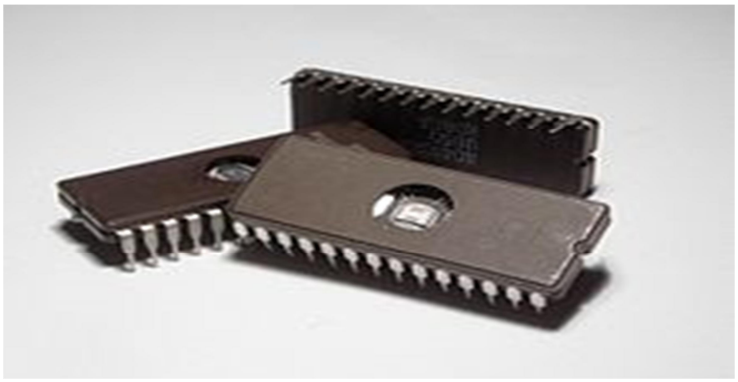
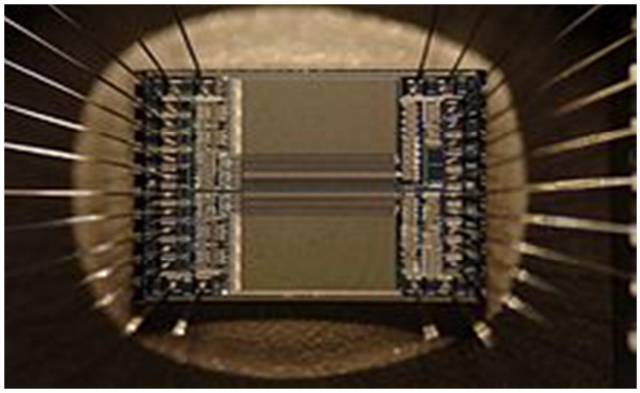
الفصل الخامس

الدوائر المتكاملة[١]

٥-١ مقدمة:



الشكل (٥ -١) الدوائر المتكاملة القابلة للمسح مبرمجة كذاكرة القراءة فقط [٢] هذه الرقاقة لها نافذة شفافة توضح ما فى داخل الإسطمبة. تسمح النافذة للذاكرة للمحو بتعريض الرقاقة للأشعة فوق البنفسجية.

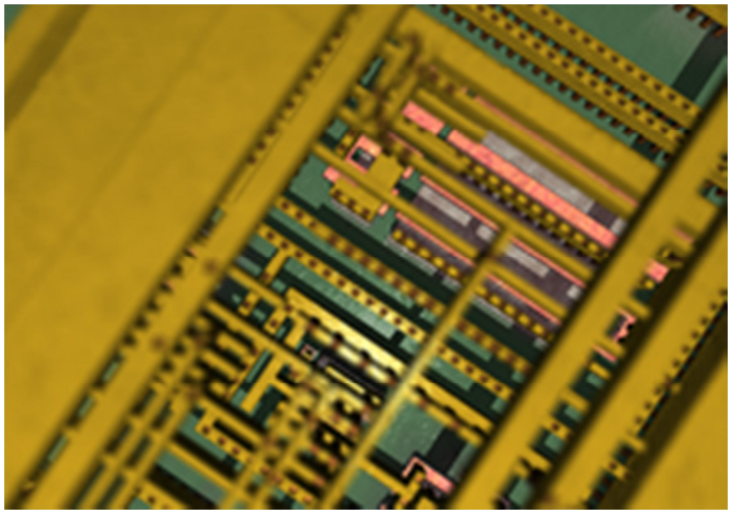


الشكل (٥-٢) الدوائر المتكاملة من رقاقة ذاكرة[] تظهر كتل الذاكرة ودعم الدوائر والأسلاك الفضية الدقيقة التي تربط إسطمبة الدوائر المتكاملة في المخارج للتعبئة والتغليف.

---

[١] (*Silicon Chip*. "*Microchip*") راجع إعادة توجيه "رقائق السليكون" ، "رقاقة ميكرو" لإستخدامات أخرى، بمجلة الإلكترونيات – من ويكيبيديا، الموسوعة الحرة (From Wikipedia, the free encyclopedia)

[٢] (EPROM) دائرة متكاملة برمجة ذاكرة القراءة فقط قابلة للمسح – (EEPROM (pronounced "e-e-prom", "double-e prom", "e-squared", or simply "e-prom") تعنى الذاكرة ال"كهربائيةً القابلة للبرمجة" والقابل للمسح للقراءة فقط



الشكل (٥-٣) التفاصيل التركيبية للدوائر المتكاملة من خلال أربع طبقات مترابطة برباط من النحاس الى أسفل لطبقة البولى سليكون

الدوائر المتكاملة أو الدائرة المتكاملة المتجانسة[٣] والتى يشار لها بلفظ شريحة أو رقاقة عبارة عن دائرة إلكترونية مصغرة بتقنيات ميكروية وهي مجال تخصصى من الهندسة الإلكترونية، وتعتبر ثورة في عالم الإلكترونيات، الدوائر المتكاملة مجموعة من الدوائر الإلكترونية مجهزة على رقاقة واحدة من مواد أشباه الموصلات، عادة من السليكون ويمكن أن تشتمل على الآلاف من المكونات الإلكترونية ، مثل الترانزستورات والمقاومات والمكثفات التي ترتبط معا لتكون دوائر إلكترونية متكاملة. ويمكن إنتاجها بمساحة أصغر بكثير من دائرة منفصلة مكونة من عناصر إلكترونية مستقلة. يمكن تصنيع الدائرة المتكاملة المتجانسة بآلية مضغوطة جداً على رقاقة بحجم الظفر ويمكن أن تشتمل على عدة ملايين من الترانزستورات والمكونات الإلكترونية الأخرى. عرض خطوط التوصيل فى الدائرة يمكن أن يكون أصغر وأصغر مع التقدم التكنولوجي؛ في عام ٢٠٠٨ تناقص عرض خطوط التوصيل

