول على انبعاث للإلكترونات من سطح المعدل لا بد من تزويد الكتروناتها الحرة بطاقة إضافية تمكنها من التغلب على تأثير السطح الحاجز ومغادرة المعدن، وتسمى اقل طاقة إضافية لازمة للتغلب على السطح الحاجز بدالة الشغل للمعدن (work function) ويعتمد مقدارها على طبيعة المعدن وحالة السطح، للمعادن النقية تتراوح قيمة دالة الشغل بين$(2 - 4\ eV)$. في التطبيقات العملية تفضل المواد التي لها دالة شغل صغيرة.

هناك أربعة أنواع رئيسية من الانبعاث الإلكتروني وهي الانبعاث الحراري، انبعاث المجال، الانبعاث الكهروضوئي، والانبعاث الثانوي، وفيما يلي شرح مختصر لكل منها:

أولاً: الانبعاث الحراري (Thermionic Emission)

تسمى العملية التي يتم من خلالها انبعاث الإلكترون من سطع معدن بتسليط طاقة حرارية بالانبعاث الحراري (Thermionic emission)، عندما يتم تسليط حرارة على المعدن فان مقداراً من الطاقة الحرارية تتحول إلى طاقة حركية تعمل على تعجيل حركة الإلكترونات الحرة، وعندما كون مقدار الطاقة الحركية التي اكتسبتها الإلكترونات الحرة مساوية لدالة الشغل للمعدن فانها ستكون قادرة على مغادرة سطح المعدن.

في التطبيقات المتعلقة بالانبعاث الحراري تفضل المعادن التي لها دالة شغل منخفضة وذلك لانها تكون بحاجة إلى طاقة حرارية إضافية اقل، وبتعبير آخر فان الانبعاث الحراري يحدث بدرجات حرارية اقل عند استعمال معادن ذات دالة شغل قليلة. تعتبر مادة التنكستن (Tungsten) من أول المواد التي استعملت في تطبيقات الانبعاث الحراري، وقد تم تحسين ادائها بإضافة ما نسبته (2%) من عنصر الثوريوم (Thorium) لتغطية سطحها، كما تستعمل مواد أخرى مثل الأكاسيد المعدنية للباريوم (Ba) (Barium) و السترونشيوم (Sr) (Strontium)، فعلى سبيل المثال فان التنكستن النقي يكون بحاجة إلى ان ترتفع درجة حرارته إلى $(2300\ ^oC)$ ليحدث الانبعاث الحراري، بينما المواد المغطاة بالأكاسيد المعدنية التي سبق ذكرها بحاجة إلى ان ترتفع درجة حرارتها إلى $(750\ ^oC)$ فقط للحصول على الانبعاث الحراري.

ان مقدار التيار الناشئ من الانبعاث الحراري يزداد بحدة مع ارتفاع درجة ويعتمد كذلك على طبيعة الباعث، وتعطى كثافة السطحية للتيار الناتج من الانبعاث الحراري بعلاقة ريشارد–دشمان (Richardson–Dushman equation) والتي تعطى بالصيغة:

$$J_s = AT^2 e^{-(b/T)} \qquad (1-1)$$

حيث: (J_s) هو مقدار تيار الانبعاث لوحدة المساحة ووحدته $\left(\frac{Amp.}{m^2}\right)$

(A) ثابت يعتمد على نوع الباعث ويقاس بوحدات $\left(\frac{Amp.K^2}{m^2}\right)$

(T) درجة الحرارة المطلق للباعث بوحدة الكلفن (K) ، (b) ثابت الباعث

ان قيمة الثابت (b) في حالة الباعث المعدني تكون ثابتة وتعطى بالعلاقة:

$$b = \frac{\Phi q}{k} \qquad (1-2)$$

حيث (Φ) هي دالة الشغل لمادة الباعث ، (q) شحنة الإلكترون ، (k) ثابت بولتزمان.

