٤- النبائط الإلكترونية والدوائر المتكاملة

١/٤ مقدمة

النبيطة الإلكترونية – Electronic Device هى الوحدة الهيكلية المبنية على معارف وأسس طبيعية ورياضية لتأدية غرض مفيد فى الدوائر والنظم الإلكترونية . لذلك ، فإنها دائمة التطور مع تطور المعرفة فى الطبيعة والرياضيات ، وكذلك مع التطورات التكنولوجية . تحدث التطورات الخارقة على فترات متباعدة ، مثل التطور من الصمام الإلكترونى المفرغ إلى الترانزستور ، ومن الترانزستور إلى الدوائر المتكاملة . أما التطورات التكنولوجية فإنها دائمة ومستمرة ، مثل زيادة كثافة الدوائر المتكاملة إلى درجة بناء نظام إلكترونى كامل كالحاسب الآلى على شريحة من السيليكون مساحتها حوالى سنتيمتر مربع وسمكها ربع ملليمتر ، وغير ذلك مما هو قائم حاليا ومتوقع مستقبلا . جميع النبائط الإلكترونية القديمة والحديثة والمستقبلية تعتمد فى أدائها على التحكم فى توليد وتحريك وجمع الإلكترونات الحرة فى الفراغ أو داخل الجوامد بطريقة أو أخرى .

بدأ تاريخ ظهور النبائط الإلكترونية نتيجة للتطورات فى مجال آخر . ذلك أنه فى عام ١٨٧٠م قدم جيمس كلارك ماكسويل – James Clerk Maxwell توقعاته النظرية بإمكانية بث التموجات الكهرومغناطيسية فى أوساط مختلفة من بينها الفراغ . فى عام ١٨٨٧م ، حقق هينرتش هرتز – Heinrich Hertz هذه التوقعات معمليا . فى عام ١٨٩٧م ، نجح جوجليلمو ماركونى – Guglielmo Marconi فى تحقيق هذا ميدانيا بين بلدتين فى إنجلترا ، ثم بين الساحلين الأوروبى والأمريكى عبر المحيط عام ١٩٠١م . كان استقبال هذه التموجات يحتاج إلى نبيطة تمرر التيار الكهربى فى اتجاه واحد وتمنع مروره فى الاتجاه العكسى ، فيما تسمى بالمقوم – Rectifier .

وسط هذه الأجواء المتحفزة للبحث عن مقوم كفء لاستقبال التموجات الكهرومغناطيسية ، جاءت مشاهدة إديسون – Edison ، ففى عام ١٨٧٨م اخترع إديسون أول مصباح كهربائى للإضاءة مكونًا من فتيلة من الكربون فى وعاء زجاجى مفرغ . عند مرور تيار كهربى فى هذه الفتيلة ، فإنها تتوهج وتعطى الضوء المطلوب . فى عام ١٨٨٣م ، اكتشف إديسون أنه بوضع جسم معدنى أمام الفتيلة داخل المصباح يحدث التقويم المطلوب بين الجسم المعدنى والفتيلة . كانت مشاهدة إديسون هذه سببا فى بداية سلسلة من الصمامات الإلكترونية المفرغة ، استحوذت على نشاط هندسة الإلكترونيات فى أوائل القرن العشرين . ومازالت تكنولوجيا هذه الصمامات المفرغة

تستعمل فى تطبيقات خاصة حتى يومنا هذا . ففى عام ١٩٠٤م ، قام جون أمبروز فلمنج – John Ambrose Fleming (١٨٤٩ – ١٩٤٥م) ، مستنيرا بمشاهدة إديسون ، ببناء الصمام الثنائى المفرغ – High Vacuum Thermionic Diode المكون من وعاء مفرغ يحتوى على فتيلة ساخنة لبث الإلكترونات سميت «المهبط» ، ولوح معدنى أمامها لجمع هذه الإلكترونات سمى «المصعد» ، والذى يعمل كمقوم بكفاءة عالية . فى عام ١٩٠٧م ، أضاف ديفورست – Deforest شبكة معدنية بين المهبط والمصعد تتحكم فى شدة تيار المصعد . أطلق على هذه الوحدة الهيكلية الصمام الثلاثى ، وقد أفاد هذا بشدة فى استعمالات إلكترونية مهمة من أبرزها توليد وتكبير الإشارات الكهربية . أضيفت بعد ذلك شبكة ثانية فيما سمى بالصمام الرباعى ، ثم شبكة ثالثة فيما سمى بالصمام الخماسى ، وذلك لتحسين أداء الصمام فى الدوائر الإلكترونية .

أيضا ، من أوائل النبائط التى استعملت فى تقويم واستقبال الإشارات الكهرومغناطيسية ، وحدة هيكلية تنتمى إلى نبائط الجوامد أكتشفت بطريق الصدفة دون خلفية نظرية . فقد وجد بالتجربة أنه بلمس بعض البللورات من مواد معينة مثل الكوارتز فى نقاط معينة حساسة بسلك مدبب من معدن التانجستن يحدث التقويم المطلوب . كان الاسم المتداول لهذا السلك المعدنى المدبب هو «شارب القط – Cat's Whisker » ، ويلمس البللورة تحت ضغط زنبركى فى نقاط يمكن تغييرها بسهولة للحصول على أكفأ نقطة تلامس . ظل هذا المقوم ، مع التحسين سواء فى المادة البللورية أو طريقة التركيب ، يستعمل رغم وجود الصمام الثنائى وذلك لمميزاته عند الترددات العالية جدا . اكتسب هذا المقوم أهمية أكبر مع اكتشاف الرادار وتطوره السريع أثناء الحرب العالمية الثانية . كانت الأبحاث لتحسين أداء هذا المقوم هى السبب فى اكتشاف الترانزستور بطريق الصدفة عام ١٩٤٨م على أيدى كل من جون باردين – John Bardeen ووالتر براتين – Walter Brattain ووليم شوكلى – William Shockley وكان هذا أيضا ، بداية المسيرة إلى عصر الإلكترونيات الدقيقة الذى نعيشه الآن .

إذا تغاضينا عن الصمامات الإلكترونية الغازية التى كانت تستعمل أساسا فى التقويم وبعض الدوائر الرقمية البطيئة ، والتى انقرضت مع ظهور البدائل من نبائط أشباه الموصلات ، فإنه يمكن تقسيم النبائط الإلكترونية إلى قسمين أساسيين . القسم الأول يعتمد على حركة الإلكترونات الحرة بعد تركها سطح المهبط إلى الفراغ داخل أوعية زجاجية أو معدنية مفرغة . القسم الثانى يعتمد على حركة الإلكترونات الحرة (وقرائنها الفجوات) داخل الجوامد ، وعلى الأخص بللورات أشباه الموصلات . يمكن تصنيف

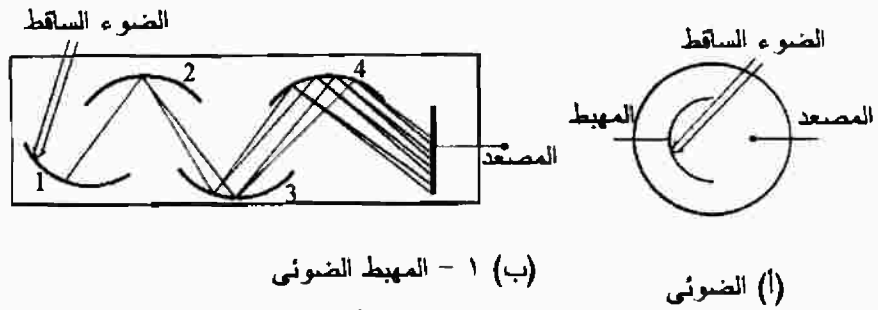
النبائط الإلكترونية أيضا من زوايا أخرى . فمثلا من زاوية التردد ، نرى أن نبائط الترددات المنخفضة حتى نهاية مدى الراديو تختلف عن نبائط الترددات الميكروية . ومن زاوية نوعية الأداء ، نجد العديد من أنواع النبائط منها نبائط التقويم ، نبائط التكبير ، نبائط الإحساس ، نبائط أو أنابيب العرض ، ونبائط أخرى خاصة مثل مولدات أشعة الليزر ومولدات أشعة إكس وغيرها .