---

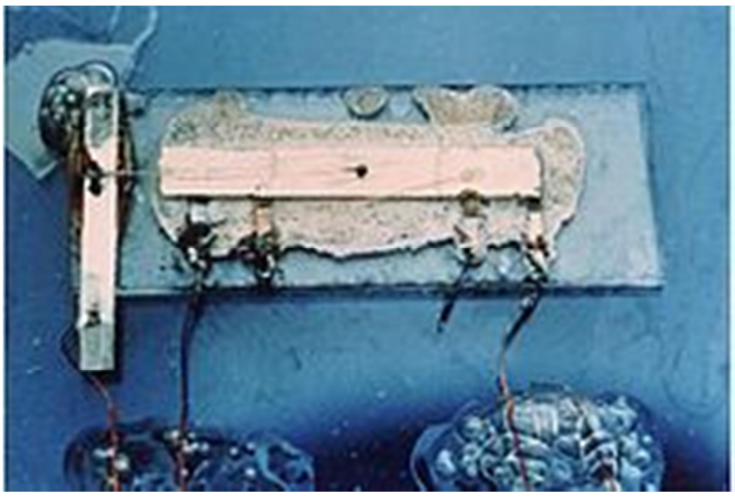
[٣] (The homogeneous IC) أحد الدوائر المتكاملة أو دائرة متكاملة متجانسة يشار أيضا لها (IC) ، شريحة ، أو شريحة ميكروية) عبارة عن مجموعة من الدوائر الإلكترونية على لوحة صغيرة واحدة (شريحة) من مواد أشباه الموصلات غالبا من السيلكون.

إلى أقل من ١٠٠ نانومتر وما زال يتناقص. وقد تبين أن الدوائر المتكاملة المتجانسة تمكنت من أن تؤدي ما تقوم به العناصر الإلكترونية ومع التطورات التقنية في منتصف القرن العشرين تم دمج إعداد كبيرة من الترانزستورات في رقاقة صغيرة وقد كان هذا تطور عظيم فى مجال تجميع الدوائر بإستخدام مكونات إلكترونية منفصلة٠ وقد كان للقدرة على الإنتاج الكثير من الدوائر المتكاملة لموثوقيتها ونهج تصميمها ضمان للإسراع في إستخدام الدوائر المتكاملة الموحدة بدلاً من إستخدام المكونات المنفصلة٠

تشتمل الدوائر المتكاملة المتجانسة على ميزتين بالمقارنة بالدوائر المنفصلة ويتمثلان فى التكلفة والأداء. حيث أن تكلفة الدوائر المتكاملة منخفضة حيث يتم تصنيع الدوائر بجميع مكوناتها، كوحدة واحدة من خلال آلية الطباعة التصويرية بدلاً من تصنيع ترانزستور واحد في وقت واحد. وعلاوة على ذلك، فإن تصنيع وتغليف الدوائر المتكاملة يستخدم مواد أقل بكثير من الدوائر المنفصلة٠ كما أن للدوائر المتكاملة أداء مرتفع حيث أن مكوناتها لها قدرة تبديل سريعة وتستهلك طاقة قليلة (مقارنة بالدوائر المنفصلة) نتيجة لصغر حجمها وتقارب المكونات من بعضها٠ أعلن فى العام ٢٠١٢ التوصل لتصميم وتصنيع شريحة نموذجية تتراوح مساحتها بين بضعة مليمترات مربعة إلى ٤٥٠ مم^{٢} وتشتمل على عناصر يصل عددها إلى ٩ مليون عنصر لكل واحد مم^{٢} ٠ تستخدم اليوم الدوائر المتكاملة في جميع المعدات الإلكترونية وقد أحدثت ثورة في عالم الإلكترونيات مثل أجهزة الكمبيوتر – الهواتف المحمولة وغيرها من الأجهزة المنزلية الرقمية والتى تعتبر الآن جزء أساسى فى حياة المجتمعات الحديثة بسبب تناقص تكلفة الدوائر المتكاملة. يشار الى الدوائر المتكاملة على أنها دائرة تتجمع فيها جميع أو بعض عناصر الدوائر المرتبطة الغير منفصلة ومترابطة كهربائياً حيث أنها غير قابلة للتجزئة٠ يمكن بناء الدوائر التي تستوفي هذا التعريف بإستخدام العديد من التقنيات المختلفة مثل تكنولوجيا الشرائح الرقيقة، وتكنولوجيا الشرائح السميكة، أو التكنولوجيا المهجنة٠ بشكل عام إستخدام الدوائر المتكاملة للإشارة إلى تصنيع دائرة من قطعة واحدة معروفة أصلاً كدائرة متكاملة متجانسة٠

٥ – ٢ التطورات فى الدوائر المتكاملة

التطورات المبكرة للدوائر المتكاملة يعود إلى عام ١٩٤٩، عندما قدم المهندس الألماني "فيرنر جاكوبي" بشركة سيمنز براءة إختراع لدائرة متكاملة تؤدى عمل دائرة تكبير من عناصر منفصلة تتكون من خمسة ترانزستورات شائعة لمكبر للصوت على شريحة واحدة٠ كما كشف عن أداة للسمع صغيرة رخيصة كتطبيق صناعي وقدم الفكرة في ندوة بشأن التقدم المحرز في "جودة المكونات الإلكترونية" في واشنطن في ١٩٥٢. وتتلخص الفكرة فى تكوين مربعات خزفية صغيرة (كشريحة)، كل منها يحتوي على مكون واحد بالغ الصغر. ثم دمج المكونات وتوصيلها كشبكة مدمجة ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد وأدت إلى عمل نموذج صغير ليقدم أخيراً تصميماً ثورياً جديداً هو الدوائر المتكاملة ولكنه لم يدم طويلاً ومع ذلك حقق المشروع زخما جاء مع تصميم جديد وثوري لفكرة الدوائر المتكاملة٠



الشكل (٥ – ٤) الدائرة المتكاملة الأصلية (جاك كيلبى)

فى ضوء الأفكار الأولية المتعلقة بالدوائر المتكاملة في ١٩٥٨، تم تصنيع جهاز جديد يتكون من مجموعة عناصر أشباه الموصلات تتكامل تماما كمكونات الدوائر الإلكترونية٠ وبتطوير الفكرة الخاصة بالدوائر المتكاملة ساعد فى حل العديد من المشاكل العملية التى تم مواجهتها فى التصميم الأول وتم تطوير الدائرة على رقاقة من السليكون وقد

تم التعرض لأسلوب عزل المكونات الناجمة عن تقاطع خطوط التغذية للعناصر كمفهوم رئيسي للدوائر المتكاملة. كانت مؤسسة فيرتشايلد أشباه الموصلات هى الأولى فى تصميم وتصنيع الدوائر المتكاملة على رقاقة السليكون مع مداخل للإنحياز الذاتي، والتى كانت أساس لجميع رقائق دوائر الكمبيوتر (معدن – أكسيد – سليكون المتكاملة الحديثة)[٤] . في عام ١٩٦٨، تم تطوير تكنولوجيا أول شريحة واحدة "وحدة المعالجة المركزية[٥]". في المراحل الأولى للدوائر المتكاملة البسيطة، كانت التكنولوجيا محدودة وتشتمل كل شريحة على عدد قليل من الترانزستورات مع إنخفاض درجة التكامل التى تعنى أن عملية التصميم بسيطة نسبيا. كما أن معدل الإنتاج فى الصناعات التحويلية كان أيضا منخفض جداً بمقاييس اليوم. كلما تقدمت التكنولوجيا، أمكن وضع الملايين ثم المليارات من الترانزستورات على رقاقة واحدة ، تطلب تطور تكنولوجيا الدوائر المتكاملة تخطيط دقيق ، مما أدى إلى أساليب تصميم جديدة.