بالتعويض عن شحنة الإلكترون وثابت بولتزمان في العلاقة الأخيرة نحصل على:

$$b = \frac{\Phi \times 1.602 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}}$$

$$b = 11600\Phi \ K \qquad (1-3)$$

بالتعويض عن قيمة الثابت (b) في العلاقة $(1-1)$ نحصل على:

$$J_s = AT^2 e^{-(11600\Phi/T)} \qquad (1-4)$$

نلاحظ من المعادلة (١-٤) ان كثافة تيار الانبعاث يعتمد على كل من درجة الحرارة الباعث ودالة الشغل لمادة الباعث حيث يلاحظ:

١- ان مقدار تيار الانبعاث يزداد بصورة كبيرة بتغير درجة الحرارة، فمضاعفة درجة الحرارة يسبب زيادة في قيمة تيار الانبعاث بأكثر من (10^7) مرة. فعلى سبيل المثال كثافة التيار المنبعث من باعث التنكستن النقي هو بحدود $(10^{-6}\ Amp./m^2)$ عند درجة حرارة $(1300\ ^oC)$ ولكنه يزداد ليصل إلى $(100\ Amp./m^2)$ عندما ترتفع درجة الحرارة الى $(2900\ ^oC)$.

٢- ان أي تغير طفيف في دالة الشغل لمادة الباعث يؤدي إلى زيادة مفرطة في تيار الانبعاث، فمثلاً عند هبوط دالة الشغل إلى نصف قيمتها (كأن تستعمل مادة مختلفة) فان تأثير ذلك مساوي تماماً لتأثير مضاعفة درجة الحرارة.

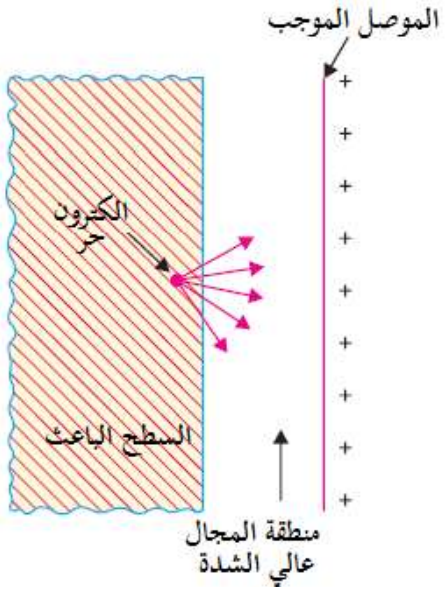
ثانياً: الانبعاث المجالي (Field Emission)

تسمى العملية التي يتم من خلالها انبعاث الكترونات من خلال تسليط مجال كهربائي عالي الشدة على سطح المعدن بانبعاث المجال (Field emission).

عندما يوضع سطح معدن قريبا من موصل ذي جهد كهربائي موجب عالي، فان المجال الكهربائي الناشئ بين السطحين يعمل على تسليط قوة جذب كهربائي على الإلكترونات الحرة الموجودة على سطح الباعث، ويكون مقدار تلك القوة متناسبة مع شدة المجال الكهربائي (E) ويعطى مقدارها بالقيمة $(F = eE)$ ويكون اتجاهها باتجاه الموصل الموجب، ان مقدار شدة المجال الكهربائي الناشئ فيعتمد على فرق الجهد (V) المسلط بين الموصل والباعث وكذلك على المسافة (d) الفاصلة بينهما $(E = V/d)$.

يحدث الانبعاث الإلكتروني من سطح الباعث متى ما كانت قوة الجذب الكهربائية كافية للتغلب على جهد السطح للباعث، حيث تغادر الإلكترونات الحرة سطح الباعث باتجاه الموصل كما هو موضح بالشكل (١-٤). ان حدوث انبعاث المجال يتطلب مجال كهربائي عالي الشدة، وعادة ما يكون بحدود المليون فولت لكل سنتمتر $(E \sim 10^6\, V/cm)$.

يمكن الحصول على الانبعاث المجالي في درجات حرارة أوطئ بكثير مما عليه الحال في الانبعاث الحراري، حتى انه بالإمكان الحصول عليها في درجة حرارة الغرفة، ولذا يسمى انبعاث المجال أحيانا بانبعاث الكاثود البارد (cold cathode emission).