بدأت نبائط الجوامد تحل محل الصمامات الإلكترونية المفرغة تباعا منذ الخمسينيات ، وعلى الأخص فى الدوائر والأجهزة والنظم المحدودة القدرة . وازداد هذا الإحلال مع الزمن حتى وصل فى أيامنا هذه إلى شبه تغطية كاملة فيما عدا بعض الحالات الخاصة . من هذه الحالات الخاصة ، الصمامات التى تعمل عند قدرات عالية فى محطات الإرسال الإذاعى ، ونبائط العرض مثل صمام أو أنبوبة أشعة المهبط – Ca-thode Ray Tube التى تستخدم بكثرة فى أجهزة القياس ، وصمام أو أنبوبة عرض الصورة التليفزيونية – TV Picture Tube ، وشاشات الحاسب ، وكذلك صمامات أو أنابيب توليد أشعة إكس .

٢/٤ النبائط الإلكترونية المفرغة

تشترك جميع النبائط الإلكترونية المفرغة فى احتياجها إلى مصدر لبث إلكترونات حرة . عادة يكون هذا المصدر جسماً من معدن التانجستين يسمى المهبط . يحتاج المهبط إلى طاقة خارجية لانتزاع أو بث إلكترونات خارج سطحه تمهيدا للتحكم فيها داخل الوعاء المفرغ حسب الاحتياج . يمكن أن يكتسب المهبط الطاقة المطلوبة بعدة طرق . فهناك البث الضوئى فيما يعرف بالصمامات الضوئية ، حيث يكتسب المهبط الطاقة اللازمة من الضوء الساقط على سطحه الذى تكون مساحته كبيرة بقدر الإمكان ومعالجاً بمواد خاصة لزيادة كفاءة البث الإلكترونى الضوئى ، شكل (٤–١)أ . وهناك البث الثانوى حيث يتسبب قذف سطح المهبط بإلكترونيات أولية سريعة الحركة فى بث كمية من الإلكترونات الثانوية أضعاف كمية الإلكترونات الأولية الساقطة ، وبتكرار ذلك داخل الصمام على مراحل يمكن الحصول على مضاعفات كبيرة فى المرحلة النهائية . كان هذا يستعمل فى الصمامات الضوئية المضاعفة – Photomultipliers الحساسة جدا للضوء ، شكل (٤–١)ب . وهناك البث الحقلى حيث تكون شدة المجال الكهربى عند سطح المهبط كافية لانتزاع إلكترونات خارجه . أما الأكثر شيوعا ، فهو البث الحرارى – Thermionic emission حيث تستعمل فتيلة من معدن التانجستن يتم تسخينها لدرجة التوهج بإمرار تيار كهربى خلالها . قد تستعمل هذه الفتيلة المتوهجة نفسها كمهبط فيما يسمى بالتسخين المباشر ، شكل (٤–١)ج ، أو تستعمل الفتيلة لتسخين مهبط معدنى محيط بها ومعزول عنها كهربيا فيما يسمى بالتسخين غير المباشر ، شكل (٤–١)د . عادة ، وخاصة فى صمامات الطاقات المنخفضة ،

يعالـــج السطح الفعال للمهبط بطرق تساعد على زيادة كفاءة البث الإلكترونى الحرارى ، وذلك بإضافة أكاسيد الثوريوم أو الباريوم والإسترنتيوم والكالسيوم مع إمرارها بدورات حرارية معينة لتثبيت فعاليتها .



(أ) الضوئى

(ب) ١ - المهبط الضوئى
٢، ٣، ٤ مهابط ثانوية تضاعف البث الإلكترونى الثانوى

(جـ) الحرارى المباشر

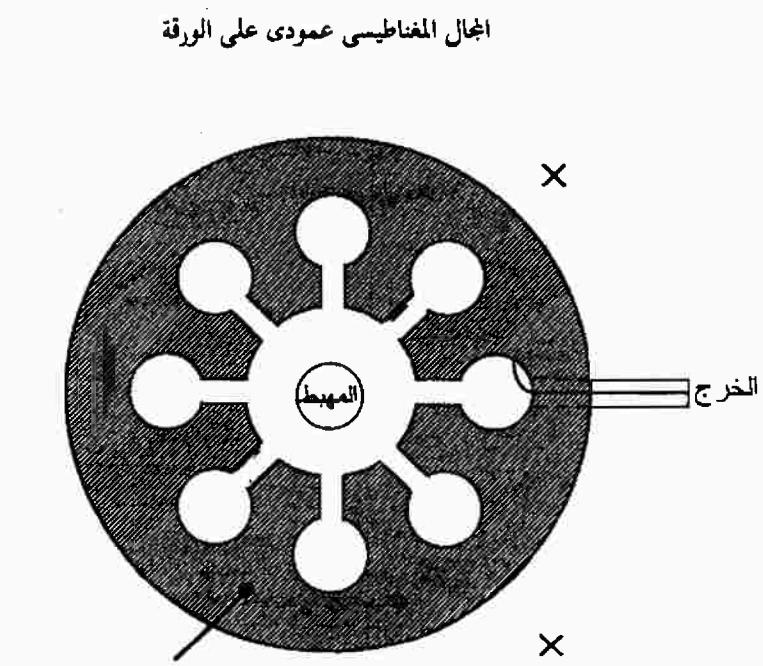
(د) الحرارى الغير مباشر

شكل (٤-١) : البث الإلكترونى .

فى صمامات التقويم والتكبير المفرغة ، تثبت هياكل المصعد والشبكات أمام المهبط على أبعاد معينة محسوبة ، وتوصل أطرافها الخارجية فى الدوائر الإلكترونية بالجهود الكهربية اللازمة لأداء الأغراض المطلوبة . وكما قلنا سابقا ، فإن نبائط الجوامد حلت محل هذه الصمامات ، فيما عدا صمامات التكبير المستعملة عند القدرات العالية مثل المراحل النهائية فى محطات الإرسال الإذاعى حيث تصل الطاقات إلى عشرات ومئات وأحيانا آلاف الكيلو وات .

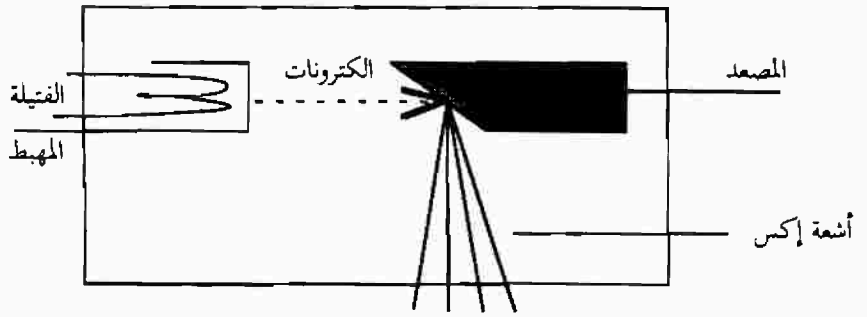
تعتمد صمامات الترددات الميكروية المفرغة فى عملها على قواعد مختلفة عن القواعد التى تعمل عليها صمامات التكبير المذكورة عند الترددات الأقل ، ولا مجال هنا للدخول فى مضمار هذه التفاصيل . وما يمكن قوله أن صمامات الترددات الميكروية ، مثلها مثل الصمامات الأخرى ، حلت محلها نبائط الجوامد المصنعة فى

هذه الحالة من المركب الشبه موصل زرنيخات الجاليوم – Gallium Aresnide (GaAs) . ذلك فيما عدا الطاقات العالية المستعملة مثلا فى الرادار وأفران الميكروويف ، فإنها لا تزال تستعمل صماماً مفرغاً يسمى الماجنترون ، مكوناً من فجوات رنين داخل كتلة معدنية تحيط بالمهبط . تمر الإلكترونات المنبثة من المهبط فى مسار دائرى بالقرب من مداخل فجوات الرنين تحت تأثير المجال الكهربى بين المهبط والكتلة المعدنية ومجال مغناطيسى عمودى عليه . بذلك تثار فجوات الرنين ويتولد فيها طاقة ميكروية مستمدة من طاقة تلك الإلكترونات ، شكل (٤-٢) .