الجدول (٥ – ١) تصنيف الدوائر المتكاملة

الرمز	معنى المصطلح	السنة	عدد الترانزستور فى الشريحة	عدد بوابات فى الشريحة
SSI	دوائر متكاملة صغيرة	١٩٤٦	من ١ الى ١٠	من ١ الى ١٢
MSI	دوائر متكاملة متوسطة	١٩٦٨	من ١٠ الى ٥٠٠	من ١٣ الى ٩٩
LSI	دوائر متكاملة كبيرة	١٩٧١	من ٥٠٠ الى ٢٠٠٠٠	من ١٠٠ الى ٩٩٩٩
VLSI	دوائر متكاملة كبيرة جدا	١٩٨٠	من ٢٠٠٠ الى ١٠٠٠٠٠٠	من ١٠٠٠٠الى ٩٩٩٩٩
ULSI	دوائر متكاملة الأكبر	١٩٨٤	من ١٠٠٠٠٠٠ وأكثر	من ١٠٠٠٠ وأكثر

[٤] (Complementary Metal– Oxide–Silicon CMOS) الدوائر المتكاملة بتكوين (معدن–أكسيد– سليكون)

[٥] (CPU Intel 4004) "وحدة المعالجة المركزية موديل ٤٠٠٤ من إنتل

- **الدوائر المتكاملة الصغيرة والمتوسطة والكبيرة**

إشتملت الدوائر الرقمية فى المراحل الأولى على عشرات من الترانزستورات وأعداد قليلة من البوابات والمخارج٠ الدوائر المتكاملة الخطية المبكرة إشتملت على أقل من عشرة ترانزستورات٠ إزداد عدد الترانزستورات في الدوائر المتكاملة بشكل كبير منذ ذلك الحين٠ أستخدم مصطلح الدوائر المتكاملة الكبيرة عندما تم وصف المفهوم النظري للمصطلح مما إستدعى تحديد شروط إستخدام مصطلحات تصنيف الدوائر المتكاملة الصغيرة والمتوسطة والكبيرة والدوائر المتكاملة الأكبر٠ الدوائر المتكاملة الصغيرة كانت دافع بالنسبة لمشاريع الفضاء الجوي المبكر، التى ساعدت على تطوير تكنولوجيا الدوائر المتكاملة٠ إحتاجت الصواريخ المعروفة بإسم صواريخ مينيوتمان وبرنامج أبولو الى الحواسيب الرقمية لأنظمة توجيه القصور الذاتي خفيفة الوزن٠ وحاسبات التوجيه فى مشروع أبولو قادت ودفعت الى تطور تكنولوجيا الدوائر المتكاملة أكثر بينما ساهم الصاروخ مينيوتمان على إنتاج الدوائر المتكاملة بشكل كمى٠ برنامج الصواريخ مينيوتمان ومختلف البرامج البحرية الأخرى تمثل فى إجمالي سوق الدوائر المتكاملة مبلغ ٤ مليون دولار في عام ١٩٦٢، وفى عام ١٩٦٨ ساهمت وكالة الفضاء الأمريكية بإجمالي مبلغ ٣١٢ مليون والذى يمثل ٣٧ في المائة من الإنفاق الدفاعي٠ كما ساهمت متطلبات حكومة الولايات المتحدة" للدوائر المتكاملة فى السوق الوليدة حتى إنخفضت تكاليف إنتاجها بما يكفي للسماح للشركات الصناعية بإختراق السوق الصناعي والأسواق الإستهلاكية للدوائر المتكاملة٠ إنخفض متوسط السعر للدائرة المتكاملة من ٥٠ دولار في عام ١٩٦٢ إلى ٣٣و٢ دولار في عام ١٩٦٨. وبدأت تظهر الدوائر المتكاملة في المنتجات الإستهلاكية بنهاية العقد٠ ومن التطبيقات النموذجية التى ساهمت فى تسريع التطور تصنيع معالج الصوت في أجهزة الإستقبال التلفزيوني٠ وقد كانت أول شريحة بتكنولوجيا (معدن – أكسيد – سليكون) عبارة عن شريحة لدائرة متكاملة صغيرة لمشروع ناسا للأقمار الصناعية٠ الخطوة التى تلت في تطوير الدوائر المتكاملة، في أواخر الستينات ظهورت دوائر تتضمن مئات الترانزستورات في كل رقاقة، ومنها نشأ مسمى الدوائر

المتكاملة المتوسطة٠ في عام ١٩٦٤ تم الأعلان[٦] عن رقاقة واحدة لمسجل تحويل ١٦ بت يشتمل على ١٢٠ ترانزستور٠ وكانت الدوائر المتكاملة المتوسطة جذابة إقتصاديا حيث أنها تكلف أكثر قليلاً من إنتاج الدوائر المتكاملة الصغيرة مما ساهم فى إستنباط أنظمة أكثر تعقيداً لإنتاج شرائح أصغر بجهد تجميعى أقل (بسبب وجود عدد أقل من المكونات المنفصلة)، وعدد من المزايا الأخرى. وبمواصلة التطور مدفوعا بنفس العوامل الاقتصادية، أدى إلى ظهور الدوائر المتكاملة الكبيرة "الواسعة النطاق " في منتصف السبعينات، والتى إشتملت على عشرات الآلاف من الترانزستورات فى الشريحة الواحدة٠ كانت الدوائر المتكاملة الصغيرة والمتوسطة تصنع بتكنولوجيا الأقنعة التي تم إستنباطها يدويا والتحقق من إكتمال كل قناع٠ حتى ظهرت الدوائر المتكاملة الكبيرة التى إشتملت على العديد من الترانزستورات، والوصلات الداخلية والميزات الأخرى مما جعل من المستحيل التحقق من إكتمال الأقنعة بشكل دقيق أو حتى القيام بالتصميم الأصلي كما فى السابق٠ وأصبح يعتمد على برامج الكمبيوتر والأجهزة المساعدة الأخرى للقيام بمعظم هذه الأعمال٠ الدوائر المتكاملة مثل ذاكرة ١ كيلو بت ورقائق الآلات الحاسبة والمعالجات الدقيقة بدأت تصنع بكميات معتدلة في أوائل السبعينات، كانت تشتمل الرقاقة على أقل من ٤٠٠٠ ترانزستور٠ بدأ إنتاج الدوائر المتكاملة الكبيرة التى تشتمل على ١٠,٠٠٠ من الترانزستورات حوالي عام ١٩٧٤ للدوائر الخاصة بذاكرات الكمبيوتر الرئيسي والمعالجات من الجيل الثاني.