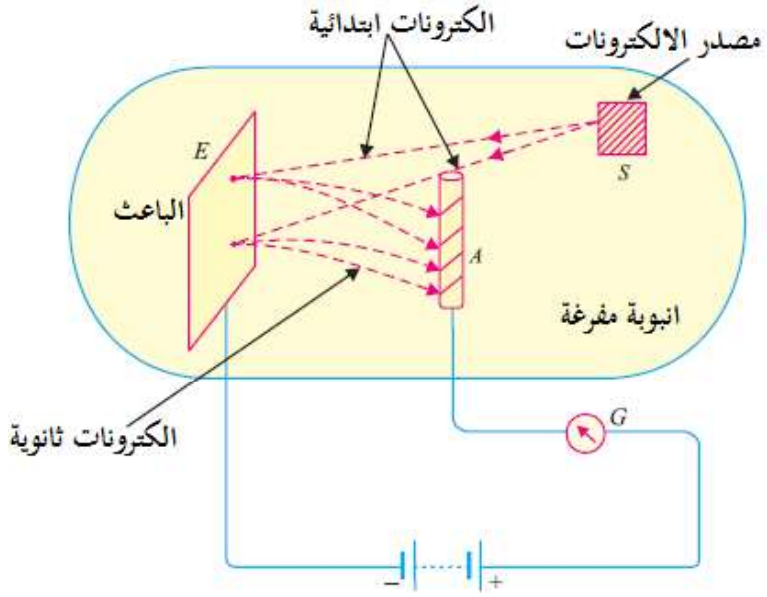


الشكل (١-٤) مخطط يوضح الانبعاث المجالي

ثالثا: الانبعاث الثانوي (Secondary Emission)

تسمى عملية انبعاث الإلكترونات من سطح معدني جراء قصفها بإلكترونات أو جسيمات ذات سرع عالية بالانبعاث الثانوي (Secondary Emission)، فعند اصطدام الكترونات أو الجسيمات بسطح الباعث فان قسما من طاقتها تنتقل إلى الإلكترونات الحرة على سطح الباعث، ومتى ما كانت طاقة الإلكترون الساقط مناسبة (تساوي أو اكبر من دالة الشغل لمادة الباعث) يمكن ان تنبعث من ذلك السطح الكترونات جديدة تسمى بالإلكترونات الثانوية (secondary electrons) وذلك لتمييزها عن الإلكترونات (الإلكترونات الابتدائية Primary electrons) أو الجسيمات الساقطة.

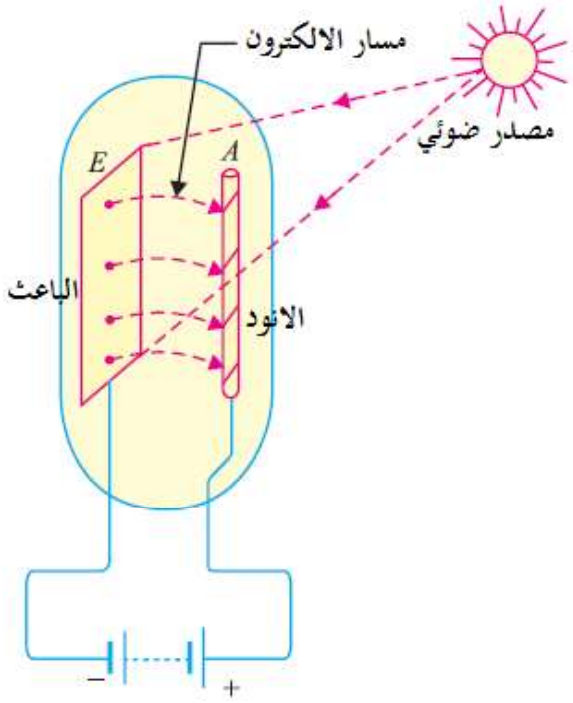
الشكل (١–٥) يمثل مخطط لعملية الانبعاث الثانوي، حيث يوجد كل من مصدر الإلكترونات وسطح الباعث والانود داخل أنبوبة مفرغة من الهواء، فعند اصطدام الإلكترونات الابتدائية ذات الطاقة المناسبة بسطح الباعث (E) تنبعث عنه الكترونات ثانوية، ولجمع الإلكترونات الثانوية المنبعثة يتم تسليط فرق جهد كهربائي بين الباعث والانود بحيث يكون الانود موجبا بالنسبة لجهد الباعث. وتعتمد شدة الإلكترونات الثانوية المنبعثة على طاقة الإلكترونات الابتدائية وزاوية سقوطها وعلى طبيعة مادة الباعث.