شكل (٤-٢) الماجنترون

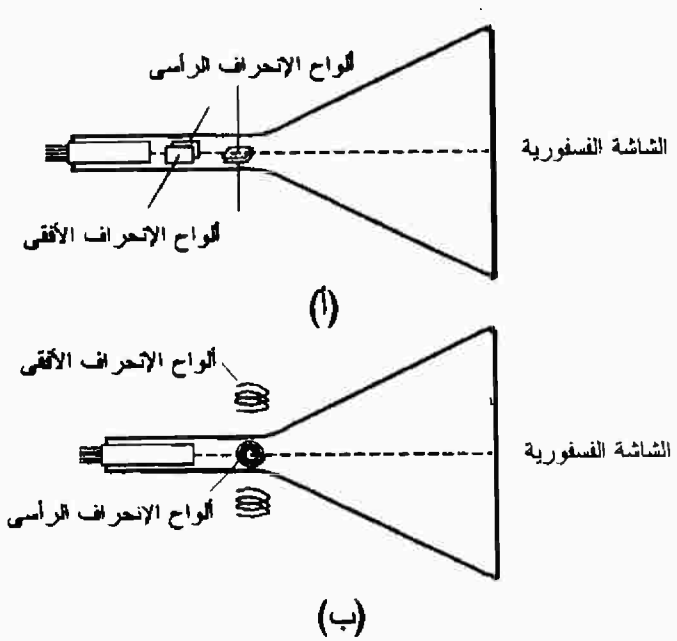
فى صمام توليد أشعة إكس ، يثبت أمام المهبط مصعد مكون من كتلة نحاسية أسطوانية مقطعها المواجه للمهبط مائل بزاوية ٤٥ درجة ومغلف بطبقة من التانجستن كما هو موضح بالشكل رقم (٤-٣) . بتوصيل جهد كبير بين المصعد والمهبط ، يقدر بالعشرات من الكيلو فولت ، تصل الإلكترونات إلى المصعد بطاقة فائقة كافية لإثارة إلكترونات المدارات العميقة داخل ذرات التانجستن ينتج عنها توليد أشعة إكس .



شكل (٤-٣) : صمام أشعة إكس .

بعض الصمامات الإلكترونية المفرغة ، مثل صمامات العرض ، تحتاج إلى شعاع إلكترونى مركز فى خيط دقيق ومنطلق بسرعة ثابتة عالية . الهيكل الذى يؤدى هذا الغرض يسمى المدفع الإلكترونى Electron Gun . يتكون هذا الهيكل من مهبط لبث الإلكترونات ومجموعة من المصاعد المعدنية المتوالية ، أسطوانية ومجوفة ، وكذلك شبكة بين المهبط ومجموعة المصاعد للتحكم فى شدة الشعاع . بتوزيع الجهد الكهربى على مجموعة المصاعد بطريقة معينة ، فإنها تعجل وتركز الإلكترونات أثناء مرورها فى محورها بحيث تخرج من المجموعة بمواصفات الشعاع المطلوب . يتكون صمام العرض المفرغ من وعاء زجاجى على شكل مخروطى له عنق ، شكل (٤-٤) . يوضع المدفع الإلكترونى فى طرف العنق عند مؤخرة الصمام . بعد خروج الشعاع الإلكترونى المركز والسريع من فوهة المدفع الإلكترونى فى اتجاه قاعدة المخروط ، يتم التحكم فيه بمجالات كهربية أو مغناطيسية حيث يمكن انحراف الشعاع فى اتجاهين متعامدين . إذا كان الانحراف يتم بمجال كهربى ، كما هو الوضع فى حالة صمامات القياس ، يوضع زوجان من الألواح المعدنية متعامدين فى عنق الصمام من الداخل قرب بداية الانفراج المخروطى ، شكل (٤-٤) أ ، حيث يتواجد المجالان الكهربيان المتعامدان نتيجة الجهد بين كل من اللوحين . إذا كان الإنحراف يتم بمجال مغناطيسى ، كما هو الوضع فى حالة صمام العرض التليفزيونى ، فإن ملفات الانحراف توضع على عنق الصمام من الخارج عند بداية الانفراج المخروطى ، شكل (٤-٤) ب ، حيث يتواجد المجالان المغناطيسيان المتعامدان نتيجة التيار المار فى كل ملف . مقدمة الصمام التى هى قاعدة المخروط ، وتسمى الشاشة ، مطلاة من الداخل بمادة فوسفورية كى تحول طاقة الشعاع الإلكترونى عند ارتطامه بها إلى نقطة ضوئية فى موضع الارتطام يمكن رؤيتها من الخارج أمام الشاشة . فى حالة عدم وجود أى انحراف ، تكون النقطة الضوئية فى مركز الشاشة . فى حالة وجود انحرافات إستاتيكية أو ديناميكية بطيئة أو سريعة ، يتولد على سطح الشاشة نقط أو رسومات ضوئية بأشكال تعتمد على قيمة وسرعة الانحرافين

المتعامدين . رغم أن جميع صمامات العرض المفرغة تشترك فى المبادئ الأساسية المذكورة . إلا أنها تختلف فى التفاصيل حسب التطبيق ، وذلك من ناحية شكل الشاشة ونوعية وتوزيع الطلاء الفوسفورى على سطحها الداخلى وهيكلة المدفع أو المدافع الإلكترونية وغير ذلك . كذلك يطلق على صمام العرض عدة أسماء حسب الاستعمال. فمثلا فى القياسات تسمى أنبوبة أشعة المهبط – Cathode Ray Tube ، وتستعمل لرسم العلاقة بين متغيرين فيما يشبه الرسوم البيانية . فى التليفزيون تسمى أنبوبة عرض الصورة – TV Picture Tube ، وتستعمل للعرض التليفزيونى الذى نراه ، مع اختلاف مواصفات الأنبوبة فى حالة العرض الأبيض والأسود عنها فى حالة الملون بطريقة لا مجال للتعرض لتفاصيلها هنا . فى الحاسب الإلكترونى تسمى الشاشة ، وتستعمل لمتابعة ما يجرى داخل الحاسب وعرض ما نحتاجه من بيانات .



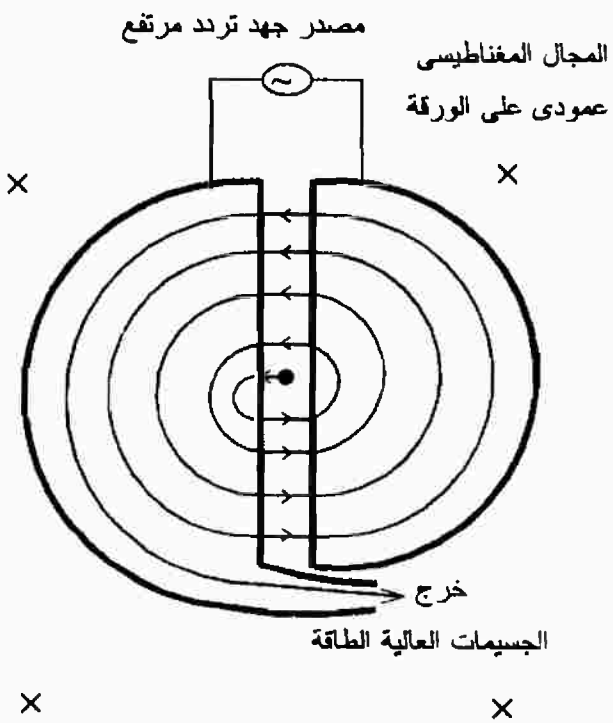
شكل (٤-٤) صمام أشعة المهبط.

أ- الانحراف بمجال كهربائى.

ب- الانحراف بمجال مغناطيسى.

يمكن أيضا مع الفارق ، اعتبار معجلات الجسيمات المشحونة – Particle Accelerators ، المستعملة فى الطاقة النووية ، ضمن الصمامات الإلكترونية المفرغة .

وهذه نوعية خاصة الهدف منها هو إعطاء الجسيمات المشحونة سرعات فائقة لاستخدامها كقذائف لتحطيم الذرة ، واستخدامات أخرى فى الأبحاث والتطبيقات النووية . مثال ذلك السيكلوترون – Cyclotron الذى يتكون من جزءين معدنيين داخل وعاء مفرغ، كل منهما نصف دائرى ومجوف ومعزولين كهربائيا عن بعضهما. يبدأ الجسم المشحون رحلته من المركز كما هو موضح بشكل (٤–٥) تحت تأثير جهد كهربى عند تردد مرتفع بين نصفى الدائرة ، ومجال مغناطيسى عمودى عليهما . وهذا يتسبب فى اجتياز الجسم المشحون مسار عدد كبير من الدوائر داخل تجويف نصفى الدائرة ، حيث يكتسب زيادة فى السرعة كل مرة يمر فيها فى الفراغ بين نصفى الدائرة ، ويخرج فى النهاية بسرعة وطاقة فائقة حسب الطلب . ورغم أن قطر السيكلترون يقدر بالأمتار ، فإن الجسيمات المشحونة تقطع مسافة فى الدوائر المتعددة تقدر بالأميال .



شكل (٤–٥) : السيكلوترون .