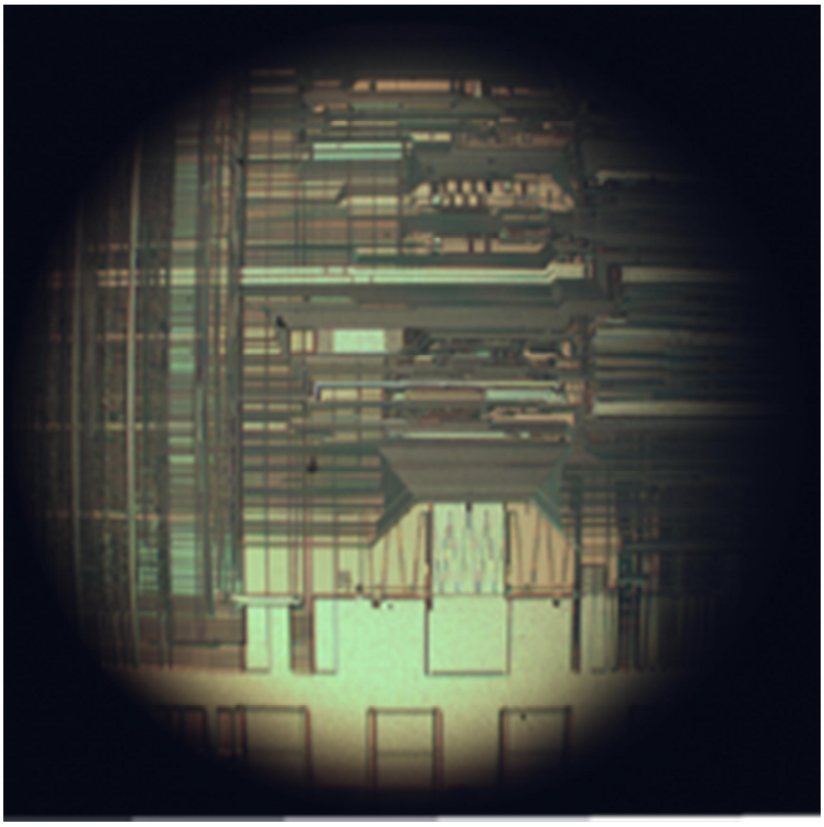
- الدوائر المتكاملة الكبيرة جدا:

الخطوة الأخيرة في عملية تطوير سعات الدوائر المتكاملة كانت إبتداء من الثمانينات، وتتواصل حتى الوقت الحاضر، بدأ تطور الدوائر المتكاملة التى تشتمل على مئات الآلاف من الترانزستورات في أوائل الثمانينات٠ تطلب ذلك تطورات متعددة لتحقيق زيادة الكثافة مما

---

[٦] أعلن (Frank Wanlass) فى عام ١٩٦٤ عن تطوير رقاقة واحدة لمسجل تحويل ١٦ بت يتكون من ١٢٠ ترانزستور على شريحة واحدة ، مع عدم التصديق فى ها الوقت

دفع الشركات المصنعة الى إستنباط قواعد تصميم أصغر وإمكانيات تصنيع جديدة، لإنتاج رقائق تشتمل على ترانزستورات أكثر مع الحفاظ على عائد كاف.



الشكل (٥ – ٥) الطبقات العليا للتوصيلات على إسطمبة معالج إنتل

تم تلخيص مسار عمليات التطوير والتحسينات فى "خارطة الطريق التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات"والمشار إليها بالرمز (أى ت ر س)[٧] – تطورت أدوات التصميم ما يكفي لإنهاء التصاميم في فترة زمنية معقولة. وتم استبدال تكنولوجيا (م – أ – س المتكاملة)[٤] بتكنولوجيا أكثر كفاءة مثل (م–أ– س المتكاملة بقناة موصلية ن) وأيضا (بقناة موصلية ب)

---

[٧] (أى ت ر س) "خارطة الطريق التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات"والمشار إليها بالرمز (ITRS) International Technology Roadmap for Semiconductors

ولتجنب حدوث زيادة باهظة في إستهلاك الطاقة أنتجت في عام ١٩٨٦ رقائق ذاكرة تحتوي على أكثر من مليون ترانزستور ورقائق المعالجات الدقيقة إشتملت على أكثر من مليون ترانزستور في عام ١٩٨٩ وأكثر من مليار ترانزستور في عام ٢٠٠٥ – وإستمر هذا الإتجاه بلا هوادة إلى حد كبير، مع رقائق أدخلت في عام ٢٠٠٧ إشتملت على ذاكرات بعشرات المليارات من الترانزستورات ٠

أستخدم مصطلح الدوائر المتكاملة الأكبر للرقائق التى تشتمل على أكثر من مليون ترانزستور٠ كما أستخدم المصطلح الدوائر المتكاملة الكبيرة جداً " واسعة النطاق والمشار لها (دبليو إس أى)[٨] والتى تستخدم رقاقة سيليكون داخلية لإنتاج "رقاقة فائقة" من خلال مزيج من الحجم الكبير وتخفيض متطلبات التغليف والتى أدت الى تخفيض التكاليف لبعض نظم الدوائر المتكاملة الكبيرة جداً " واسعة النطاق ولا سيما فى مجال الحواسيب الفائقة الموازية على نطاق واسع٠ كما أستخدم المصطلح (منظومة على رقاقة) وهى عبارة عن دائرة متكاملة تشتمل على كل المكونات المطلوبة لحاسب أو منظومات أخرى على شريحة واحدة٠ تصميم مثل هذه الرقاقة معقد وبتكلفة ليست بقليلة٠ قد يتسبب بناء مكونات متباينة على رقاقة واحدة من السليكون الى قصور فعالية بعض العناصر ولكن يقابل هذا القصور إنخفاض تكاليف التصنيع والتجميع والذى يتطلب ميزانية منخفضة إلى حد كبير ولأنه يتم الإحتفاظ بالإشارات بين المكونات على إسطمبة، مما يساهم فى تناقص كبير فى الطاقة المطلوبة٠ يطلق على المصطلح الدوائر المتكاملة ثلاثية الأبعاد[٩] وهى عبارة عن دائرة متكاملة تتكون من طبقتين أو أكثر مشتملة على مكونات إلكترونية نشطة تتكامل أفقيا