الشكل (١–٥) مخطط لعملية الانبعاث الثانوي

رابعا: الانبعاث الكهروضوئي (Photo Electric Emission)

تسمى عملية انبعاث الإلكترونات من سطح معدن نتيجة لسقوط الضوء بعملية الانبعاث الكهروضوئي (photo electric emission). الشكل (١-٦) يوضح عملية الانبعاث الكهروضوئي، فعند سقوط فوتونات ضوئية على سطح معدن فانها تمنح طاقتها للإلكترونات الحرة ومتى ما كانت طاقة الفوتونات مناسبة فان الانبعاث الكهروضوئي يحدث. ان شرط اللازم لحدوث الانبعاث الكهروضوئي هو ان تكون طاقة الفوتون الساقط (hf) اكبر من دالة الشغل لمادة الباعث $(hf > \Phi)$، حيث f هو التردد و h ثابت بلانك وقيمته $(h = 6.62 \times 10^{-34} joul.sec)$، ويتم تسليط فرق جهد بحيث يكون الانود موجباً بالنسبة للباعث فيعمل الانود على جمع الإلكترونات المنبعثة من سطح الباعث. ان عدد الإلكترونات المنبعثة من عملية الانبعاث الكهروضوئي يعتمد على طاقة وشدة الضوء الساقط وكذلك على طبيعة مادة الباعث.



شكل (١-٦) الانبعاث الكهروضوئي

مثال: مسخن من التنكستن على شكل ملف اسطواني طوله $(5cm)$ وقطره $(0.01cm)$ ويعمل عند درجة حرارة $(2450K)$، اوجد التيار الحراري المنبعث علما بان: $(A = 60.2 \times 10^4\ Amp.K^2/m^2)$ و $(\Phi = 4.517eV)$.

الحل: من معطيات المسألة لدينا:

$$A = 60.2 \times 10^4\ Amp.K^2/m^2\ , \mathrm{T} = 2450\mathrm{K}, \Phi = 4.517eV$$

نجد أولا قيمة الثابت (b) وكما يلي:

$$b = 11600\Phi \ K$$

$$b = 11600 \times 4.517 \ K$$

$$b = 52400K$$

لإيجاد كثافة تيار الانبعاث الحراري نستعمل معادلة ريشارد–دشمان وكما يلي:

$$J_s = AT^2 e^{-(b/T)}$$

$$J_s = 60.2 \times 10^4 (2450)^2 e^{-(52400/2450)}$$

$$J_s = 1.86 \times 10^3 \ Amp./cm^2$$

لإيجاد قيمة تيار الانبعاث الحراري نجد المساحة السطحية (A) للمسخن والتي تمثل المساحة السطحية للأسطوانة التي طولها (l) وقطرها (D) والتي تعطي بالعلاقة:

$$a = \pi Dl$$

$$a = \pi \times (0.01 \times 10^{-2}) \times (5 \times 10^{-2}) = 1.57 \times 10^{-5} m^2$$

ومنه يمكن ان نجد تيار الانبعاث الحراري (I) وكما يلي:

$$I = J_s \times a$$

$$I = (1.86 \times 10^3) \times (1.57 \times 10^{-5}) = 0.0292 Amp.$$

٣.١ الصمامات المفرغة (Vacuum Tubes) وأنواعها:

ان اختراع الصمامات الإلكترونية المفرغة كان بمثابة فاتحة عصر الإلكترونيات وتطوره السريع وذلك منذ بدايات القرن التاسع عشر. وقد كانت للصمامات المفرغة بمثابة العنصر الأساسي في الجيل الأول من الأجهزة الإلكترونية مثل الراديو، التلفزيون، والرادار وغيرها.