٣/٤ نبائط الجوامد الإلكترونية

بدأت الرحلة فى اتجاه نبائط الجوامد الإلكترونية بطريق الصدفة عام ١٩٤٨م . ذلك أنه أثناء قيام كل من جون باردين – John Bardeen ووالتر براتين – Walter Brattain بأبحاث معملية بمعامل بل – Bell Laboratories بالولايات المتحدة الأمريكية لتحسين أداء الثنائى البللورى بتحريك شوارب القط – Cat's Whiskers

على سطح البللورة لوحظ أمر لم يكن متوقعا . فقد لوحظ أثناء تقارب شاربين ، ومرور تيار كهربى فى الاتجاه الأمامى لأحدهما ، فإن هذا يتسبب فى إمرار تيار كهربى مساو فى الشارب الآخر رغم انحيازه فى الاتجاه الخلفى . تساوى التيار ، مع التحول من مقاومة منخفضة فى المدخل إلى مقاومة مرتفعة فى المخرج ، يتسبب فى الحصول على تكبير فى الجهد والطاقة . وبما أن تحول المقاومة – TRANsfer reSISTOR هو السبب فى هذا التكبير ، فقد اشتق منها اسم النبيطة المستحدثة وهو ترانزستور – TRANSISTOR . أحدث هذا الاكتشاف دويا فى حينه ، وبسببه حصل باردين وبراتين بالاشتراك مع وليم شوكلى – William Shockley على جائزة نوبل فى الطبيعة عام ١٩٥٦م .

كما هو متوقع ، أثار هذا الاكتشاف عديداً من الباحثين الذين قاموا بسيل من التجارب المعملية والتأليف والنشر فيما كان يسمى «ترانزستور اتصال النقطة – Point Contact Transistor » حيث إن الاتصال ببللورة الجيرمانيوم كان عند نقطتين متقاربتين . كانت الأبحاث فى معظمها معملية ، ولم تكن هناك قواعد نظرية واضحة وثابتة لبناء هذا الترانزستور ، مما جعله يعتمد أكثر على الحظ مع صعوبة تكرار المواصفات نفسها حتى تحت ظروف البناء نفسها . جاءت الدفعة القوية عام ١٩٥٢م عندما قدم وليم شوكلى نظريته لما يسمى وصلة "pn" والترانزستور المبنى على أساسها ، وكلاهما يرتكز على قواعد علمية ثابتة . بذلك اختفى تماما ترانزستور اتصال النقطة ، وتطورت نبائط الجوامد الإلكترونية إلى ما نراه فى أيامنا هذه .

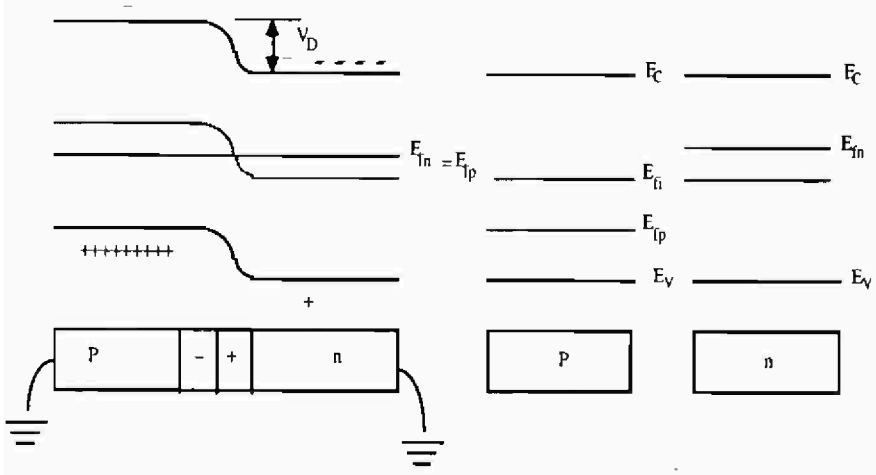
كما ألمحنا سابقا ، فإن نبائط الجوامد الإلكترونة مبنية أساسا من بللورات أشباه الموصلات السليمة البنية الهيكلية من حيث تكرار الخلية البللورية فى نسق منتظم دون خلل ، على الأقل فى مدى الحيز الذى تشغله النبيطة . هذا هو المعتاد ، وفيما عدا ذلك فهو الاستثناء . هذا مع العلم أنه عند إضافة ذرات شوائب المعطيات – Donors أو المتلقيات – Acceptors لخلق أشباه موصلات من نوع "n" أو نوع "p" على التوالى فإن ذرات هذه الشوائب تدخل فى الهيكل البللورى كبدائل لبعض ذرات شبه الموصل دون الإخلال بانتظام الهيكل البللورى نفسه . ويطلق على ذرات الشوائب بالذرات المضافة ، وذرات شبه الموصل بالذرات المضيفة . كما قلنا سابقا ، فإن مادة شبه الموصل المتجانسة ، سواء ذاتية – Intrinsic أو غير ذاتية – Extrinsic (أى من نوع "n" أو "p") ، لا تصلح وحدها فى خلق نبيطة إلكترونية . كى نحصل على نبيطة إلكترونية ، يلزم تواجد عدم استمرارية فى نوعية شبه الموصل البللورى ، أو مواجهة بين أوساط مختلفة أحدها على الأقل شبه موصل بللورى . من أهم وأشهر عدم الاستمرارية هو الانتقال داخل بللورة شبه الموصل من شبه موصل من نوع "p"

مثلا إلى شبه موصل من نوع "n" دون المساس بانتظام الهيكل البللورى . يمكن أن يكون هذا الانتقال مفاجئاً أو متدرجاً ، وفى كلا الحالتين تسمى منطقة الانتقال «بالوصلة pn Junction - pn » . من ناحية المواجهة بين شبه موصل وأوساط أخرى ، هناك نوعان : النوع الأول « معدن – شبه موصل / Metal-Semicondutor » ويرمز له بالرمز "MES" ، والنوع الثانى «معدن – عازل – شبه موصل / Metal Insula-tor-Semiconductor » ويرمز له بالرمز "MIS" ، وإذا كان العازل أكسيد السيليكون Silicon Oxide (SO_2) يرمز له بالرمز "MOS" وهذا هو الأكثر إستعمالا حينما يكون شبه الموصل من مادة السيليكون .

النبائط المبنية علي أساس وصلة أو وصلات "pn" تعتمد فى أدائها على التحكم فى ارتفاع الجهد الحاجز لحوامل الشحنات الحرة عند الوصلة بواسطة الجهد الخارجى بين طرفى الوصلة، وبالتالى التحكم فى التيار الكهربى الناتج من مرور إلكترونات حرة فى اتجاه وفجوات حرة فى الاتجاه المضاد. وبما أن التيار الكهربى فى هذه النوعية من النبائط يتكون من تحركات إلكترونات حرة سالبة وفجوات حرة موجبة، فإنها أحيانا تسمى «النبائط الثنائية الإستقطاب Bipolar Devices » .

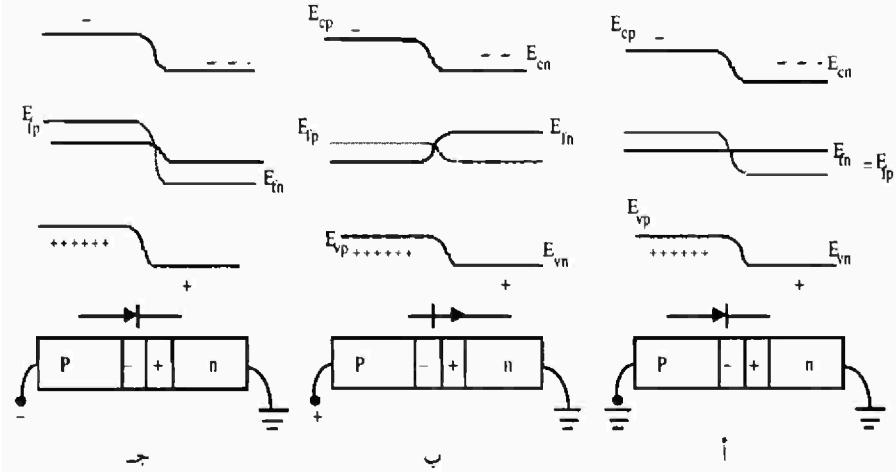
النبائط المبنية على أساس المواجهة بين شبه موصل وأوساط أخرى تعتمد فى أدائها على التحكم فى قناة توصيل بمجال كهربائى عمودى على القناة ، نتيجة جهد كهربى على بوابة التحكم ، وبالتالى فى التيار الكهربى بين طرفين أو جزيرتين من نوع القناة نفسه . لذلك فإن هذه النبائط أحادية الاستقطاب إما من نوع القناة "n" أو من نوع القناة "p" .