---

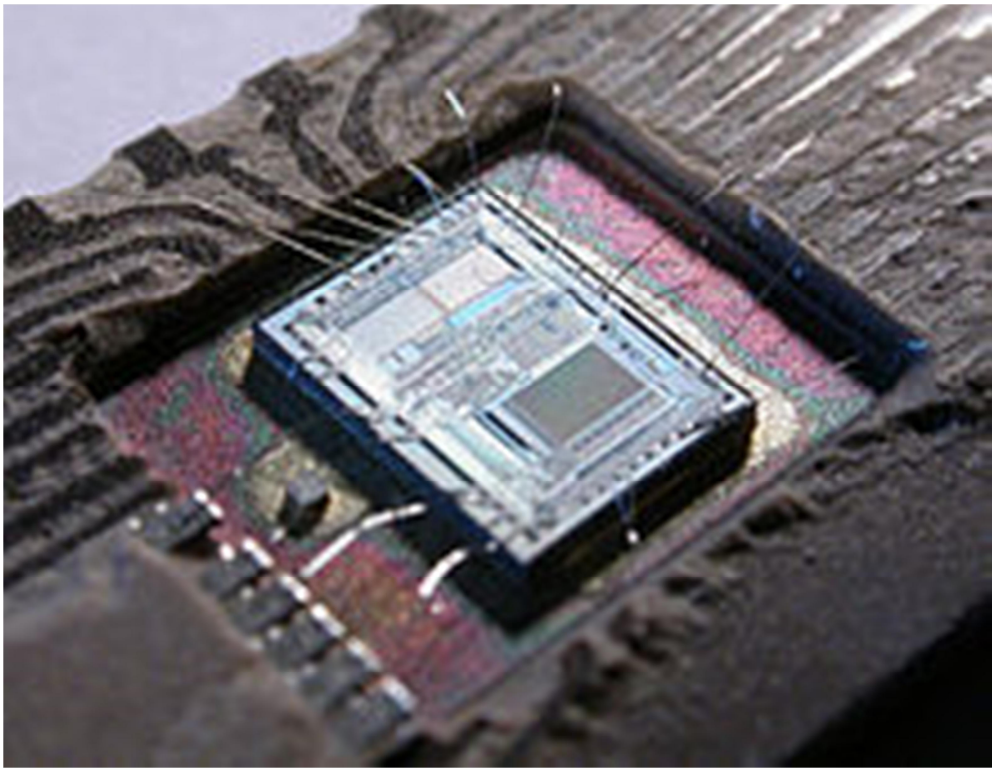
[٨] (دبليو إس أى) الدوائر "المتكاملة الكبيرة السوبر" الواسعة الإنتشار والنظم على شريحة **Wide Super Large Integrated circuits** المشار لها **(WSI)**

[٩] الدوائر المتكاملة ثلاثية الأبعاد **(3D-IC)** تتكون من طبقتين أو أكثر من المكونات الإلكترونية النشطة التى تتكامل عمودياً وأفقيا في دائرة واحدة. تستخدم الاتصالات بين الطبقات إشارات على إسطمبة، واستهلاك الطاقة أقل بكثير مما هو مطلوب في دوائر منفصلة مكافئة٠

ورأسيا فى دائرة واحدة وتستخدم إشارات على إسطمبة للتوصيلات بين الطبقات وبالتالى فإن إستهلاك الطاقة أقل بكثير مما في الدوائر المنفصلة ٠ الإستخدام الأمثل للأسلاك العمودية القصيرة يمكن أن يقلل إلى حد كبير طول الأسلاك الكلي مما يجعل تشغيل العمليات أسرع٠ من الدوائر المتكاملة الأكثر تقدما هي المعالجات ذات الأعمدة ، والتي تتحكم في كل شيء من أجهزة الكمبيوتر والهواتف الخلوية حتى أفران الميكروويف الرقمية وكذلك رقائق الذاكرة الرقمية والدوائر المتكاملة للتطبيقات الخاصة هى أمثلة من الدوائر المتكاملة المهمة لمجتمع المعلومات الحديث٠ في حين أن تكلفة تصميم وتطوير الدوائر المتكاملة المعقدة للتطبيقات الخاصة مرتفع جداً، إلا أن التكلفة تتناقص مع زيادة الإنتاج بملايين الوحدات٠ أداء هذه الدوائر المتكاملة مرتفع نظراً لصغر حجمها الذى يسمح بأسلاك توصيل قصيرة التى تسمح بدورها الى تقليل الطاقة وتسريع عمليات التحويل ٠ يعتبر إستمرار تطوير الدوائر المتكاملة والوصول الى أحجام أصغر ميزة على مر السنوات، مما يتيح المزيد من الدوائر التى يمكن أن تشتملها كل رقاقة – كما تعتبر الزيادة فى السعة المتزايدة في وحدة المساحة بمثابة تقليل التكلفة وزيادة الأداء الوظيفي – والمتوقع تضاعف عدد الترانزستورات في الدوائر المتكاملة كل سنتين٠ بشكل عام، كما تقلص حجم الشريحة، فإن كل شيء تقريبا يتجه الى الأفضل وتنخفض تكلفة الوحدة كما ينخفض إستهلاك الطاقة وتتزايد السرعة٠ ومع ذلك فإن الدوائر المتكاملة يتكنولوجيا العناصر النانومترية لا تخلو من مشاكل، وأهمها تسرب التيار إلا أن الإبتكارات في مجال العوازل ذات معامل عزل عالي تهدف إلى حل هذه المشاكل٠ وحيث أن المكاسب المحققه من تزايد السرعات وتخفيض إستهلاك الطاقة ظاهرة واضحة للمستخدم النهائي، فهناك منافسة شرسة بين الشركات المصنعة لإستخدام الهندسيات الأكثر دقة ٠

يتم وصف هذه العملية والتقدم المتوقع على مدى السنوات القليلة المقبلة، من خلال "خارطة الطريق للتكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات"٠ في مشاريع البحوث الحالية، يحتل تطوير الدوائر المتكاملة للتطبيقات الخاصة مثل عناصر إستشعار أو مجسات فى التطبيقات الطبية مما ساهم فى إرتفاع سقف الإستراتيجيات لمشاريع الجينات الحيوية في البيئات

الأحيائية لتفادي التآكل أو التحلل البيولوجي لمواد أشباه الموصلات ، تعتبر مادة نتريد التيتانيوم أحد المواد القليلة المستخدمة فى هذه التطبيقات الخاصة والتى أوضحت بشكل إستثنائي الإستقرار للمواد وكذلك فهى مناسبة للتطبيقات فى تصنيع الأقطاب الكهربائية في الزراعات الطبية.