هناك عدة أنواع من الصمامات المفرغة وذلك تبعاً لعدد الأقطاب (Electrodes) الموجودة بها وكذلك لدرجة التفريغ، ومن اشهر تلك الأنواع الصمامات الثنائية والثلاثية والرباعية والخماسية وترجع تلك التسميات لعدد الأقطاب في كل منها وهناك أنواع من الصمامات الثنائية والثلاثية تعمل بوجود ضغط منخفض لغاز خامل مثل النيون أو الاركون ويطلق عليها اسم الصمامات الغازية وهي تختلف في خواصها عن الصمامات المفرغة تفريغاً جيداً.

أولاً: الصمام الثنائي (Diode)

يتكون الصمام الثنائي المفرغ من قطبين معدنيين هما الكاثود والانود يحتويهما وعاء زجاجي مفرغ تفريغا محكما، يقوم الكاثود عند تسخينه بدور القطب الباعث للإلكترونات في الصمامات المفرغة وتتم تسخينه بطريقتين وهي التسخين المباشر وطريقة التسخين غير المباشر، ان مبدأ عمل الصمام الثنائي يقوم على التحكم في سريان التيار بين قطبي الكاثود والانود تبعا لقطبية الفولتية المسلطة بينهما، حيث يسري التيار في دائرة الصمام الثنائي عندما يكون جهد الانود موجبا بالنسبة للكاثود (الجهد الموجب يعمل على جذب الإلكترونات المتولدة حراريا من الكاثود، ويتوقف سريان التيار عندما يكون جهد الانود سالباً بالنسبة للكاثود (الجهد السالب يمنع الكترونات الكاثود من الوصول إلى الانود)، لذا فالاستعمال الأساسي للصمام الثنائي في حينه هو استعماله في دوائر التشكيل الموجي مثل التقويم الموجي الشكل (١-٧ أ) يوضح رمز وتركيب الصمام الثنائي.

ثانياً: الصمام الثلاثي (Triode)

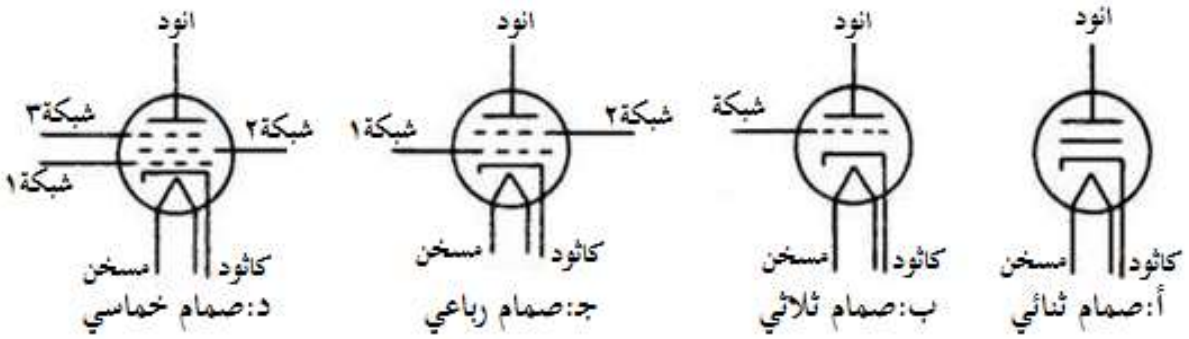
لقد كان لاختراع الصمام الثلاثي دور أساسي في تطور علم الإلكترونيات في مرحلته الأولى، إذ اصبح بالإمكان تصنيع دوائر الكترونية أساسية مثل المضخمات ، المذبذبات ودوائر السيطرة. يختلف الصمام الثلاثي عن الصمام الثنائي بإضافة قطب ثالث وهو الشبكة والتي توضع على مسافة قريبة من قطب الكاثود، ويعمل الجهد المسلط على قطب الشبكة على التحكم بمقدار التيار المار بين الانود والكاثود، وعادة ما يكون جهد الشبكة سالباً بالمقارنة مع جهد الكاثود، وكلما زاد جهد الشبكة قل التيار المار عبر الصمام وبالتالي يمكن التحكم بالتيار المار من خلال التحكم بجهد الشبكة. الشكل (١-٧ ب) يوضح تركيب ورمز الصمام الثلاثي.