فى أى مادة أو مجموعة من المواد المتصلة فى حالة استقرار ذاتى مع عدم التعرض لمؤثرات أو جهود خارجية ، فإن مستوى فيرمى للطاقة (السابق تعريفه) يتساوى فيها جميعا . وهذا يمكن تشبيهه بالأوانى المستطرقة حيث ، فى حالة الاستقرار ، يتساوى سطح السائل فى جميع الأوانى المتصلة . إذا طبقنا هذه الحقيقة على وصلة "pn" ، وبالرجوع إلى الشكل رقم (٤-٦) ، فإن هذا يؤدى إلى خلق جهد داخلى بين مستويات الطاقة فى كل من طرفى الوصلة . يسمى هذا الجهد الداخلى «جهد الانتشار – Diffusion Potential (V_D) » حيث يمنع انتشار الالكترونات من اليمين إلى اليسار وكذلك الفجوات من اليسار إلى اليمين ، وبذلك تكون قيمة التيار الكهربى صفر . كذلك تتكون أيضا منطقة عازلة حول طرفى الوصلة بها شحنات كهربية أيونية ثابتة غير حرة موجبة فى ناحية "n" وسالبة فى ناحية "p" .



شكل (٤-٦)

هنا ، تجدر الإشارة إلى أن مستويات الطاقة الموضحة مبنية على أساس الشحنات السالبة . لذلك ، كما ذكرنا سابقا ، فإن الإلكترونات تنزلق ذاتيا بسهولة إلى أسفل عند أى حاجز ، وتحتاج إلى طاقة خارجية كى تتسلق إلى أعلا ، بينما تطفو الفجوات الموجبة ذاتيا بسهولة إلى أعلا عند أى حاجز ، وتحتاج إلى طاقة خارجية كى تنزلق إلى أسفل. كذلك ، فإن مستوى فيرمى ينخفض فى ناحية الجهد الخارجى الموجب ، ويرتفع فى ناحية الجهد الخارجى السالب . إذا طبقنا هذه الحقائق على وصلة "pn" ، فإننا نصل إلى الشكل (٤ - ٧) . في الشكل رقم (٤-٧) أ ، لا يوجد جهد خارجى بين طرفى الوصلة والتيار الكهربى صفر . فى الشكل (٤-٧) ب ، تم توصيل الطرف "p" بجهد خارجى موجب ينتج عنه انخفاض فى الجهد الحاجز بقيمة الجهد الخارجى نفسه مما يساعد على انتشار بعض الإلكترونات إلى اليسار وبعض الفجوات إلى اليمين ويتسبب فى مرور تيار كهربى أمامى ملموس . فى الشكل (٤-٧) ج ، تم توصيل الطرف "p" بجهد خارجى سالب ينتج عنه ارتفاع فى الجهد الحاجز بقيمة الجهد الخارجى نفسه مما يزيد فى منع انتشار الإلكترونات إلى اليسار أو الفجوات إلى اليمين ، ويكون التيار الكهربى تقريبا منعدماً فيما عدا ما يسمى بتيار التشبع العكسى الضئيل نتيجة حوامل الشحنات الأقلية فى طرفى الوصلة . من هذا يتضح أن وصلة "pn" لها خواص التقويم ، وتسمى «ثنائى شبه الموصل Semiconductor – Diode » ، ولها عديد من الاستعمالات فى حد ذاتها .



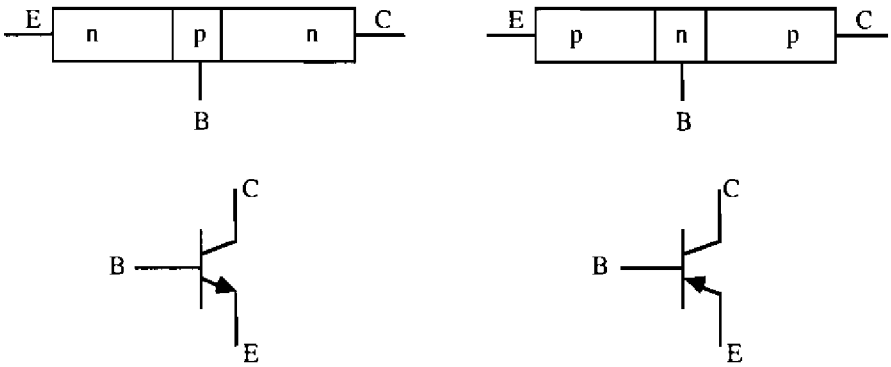
أ — الجهد الخارجي = صفر، التيار = صفر

ب — الجهد الخارجي في الاتجاه الأمامي، التيار مرتفع

جـ — الجهد الخارجي في الاتجاه العكسي، التيار شبه منعدم

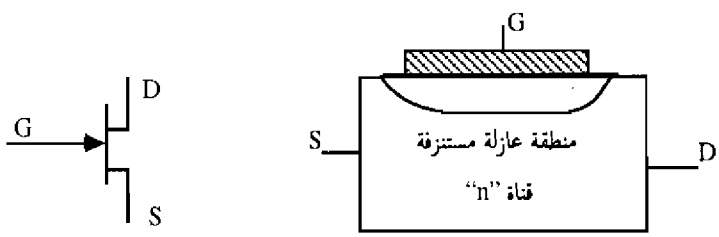
شكل (٤-٧)

لبناء ترانزستور على أساس وصلة "pn" ، فإنه يلزم تواجد وصلتين متقاربتين جدا لبعضهما في بناء بللورى منتظم لنحصل على أحد الهيكلين "pnp" أو "npn" . بتوصيل جهود انحياز خارجية بحيث تكون إحدى الوصلتين منحازة في الإتجاه الأمامي الذى يسمح بمرور تيار كهربى ، والوصلة الأخرى منحازة في الاتجاه العكسى ، فإن تيار الوصلة الأولى المنخفضة المقاومة يصل بأكمله تقريباً إلى الوصلة الثانية المرتفعة المقاومة بسبب صغر المسافة بين الوصلتين ، وبذلك يحدث تكبير للجهد والطاقة . في هذه الترانزستورات ، تسمى الوصلة المنحازة في الاتجاه الأمامي «بوصلة البعث – Emitting Junction » ويسمى الطرف المتصل بها «الباعث – Emitter (E) » ، وتسمى الوصلة المنحازة في الاتجاه الخلفي « بوصلة الجمع – Collecting Junction » ويسمى الطرف المتصل بها «الجامع – Collector (C) » ، وتسمى المنطقة بين الوصلتين والطرف المتصل بها «القاعدة – Base (B) ». يوضح الشكل رقم (٤-٨) النموذجين الطبيعيين لترانزستورات "pnp" و "npn" ورمز كل منهما في الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤-٨)

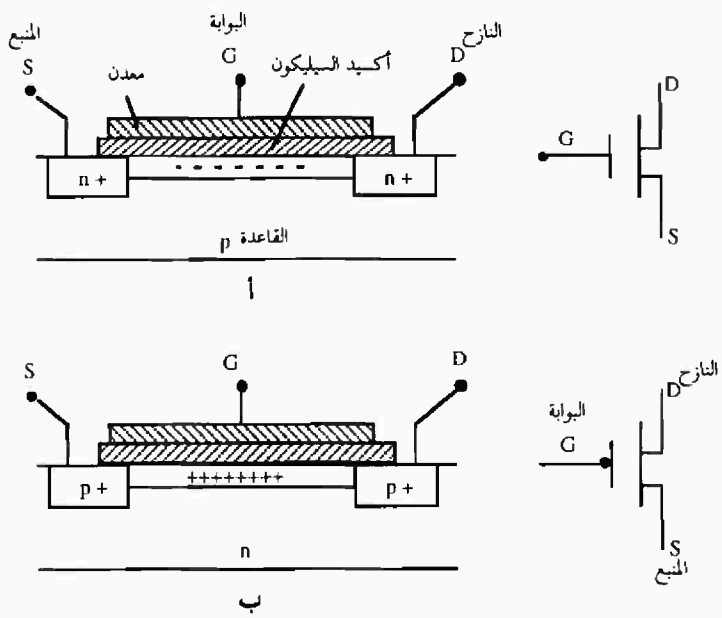
حسب نوع المعدن وشبه الموصل ، يمكن أن تكون المواجهة «معدن – شبه موصل » وصلة عادية تتبع قانون أوم، وبذلك تسمى «وصلة أومية – Ohmic Contact » ، وهذه مطلوبة فى التوصيلات المعتادة . ويمكن أن تكون لهذه المواجهة خاصية التقويم كثنائى وفى هذه الحالة تسمى «ثنائى شوتكى – Schottky Diode » وهذا مطلوب فى حد ذاته كمقوم ، كما أنه أساس بناء ترانزستور حقلى يرمز له "MESFET" يستعمل كثيرا عند الترددات الميكروية حيث تكون مادة شبه الموصل هى مركب «زرنيخات الجاليوم – Gallium Arsenide (GaAs) » . فى هذا الترانزستور تستعمل وصلة شوتكى كبوابة "Gate-(G)" للتحكم فى سعة قناة التوصيل بين المنبع "Source (S)" والنازح "Drain (D)" ، ويتأتى ذلك بالتحكم فى عرض منطقة الاستنزاف العازلة على سطح شبه الموصل بجوار المعدن . يوضح الشكل (٤-٩) نموذجاً طبيعياً مبسطاً لهذا الترانزستور ورمزه فى الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤-٩)