الشكل (٥ – ٦) إسطمبة من إنتل رقم ٨٧٤٢ ، متحكم دقيق ٨–بت يحتوي على وحدة المعالجة مركزية تعمل عند ١٢ ميجا هرتز، ١٢٨ بايت ذاكرة الوصول العشوائي، ٢٠٤٨ بايت ، والإدخال/الإخراج في نفس الشريحة

يمكن تصنيف الدوائر المتكاملة بطرق عديدة، سواء عن طريق الوظيفة، أو الشركة المصنعة ، أو السرعة ، أو نوع معين من دوائر المنطق التي تستخدم ، لكن التصنيف الأهم هو عدد العناصر المستخدمة (البوابات) التي تحتويها الشريحة . وهنالك تصنيف آخر يقسم الدوائر المتكاملة حسب نوع التغذية الذي تقبله في مدخلها، إذ تنقسم إلى:

١. الدوائر المتكاملة الخطية: وهي الدوائر التي تقبل في مدخلها تغذية متغيرة بشكل مستمر.
٢. الدوائر المتكاملة الرقمية: وهي الدوائر التي تقبل في مدخلها تغذية محددة صفر فولت أو ٥ فولت مثلاً، أي رقمين منطقيين صفر – واحد وتعطي هذه الدائرة في مخرجها قيماً محددة أيضاً صفر أو ٥ فولت أو القريب منها. ويمكن تصنيف الدوائر المتكاملة إلى دوائر تناظرية ورقمية ومختلطة (التناظرية والرقمية على رقاقة واحدة) – يمكن أن تحتوي الدوائر المتكاملة الرقمية[١٠] على الملايين من بوابات المنطق، والمتأرجحات ، والمجمعات ، والدوائر الأخرى في بضعة مليمترات مربعة.

الشكل (٥ – ٧) دائرة متكاملة (م – أ – س المتكاملة) رقم ٤٥١١ فى حزمة خطوط مزدوجة

يسمح الحجم الصغير لهذه الدوائر بالسرعات العالية ، وإستهلاك الطاقة المنخفضة، وتخفيض تكلفة التصنيع بالمقارنة بالنطاق الواسع للدوائر المتكاملة. الدوائر المتكاملة الرقمية ومنها المعالجات ولوحات التحكم الميكروى ، تعمل على إستخدام الرياضيات الثنائية

---

[١٠] تصنف الدوائر المتكاملة الرقمية مثل
logic ICs, memory chips, interface ICs (level shifters, serializer / deserializer, etc., Power Management ICs, and programmable devices

لمعالجة الإشارات "واحد" و "صفر"٠ الدوائر المتكاملة التناظرية، مثل أجهزة الإستشعار، ودوائر إدارة الطاقة والمضخمات التشغيلية التى تعمل بتجهيز الإشارات المستمرة والتى تؤدي مهام محددة مثل التضخيم ، والإستخلاص النشط والتصفية وخلط الاشارات٠ ساهمت الدوائر المتكاملة التناظرية فى تخفيف العبء على مصممي الدوائر أصحاب الخبرة فى تصميم الدوائر التناظرية المتاحة بدلاً من تصميم دوائر تناظرية صعبة من البداية٠ يمكن أيضا دمج الدوائر التماثلية والرقمية[١١] على شريحة واحدة لإنشاء وظائف مثل محولات الإشارات التماثلية الى إشارات رقمية والعكس٠ هذه الدوائر المختلطة للإشارات أصغر حجماً وأقل تكلفة، ولكن يجب مراعاة التداخل في الإشارات بعناية ٠ كذلك مجموعة كبيرة من الدوائر المتكاملة المتاحة دون تصنيف تتوافر لدى موزعي المكونات الإلكترونية الحديثة٠

- كذلك يتم تصنيف الدوائر المتكاملة الرقمية بتصنيف فرعي مثل الدوائر المتكاملة التماثلية، رقائق الذاكرة ، والدوائر المتكاملة ذات الوجهين (كدوائر مستوى الإنحراف، وعناصر (سير ديز) المعوضات[١٢] ، إلخ) والدوائر المتكاملة لإدارة محطات القوى الكهربائية والأجهزة القابلة للبرمجة٠
- تصنف الدوائر المتكاملة التناظرية الفرعية الى دوائر متكاملة خطية والدوائر المتكاملة للترددات اللاسلكية ٠
- كذلك تم تصنف فرعي للدوائر المتكاملة مختلطة الإشارة مثل دوائر متكاملة لحفظ البيانات (بما في ذلك المحولات التماثلية الى الرقمية والعكس، والمقاومات الرقمية) والدوائر المتكاملة لتحديد التوقيت٠

---

[١١] الدوائر المتكاملة يمكنها الجمع بين الدوائر التماثلية والرقمية على شريحة واحدة لأداء وظائف مثل المحولات التماثلية الى رقمية (A/D) والمحولات الرقمية الى تماثلية (D/A) تقدم هذه الدوائر المختلطة حجم أصغر وأقل تكلفة، ولكن يجب مراعاة التداخل في الإشارات بعناية.

[١٢] التسلسل وإلغاء التسلسل والمشار لها ((Serializer/Deserializer (SerDes pronounced sir-deez) وهى زوج من نظم التشغيل التي يشيع استخدامها في الاتصالات عالية السرعة للتعويض عن قلة المدخلات والمخرجات

٥ – ٣ التصنيع:

تعتمد فكرة صناعة الدائرة المتكاملة على خطوات متوالية: .