ثالثاً: الصمام الرباعي (Tetrode)

بالرغم من كون الصمام الثلاثي مناسباً للعمل في دوائر التضخيم في الترددات الواطئة والمتوسطة إلا ان أدائها يضعف في الترددات العالية وذلك بسبب تأثير ما يعرف بالمتسعات الشاردة (stray capacitance) والتي تنشأ بين أقطاب الصمام الثلاثة (بين الانود-الكاثود، الانود-الشبكة، الشبكة-الكاثود) باعتبارها أقطاب معدنية يفصلها فراغ، وعلى الرغم من ان قيمة تلك المتسعات صغيرة جداً (بضعة مايكروفارد) إلا ان لها تأثير ضار في الترددات العالية، ولأجل التغلب على مشكلة المتسعات الشاردة يتم إضافة قطب رابع يمثل شبكة ثانية تسمى بالشبكة الحاجبية (Screen Grid) بين الشبكة الأولى والانود وذلك لتقليل قيمة المتسعة الشارة بينهما، فيتحسن أداء الصمام في حالة العمل في الترددات العالية وغالبا ما يسلط جهد موجب على الشبكة الثانية. الشكل (١-٧ ج) يوضح تركيب ورمز الصمام الرباعي.

رابعاً: الصمام الخماسي (Pentode)

تعاني الصمامات الرباعية من ظاهرة الانبعاث الثانوي، وعلى الرغم من احتمال حدوث الانبعاثات الثانوية نتيجة لارتطام الإلكترونات المنبعثة من الكاثود بسطح الانود واردة في أي نوع من الصمامات إلا ان تأثيرها يكون مؤثراً في الصمامات الرباعية، ففي حالة الصمامات الثنائية والثلاثية في الإلكترونات الثانوية في حالة تولدها ترتد عائدة إلى الانود وذلك بسبب الجهد الموجب للانود وعدم وجود قطب آخر يمكن ان يجذبها، ولكن الأمر مختلف في حالة الصمام الرباعي فيمكن ان يكون جهد الشبكة الثانية قريب من جهد الانود بل يمكن ان تكون اكبر منها، وعندها تعمل الشبكة الثانية على جمع الإلكترونات الثانوية المنبعثة من الانود مما يولد تياراً مضاداً لتيار الإلكترونات الأولية مما يقلل تيار الانود وهو امر غير مرغوب فيه. لأجل التغلب على مشكلة الانبعاثات الثانوية يتم إضافة شبكة ثالثة تسمى بالشبكة المخمدة (suppressor grid) وعادة ما يتم توصيل الشبكة الثالثة بقطب الكاثود مما يجعل جهدها سالباً بالنسبة لجهد الانود وعندها فان الإلكترونات الثانوية المنبعثة من الانود سوف لن تتمكن من الوصل إلى الشبكة الثانية وإنما ترتد عائدة إلى الانود نتيجة لتنافرها مع الشبكة المخمدة الشكل (١-٧د) يوضح رمز وتركيب الصمام الخماسي.



شكل (١-٧) أنواع الصمامات المفرغة

ان استعمال الصمامات المفرغة شهد تناقصاً مضطرداً مع اختراع الترانزستور عام 1947 وما تلاه من تطور كبير في الكترونيات أشباه الموصلات، إذ لم تعد الصمامات المفرغة تستعمل هذه الأيام إلا في نطاق ضيق جداً. وهذا عائد لتميز نبائط أشباه الموصلات بانها: اصغر حجماً، اكثر متانة، أقل تكلفه، عدم حاجتها إلى التسخين، وقلة استهلاكها للطاقة. وللمقارنة الشكل (١-٨) يمثل صورة لجهاز راديو يعمل بالصمامات المفرغة حيث يلاحظ كبر حجم الجهاز وتعقيده وسهولة كسره عند تعرضه لأي إجهاد ميكانيكي وحاجته إلى طاقة كبيرة لتشغيل صماماته، في حين ان أجهزة الراديو المصنوعة من نبائط أشباه الموصلات تكون اصغر حجماً واكثر متانة واقل استهلاك للطاقة الكهربائية.