للمواجهة الهيكلية «معدن– أكسيد السيليكون – شبه موصل – Metal-Oxide

Semiconductor (MOS) » فى حد ذاتها صفة المكثف ، وأحيانا تستعمل فعلا كمكثف. ولكن الاستعمال الأهم لها هو بناء ترانزستور حقلى يرمز له "MOSFET". لبناء هذا الترانزستور ، يزرع على سطح القاعدة جزيرتان من نوع مخالف لنوع شبه موصل القاعدة ، تسمى إحداهما المنبع – Source والأخرى النازح – Drain . يستعمل المعدن كبوابة لخلق قناة توصيل عند سطح شبه موصل القاعدة بين الجزيرتين، والتحكم فيها . الخلق والتحكم فى قناة التوصيل يتم نتيجة المجال الكهربى الناتج من جهد البوابة والعمودى على اتجاه القناة حيث يتسبب فى انحناء مستويات الطاقة قرب سطح القاعدة ، وهذا بدوره يحدث انعكاساً فى نوعية شبه الموصل عند السطح مكوناً قناة التوصيل التى يعتمد سمكها وبالتالى التيار الكهربى المار خلالها على جهد البوابة . هناك نوعان من هذا الترانزستور . النوع الأول تكون القاعدة فيه من نوع "p" والجزيرتان والقناة من نوع "n" ، ويسمى ترانزستور حقلياً ذا قناة "n" ويرمز له بالرمز "NMOS" ، والنوع الثانى تكون القاعدة فيه من نوع "n" والجزيرتان والقناة من نوع "p" ، ويسمى ترانزستور حقلياً ذا قناة "p" ويرمز له بالرمز "PMOS" . فى كلتا الحالتين ، إذا كانت قناة التوصيل أصلا متواجدة وتتحكم فيها البوابة بالزيادة والنقصان يسمى الترانزستور من نوع «الاستنزاف – "Depletion" ، أما إذا كانت قناة التوصيل أصلا غير متواجدة وتتواجد فقط عند جهد معين للبوابة التى تتحكم فيها بعد ذلك بالزيادة والنقصان يسمى الترانزستور من نوع «الإعزاز – Enhancement » . يوضح الشكل (٤–١٠) أ ، ب النموذجين الطبيعيين للترانزستورين من نوع القناة "n" والقناة "p" ورمزهما فى الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤–١٠)

لا يفوتنا هنا أن نتعرض سريعاً لنبيطة إلكترونية خاصة ، لها تطبيق عملى مهم . هذه النبيطة تسمى أحيانا الخلية الضوئية – Photo Cell ، وأحيانا الخلية الشمسية – Solar Cell ، وأحيانا الخلية الفولتية – Voltaic Cell . هذه النبيطة أو الخلية ، فى معظم الأحيان ، ما هى إلا وصلة pn عادية مبنية على رقيقة بأكملها بحيث تكون الوصلة قريبة من السطح المعرض للإشعاع الضوئى أو الشمسى . الموصل المعدن ناحية الوصلة يكون على شكل أصابع متفرقة تسمح بمرور الأشعة من بينها . عندما تسقط الأشعة على منطقة الوصلة تتولد ثنائيات من الإلكترونات والفجوات الحرة ينجذبان إلى طرفى الوصلة ، ويولدان بذلك جهداً كهربيًا بنيهما . حينما يكون طرفى الوصلة غير متصلتين ، يكون التيار صفراً والجهد أعلا قيمة ، ويسمى جهد الدائرة المفتوحة V_0 . حينما يتلامس الطرفان قصرا ، يكون الجهد صفراً والتيار أعلا قيمة ، ويسمى تيار القصر I_{sc} . تستعمل الخلية عمليا عند حمل معين بحيث يكون الجهد V_L أقل من V_0 والتيار I_L أقل من تيار القصر I_{sc} ، ولكن حاصل ضربهما $V_L I_L$ ، الذى يمثل القدرة ، أعلا ما يمكن . وكما قلنا ، فهذه النبيطة لها تطبيق عملى مهم فى استغلال الطاقة الضوئية والشمسية لتوليد الطاقة الكهربية .

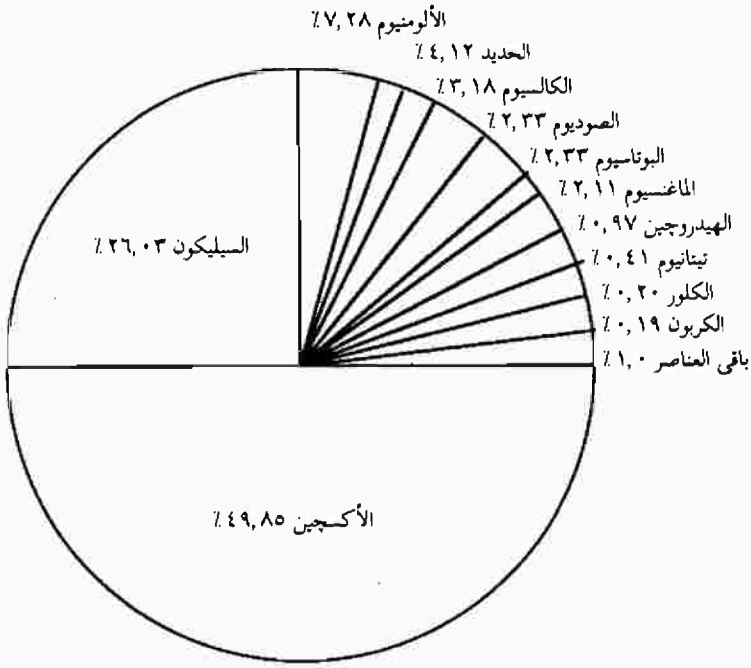
٤/٤ الدوائر المتكاملة

لولا النجاح فى استعمال السيليكون بدلا من الجيرمانيوم، فى نهاية الخمسينيات ، كشبه موصل لصناعة الترانزستورات ، لما تطورت الدوائر المتكاملة إلى ما نراه فى أيامنا هذه . تأخر استعمال السيليكون فى البداية لصعوبة تحضيره كبللورة نقية ، بالإضافة إلى انخفاض حركية الإلكترونات "u_n" والفجوات "u_p" به مقارنة بقيمهما فى الجيرمانيوم. يوضح الجدول (٤–١) المقارنة بين خواص الجيرومانيوم والسيليكون المؤثرة فى أداء

جدول (٤–١)

الخاصية	الجيرمانيوم	السيليكون	الوحدة	الميزة
الرقم الذرى	٣٢	١٤	–	–
الوزن الذرى	٧٢,٦	٢٨,٠٨	–	–
الكثافة	٥٣٢٠	٢٣٣٠	كيلوجرام /متر٣	السيليكون أخف وزناً
شدة مجال الانهيار	$^{٧}١٠$	$^{٧}١٠ \times ٣٠$	فولت / متر	السيليكون أكثر تحملا للجهد الكهربى
ثابت العزل النسبى E_r	١٦	١١,٨	–	–
عرض الطاقة الممنوعة	٠,٦٨	١,١٢	إلكترون فولت (eV)	تيار التشبع العكسى أقل
n_i	$^{١٩}١٠ \times ٢,٤$	$^{١٦}١٠ \times ١,٥$	متر–٣	للسيليكون
μ_n	٠,٣٩	٠,١٥	متر٢ / فولت ثانية	سرعة حوامل الشحنات
μ_p	٠,١٩	٠,٠٤٥	متر٢ / فولت ثانية	أسرع فى الجيرمانيوم
معامل التمدد الحرارى	$^{٦-}١٠ \times ٥,٨$	$^{٦-}١٠ \times ٢,٦$	$^{\circ}$م–١	أبعاد السيليكون أقل تأثراً بالحرارة
معامل التوصيل الحرارى	٦٠	١٥٠	وات / متر $^{\circ}$م	السيليكون قادر على العمل عند طاقات أعلى
درجة حرارة الإنصهار	٩٥٨	١٤١٢	م	السيليكون قادر على العمل عند درجات حرارة أعلى

الترانزستورات المصنعة من أى منهما . من هذا الجدول ، يتضح أن السيليكون يتميز على الجيرمانيوم كمادة لصناعة الترانزستورات فى سبعة بنود مقابل بند واحد يتميز فيه الجيرمانيوم . إذا أضفنا إلى ذلك حقيقة أن السيليكون متوفر بكثرة فى الطبيعة ، بنسبة حوالى ٢٦ ٪ حيث يأتى فى الدرجة الثانية فقط بعد الأكسجين المتواجد فى الطبيعة بنسبة حوالى ٥٠ ٪ ، فى حين أن الجيرمانيوم شحيح للغاية، كما هو موضح بالشكل (٤-١١) ، كذلك سهولة تكوين اكسيد السيليكون الذى له خاصية عزل كهربى



شكل (٤-١١) : توزيع العناصر .