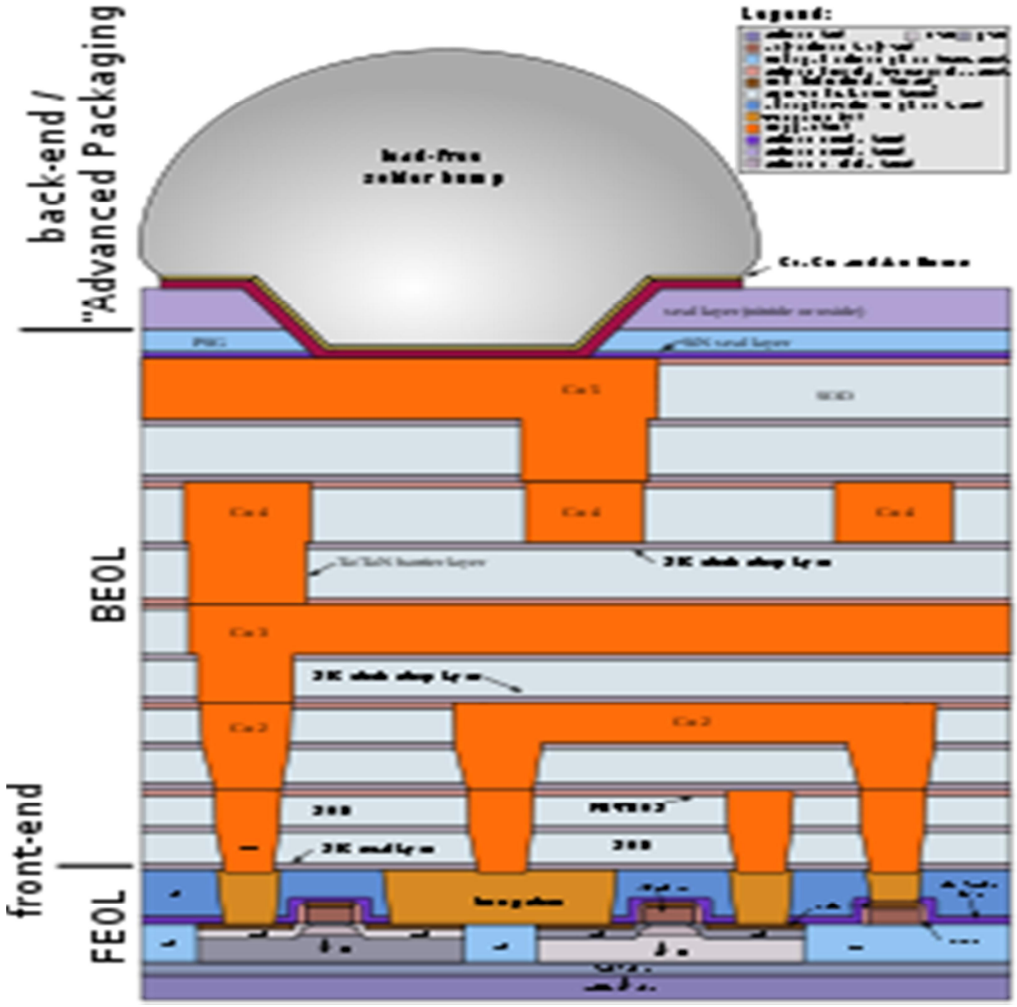
- **تكوين سبيكة سيلكون إسطوانية مصمتة من النوع (ب)**
- **تقطيع الإسطوانة إلى أقراص**
- **ترسيب طبقة رفيعة من النوع (ن)**
- **حقن مادة شوائب من النوع (ب) لصنع قاعدة الترانزستور والمقاومات**
- **ترسيب طبقة من مادة حساسة للضوء**
- **تعريض المناطق المراد حقنها للضوء**
- **حقن مادة شوائب من النوع (ب)**
- **تكرار نفس الخطوات ولكن بمادة شوائب من النوع (ن) لصنع باعث الترانزستور**
- **تكرار نفس الخطوات للحقن بمادة شوائب من النوع ($ب^{++}$) للعزل بين الترانزستورات**
- **ترسيب طبقة أوكسيد للعزل**
- **ثقب طبقة الأوكسيد في أماكن التوصيل وصب الألمونيوم بها كأبر توصيل.**

إعتبرت أشباه موصلات فى الجدول الدوري للعناصر الكيميائية بالمواد الأكثر إحتمالاً لتصنيع صمام مفرغ فى الحالة الصلبة. جرت دراسة المواد بشكل منهجي في الأربعينات والخمسينات بدءاً من أكسيد النحاس ، الى الجرمانيوم ، ثم السليكون ، واليوم ، يعتبر السيليكون أحادى البلورة الركيزة الرئيسية المستخدمة فى الدوائر المتكاملة على الرغم من إستخدام بعض مركبات العمود الثالث والخامس من الجدول الدوري مثل أرسنيد الجاليوم لتطبيقات متخصصة مثل المصابيح المشعة للضوء والليزر والخلايا الشمسية والدوائر المتكاملة الأعلى سرعة. إستغرق ذلك عقود من الزمان لإتقان أساليب تصنيع بلورات خالية من العيوب في البنية البلورية لمواد أشباة الموصلات. تم تصنيع الدوائر المتكاملة من مواد أشباه الموصلات كطبقة تشتمل ثلاث عمليات تصنيعية رئيسية هى التصوير، والترسيب، والنقش أو الحفر لإزالة طبقات غير مرغوب فيها وتستكمل الخطوات العملية الرئيسية

بعمليات بث الشوائب مع مراعاة ضرورة أن تكون صالات الإنتاج نظيفة. تستخدم رقائق السليكون أحادية البلورات كركيزة أساسية كما تستخدم شرائح السيلكون على شرائح ياقوت أو رقائق من أرسنيد الجاليوم للتطبيقات الخاصة. يتم إستخدام الطباعة التصويرية لوضع علامات على المساحات المختلفة من الركيزة الأساسية لحقن الشوائب وترسيب عوازل من السليكون المتعدد البورات أو المسارات المعدنية (عادة من الألومنيوم).