ممتازة وصلابة ميكانيكية قوية ، كل هذا وغيره يرشح السيليكون كبديل متفوق بكثير على الجيرمانيوم لصناعة النبائط الإلكترونية رغم انخفاض "u_n" و "u_p" . أدى ذلك إلى نشاط كبير لاستخلاص وتجهيز السيليكون البللورى . ما أن تقدمت تكنولوجيا استخلاص وتجهيز السيليكون البللورى النقى بطرق اقتصادية ، حتى حل محل الجيرمانيوم الذى اختفى تماماً كمادة لصناعة النبائط الإلكترونية . فى الأيام الأولى للترانزستور ، حيث كان استعمال الجيرمانيوم هو المعتاد ، كانت تصنع وصلات pn بطرق من أهمها انتشار الشوائب بالتسخين أو تغذية الجيرمانيوم المنصهر تباعاً بالشوائب عند بناء البللورات بالسحب . بقدوم السيليكون ، وإمكانية أكسدة سطحه بطبقة من أكسيد السيليكون المميز ، تطورت تكنولوجيا صناعة الترانزستور . ففى عام ١٩٦٠م تبلورت ما يسمى «التكنولوجيا السطحية – Planar Technology » . كان هذا فى

حد ذاته نقلة تكنولوجية رائعة فى تصنيع الترانزستورات المنفردة ، حيث أمكن تصنيع الآلاف منها فى مسيرة عملية واحدة . فى التكنولوجيا السطحية يبدأ التصنيع برقائق دائرية من السيليكون البللورى سمكها ٢٥٠ ميكرون (ربع ملليمتر) من نوع "n" أو "p" حسب نوع الترانزستورات المراد تصنيعها npn أو pnp . يتم تغطية الرقائق بطبقة من أكسيد السيليكون فى أفران خاصة عند درجة حرارة ١١٠٠م مع تواجد تيار من الأكسجين الرطب . يتبع ذلك تغطية الأكسيد بطبقة مقاومة للضوء (Photo Resist) واستعمال تكنولوجيا الطباعة الحجرية الضوئية (Photolithography) ومواد كيميائية لتحديد وتعرية أماكن الحقن . يتم حقن الشوائب فى أفران خاصة . يعاد تغطية الرقائق مرة أخرى بطبقة جديدة من أكسيد السيليكون ، وتكرر الخطوات السابقة حتى يتم تصنيع النبيطة المطلوبة . فمثلاً ، عند تصنيع ترانزستورات من نوع npn ، تكون البداية رقائق دائرية من بللورات السيليكون من نوع "n" . كان قطر الرقيقة فى بداية التكنولوجيا السطحية بوصة واحدة ، وصل إلى ٣ بوصات عند بداية الدوائر المتكاملة فى الستينيات ، ووصل حاليا فى التسعينيات إلى ١٢ بوصة . يمكن إيجاز خطوات تصنيع ترانزستورات التكنولوجيا السطحية من نوع npn كما يلى :

١- تؤكسد أسطح الرقائق من نوع "n" بوضعها فى أفران عند درجة حرارة ١١٠٠م لمدة تعتمد على السمك المطلوب لطبقة أكسيد السيليكون .

٢- تغطية الرقائق بعد ذلك بمادة مقاومة ضوئية (Photo Resist) .

٣- يستخدم قناع وطرق طباعة حجرية ضوئية (photolihography) لتحديد أماكن قواعد الترانزستورات ، وتستخدم مواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

٤- تحقن تلك الأماكن بشوائب المتلقيات لخلق مناطق من نوع "p" . يتم ذلك فى أفران خاصة لهذه الشوائب منعاً للتلوث .

٥- يعاد أكسدة أسطح الرقائق مرة ثانية .

٦- تغطى الرقائق بمادة مقاومة ضوئية .

٧- يستخدم قناع ثان وطرق طباعة حجرية ضوئية لتحديد أماكن بواعث الترانزستورات ومواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

٨- تحقن تلك الأماكن بشوائب المعطيات لخلق أماكن من نوع "n" . يتم ذلك فى أفران خاصة لهذه الشوائب منعاً للتلوث .

٩- يعاد أكسدة أسطح الرقائق مرة ثالثة .

١٠- تغطى الرقائق بمادة مقاومة ضوئية .

١١- يستخدم قناع ثالث وطرق طباعة حجرية ضوئية لتحديد أماكن ارتكاز التوصيلات الكهربية ، ومواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

١٢- يغطى سطح الرقائق بطبقة من الألمونيوم بطريقة التبخير فى حيز مفرغ .

١٣- يستخدم قناع رابع عكسى للقناع الثالث لحفر الألمونيوم من سطح الرقائق فيما عدا أماكن ارتكاز التوصيلات الكهربية .

١٤- فى النهاية ، يتم قطع الرقائق بآلة ماسية للحصول على شرائح الترانزستورات المنفردة .

١٥- توضع كل شريحة على حامل له ثلاثة أطراف خارجية معزولة ، يتم توصيل كل منها بنقاط ارتكاز التوصيلات الكهربية لكل من الباعث والقاعدة والجامع ، ثم يتم تغليف كل ترانزستور على حده .

يلاحظ أن عملية تصنيع الترانزاستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية تحتاج إلى أربعة أقنعة يلزم لتجهيزها دقة فى تكنولوچيا التصوير . كما يلاحظ أنه كلما ازداد قطر الرقيقة ازداد الإنتاج .

كان الانتقال من التكنولوچيا السطحية المستعملة فى صناعة الترانزستورات المنفردة إلى الدوائر المتكاملة منطقيًا ومتوقعًا . فالأسئلة التى بدأت تطرح نفسها هى : لماذا نقطع الرقيقة إلى ترانزستورات منفردة ثم نعود ونوصلها بمقاومات وأسلاك لبناء دوائر إلكترونية ؟ لماذا لا نتركها مكانها ونبنى حولها على الرقائق المقاومات المطلوبة نفسها باستعمال مناطق فى مادة شبه الموصل تفى بهذه الأغراض والتوصيل بينها بخطوط معدنية ، وبذلك نحصل على دوائر متكاملة بدلا من ترانزستورات منفردة ؟

طرحت فكرة الدوائر المتكاملة لأول مرة فى مؤتمر علمى للمكونات الإلكترونية عقد بواشنطن عام ١٩٥٢م . ورغم أن الفكرة كانت عابرة ، إلا أنها ألقت بنورها فى أذهان الباحثين ، وأوجدت بينهم سباقًا خفيًا والشعور بأهمية السبق فى تحقيق ذلك . وعلى الرغم من أن الجيرمانيوم كان هو مادة شبه الموصل المستعملة فى تلك الحقبة ، فقد تمكن بعض الباحثين من بناء دوائر إلكترونية متكاملة بسيطة على قواعد من الجيرمانيوم البللورى . من أبرز هؤلاء الباحثين جاك كيلبى - Jack Kilby الذى تمكن فى سبتمبر عام ١٩٥٨م أثناء عمله بشركة تكساس إنسترومنتس - Texas Isntruments من بناء دائرة متكاملة تماثلية بسيطة على رقيقة من الجيرمانيوم عبارة

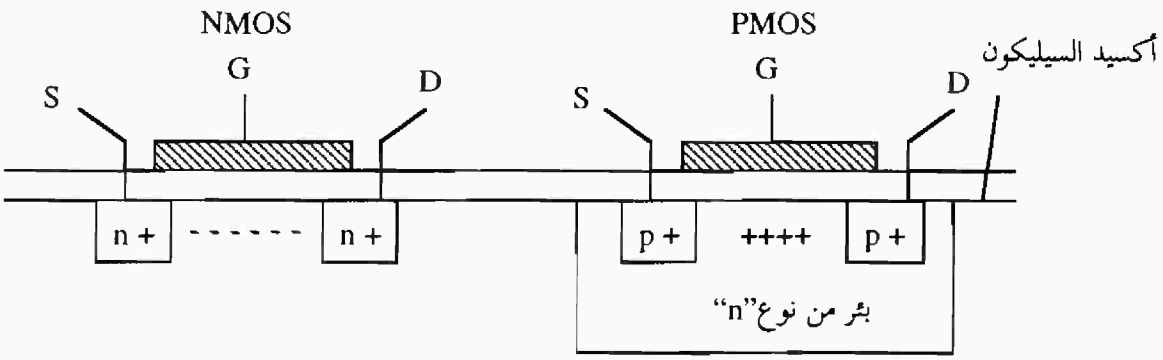
عن مذبذب إزاحة الطور – Phase Shift Oscillator ، وأخرى رقمية بسيطة أيضا على رقيقة من الجيرمانيوم عبارة عن قلاب – Flip Flop . حصل كيلبى على براءة هذا الاختراع فى أواسط الستينيات بعد معركة قانونية طويلة أمام منافسين آخرين من أبرزهم روبرت نويس – Robert Noyce من شركة فيرتشايلد – Fairichild . من حسن الطالع ، أنه فى تلك الأثناء ظهر السيليكون كبديل للجيرمانيوم ، واستعملت التكنولوچيا السطحية كما ذكرنا سابقا . ساعد تجمع ما سبق من محاولات مع ظهور السيليكون واستعمال التكنولوچة السطحية على ازدياد الثقة فى إمكانية نجاح الدوائر المتكاملة ، خاصة إذا لاحظنا أن العمليات التى استعملت فى صناعة الترانزستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية هى نفسها المستعملة فى الدوائر المتكاملة حتى أيامنا هذه مع الفارق فى عدد الدورات المتكررة ودقة الأبعاد وكثافة المكونات . هذه العمليات هى الأكسدة – Oxidation ، التغطية بطبقة من المقاوم الضوئى – Photo resist ، الطباعة الحجرية الضوئية – Photolihography الحفر – Etching ، الحقن – Doping ، ثم الأكسدة ثانية ، وتكرار ذلك حسب الاحتياج ، وفى النهاية التوصيلات المعدنية – Metalization . بينما تحتاج صناعة الترانزستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية إلى تكرار الدورة أربع مرات مع استعمال أربعة أقنعة كما ذكرنا سابقا ، فإن الدوائر المتكاملة عادة تحتاج أضعاف ذلك من الدورات والأقنعة .

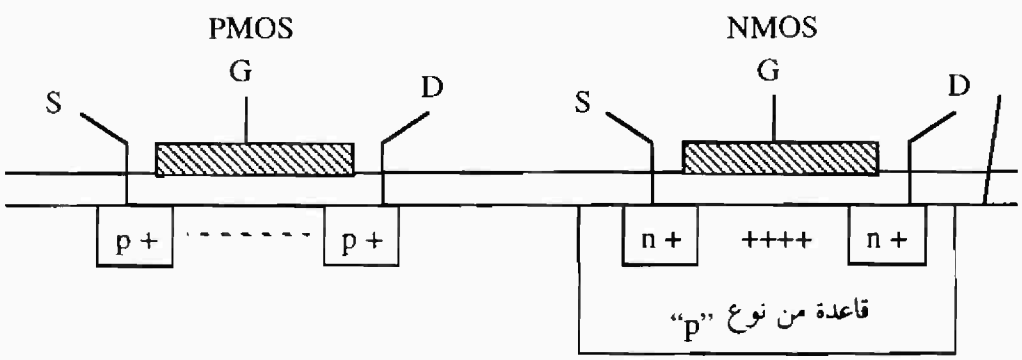
تبدأ صناعة الدوائر المتكاملة برقائق دائرية من بللورات السيليكون سمكها ٢٥٠ ميكرون (ربع ملليمتر) ، وقطرها أكبر ما يمكن حسب ما تسمح به تكنولوچيا استخراج البللورات . كان قطر الرقيقة عام ١٩٦٥م ٢ بوصة ، ووصل حالياً عام ١٩٩٩ م ١٢ بوصة . يقسم سطح كل رقيقة إلى عدد من المساحات تستوعب كل منها دائرة متكاملة ، وبحد أقصى للمساحة أكبر ما يمكن حسب ما تسمح به درجة نقاء الرقيقة البللورية لتفادى تواجد أماكن معابه قد تتسبب فى فشل بعض الدوائر المتكاملة، وبالتالى كفاءة الإنتاج . كان الحد الأقصى لمساحة الشريحة عام ١٩٦٥م ٢×٢ ملليمتر ، ووصل حاليا عام ١٩٩٩م إلى من ١×١ سم . يلاحظ أنه كلما ازداد قطر الرقيقة ازداد الإنتاج ، وكلما إزداد الحد الأقصى المسموح به لمساحة الشريحة ، أمكن بناء دوائر متكاملة أكبر اتساعا وأكثر شمولا .

يوجد نوعان أساسيان لتكنولوچيا تصنيع الدوائر المتكاملة . النوع الأول يسمى التكنولوچيا الثنائية الإستقطاب – Bipolar Technology ، ويعتمد على الترانزستورات الثنائية الاستقطاب npn و pnp . النوع الثانى يسمى تكنولوچيا معدن – أكسيد – شبه موصل / MOS Technology ، ويعتمد على الترانزستورات الحقلية ذوات القنوات "n" و "p" . فى صناعة الدوائر المتكاملة ، تبنى الترانزستورات فى

أماكنها المحددة بطريقة بناء الترانزستورات المنفردة نفسها المذكورة سابقا . فى الوقت نفسه تبنى المكثفات والمقاومات فى أماكنها المحددة فى الدور المناسب خلال الدورات المتكررة . فمثلا ، يمكن الحصول على مكثف باستعمال وصلة pn منحازة فى الاتجاه العكسى ، أو بمساحتين موصلتين بينهما عازل . كذلك ، يمكن بناء مقاومة بحقن منطقتها المحددة أثناء حقن قاعدة أو باعث الترانزستور الثنائى الإستقطاب npn لنحصل على منطقة من نوع "p" أو "n" لها المقاومة المطلوبة . تتكرر دورات عمليات تصنيع الدوائر المتكاملة حسب مستوى تعقيد وشمول الدائرة . فهناك الدوائر المتكاملة الصغيرة الإتساع – Small Scale Integration (SSI) التى تحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود ٢١٠ ، والدوائر المتكاملة المتوسطة الإتساع – Medium Scale Integration (MSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود ٣١٠ ، والدوائر المتكاملة الكبيرة الاتساع – Large Scale Integration (LSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود ٤١٠ ، الدوائر المتكاملة الشديدة الاتساع – Very Large Scale Integration (VLSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود ٥١٠ فأكثر . وقد وصل عدد الترانزستورات على الشريحة الواحدة حاليا أكثر من ١٠ ملايين ترانزستور (٧١٠) ، ومتوقع الإستمرار فى الزيادة . ساعد على تحقيق هذه الزيادة فى الاتساع فى مساحة الشريحة الذى وصل حاليا إلى أكثر من ١×١ سم ، وفى الوقت نفسه ازدياد كثافة المكونات مع تصغير الحد الأدنى للأبعاد الذى وصل حاليا إلى كسر صغير من الميكرون .

تعتبر تكنولوجيا معدن – أكسيد – شبه موصل MOS هى الأكثر شيوعاً حالياً فى الدوائر المتكاملة الرقمية ، وعلى الأخص تلك التى تحتوى على ترانزستورات حقلية MOST من النوعين ذوى القنوات "n" و "p" على الشريحة نفسها . تسمى هذه بتكنولوجيا MOS المتممة – Complementary MOS (CMOS) . وبما أنها تشمل ترانزستورات NMOS و PMOS على الشريحة نفسها ، فإنها فى التصنيع تبدأ إما بقاعدة من نوع "p" محقونة بأبيار من نوع "n" ، أو بقاعدة من نوع "n" محقونة بأبيار من نوع "p" . تبنى الترانزستورات NMOS فى المناطق من نوع "p" وترانزستورات PMOS فى المناطق من نوع "n" ، كما هو موضح بالشكل (٤-١٢) . كذلك تم حديثاً الدمج بين التكنولوجيا الثنائية الاستقطاب Bipolar والتكنولوجيا المتممة CMOS فى تكنولوجيا جديدة تسمى BICMOS تعطى مرونة ولها مزايا فى تصميم بعض الدوائر والنظم الإلكترونية .


NMOS
PMOS
أكسيد السيليكون
G
S
D
n +
p +
++++
بئر من نوع"n"
قاعدة من نوع "p"


PMOS
NMOS
G
S
D
p +
n +
++++
قاعدة من نوع "p"
بئر من نوع"n"

شكل (٤-١٢)