يوضح الشكل (٥-٨) شكل التكوينات لدائرة متكاملة على النحو التالى:

- تتألف الدوائر المتكاملة من طبقات متداخلة كثيرة، تحددها الطباعة التصويرية، وعادة ما تظهر بألوان مختلفة. تحدد الطبقات لحقن الشوائب المختلفة فى شريحة الركيزة (تسمى طبقات الإنتشار)، تحدد بعض المناطق التى تحتاج أيونات إضافية لغرسها ويشار لها (زرع الطبقات)، والبعض الآخر لتحديد تعريف الموصلات (شرائط سليكون أو معدنية)، وبعضها لتحديد الوصلات بين الطبقات الموصلة كهربائيا بين الطبقات (خلال أو إتصال الطبقات). تم تكوين كل المكونات من مجموعة محددة فى أحد هذه الطبقات.
- تحديد مواضع الإنحياز الذاتي فى إنتاج عناصر (م – أ – س المتكاملة) ، تتكون طبقة البوابة للترانزستور (من سليكون أو معدن) مخترقا طبقة الإنتشار.
- تكوين السعات على شكل مشابه للوحات موصلة على التوازى كمكثف تقليدى ويتم تشكيلها وفقا لمساحات اللوحات، مع مواد عزل بين اللوحات . تتواجد المكثفات بقيم مختلفة وأحجام شائعة في الدوائر المتكاملة.
- تستخدم التعرجات ذات أطوال مختلفة أحياناً لتشكيل المقاومات على الشريحة، على الرغم من أن معظم الدوائر المتكاملة التماثلية لا تحتاج أي مقاومات. تحدد قيمة المقاومة بنسبة الطول الى العرض لهيكل المقاومة وذلك من خلال منحنى المقاومة النوعية.
- نادراً، ما يمكن تكوين هياكل لملف كلفائف فى شريحة صغيرة، أو عمل محاكاة للملف.



الشكل (٥ – ٨) يوضح الشكل التكوين لشريحة (م – أ – س المتكاملة) تم إنتاجها عام ٢٠٠٠ – ويبين الرسم ترانزستور على ركيزة من (سيلكون– أكسيد – عازل) مع خمس طبقات معدنية وطلمبة لحام لربط رقاقة الوجه٠ والتى توضح أيضا جزء من خط البداية للنهاية وخط النهاية الخلفى والجزء الأول من العملية الخلفية٠

منذ أستخدمت ترانزستورات (المعدن – أكسيد – سليكون المتكاملة) لتوجيه التيار فى المناطق الإنتقالية بين مراحل الدائرة مما أدى الى إستهلاك قيم تيار أقل بكثير من الترانزستور ثنائية القطبية٠ ذاكرات التوصيل العشوائية هو النوع الأكثر إنتشارا فى الدوائر المتكاملة؛ ومن العناصر الأعلى كثافة هى الذاكرات ؛ والمعالجات٠ على الرغم من أن هياكل هذه الدوائر معقدة إلا أنها تبقى الطبقات الأرق بكثير بالمقارنة بعرض العناصر٠ يتم تصنيع

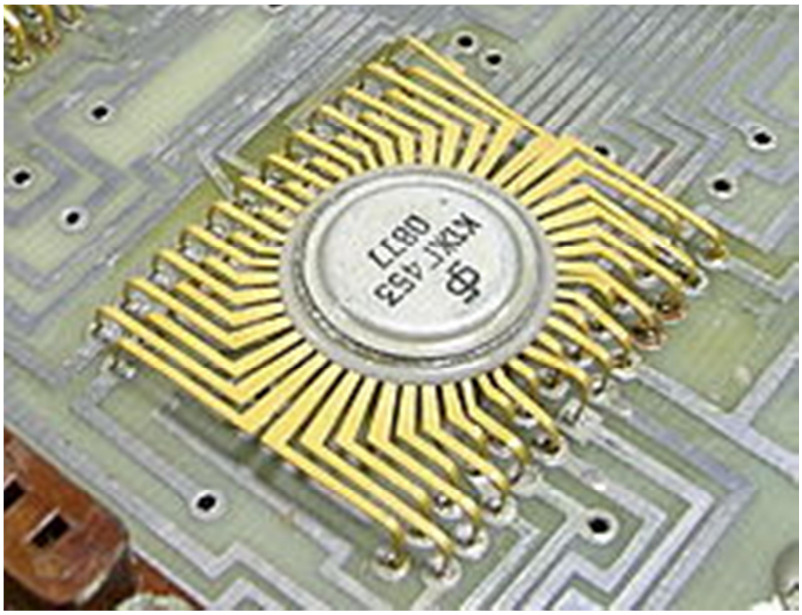
طبقات المواد مشابهه لعملية التصوير الفوتوغرافي على الرغم من أنه لا يمكن إستخدام موجات الضوء في الطيف المرئي لإظهار طبقة مادة ما ، كما أنها ستكون كبيرة جداً بالنسبة للشكل٠ وهكذا تستخدم الفوتونات للترددات العالية (فوق البنفسجية عادة) لإنشاء الأنماط لكل طبقة لكون كل منها صغيرة جداً، تعتبر الميكرسكوبات الإلكترونية أداة أساسية لهندسة عملية الإنتاج وتصحيح الأخطاء فى عملية التصنيع٠ يتم إختبار كل دائرة قبل التغليف الآلي بإستخدام معدات الإختبار في عملية تعرف بإسم إختبار الرقائق ، أو التدقيق لجودة الرقائق٠ ثم يتم تقطيع الشريحة الى كتل مستطيلة الشكل، ويسمى كل منها إسطمبة٠ يتم توصيل كل الإسطمبات الجيدة داخل حزمة بإستخدام أسلاك توصيل من الألمنيوم (أو الذهب) من خلال اللحام الحرارى على وسادات ، وعادة ما تكون موجودة حول حافة الإسطمبات٠أستخدم اللحام الحرارى بتوفير وسيلة موثوق بها لتشكيل هذه التوصيلات الكهربائية لخارج الدائرة٠ بعد التغليف، يتم الإختبار النهائي على نفس الإسطمبات المستخدمة أثناء التدقيق أو المتشابهة٠ يمكن أيضا إستخدام ماسح ضوئى٠ تكلفة الإختبار يمكن أن تمثل ما يزيد على ٢٥ في المائة من تكلفة تصنيع منتجات منخفضة التكلفة ولكن يمكن إهمال هذه الخطوة فى إنتاج العناصر منخفضة العائد٠ فى العام ٢٠٠٥ ظهرت منشأة لتصنيع الدوائر المتكاملة بتكلفة أكثر من مليار دولار٠ إرتفاع تكلفة منشأة لتصنيع الدوائر المتكاملة ترتفع مع الزمن لأن الكثير من هذه العملية أصبح آلى٠ اليوم، تستخدم العمليات الأكثر تقدما التقنيات التالية:

- الرقائق تصل إلى ٣٠٠ مم في القطر
- إستخدام شرائح بمساحة ٣٢ نانومتر أو أصغر فى عملية التصنيع ٠
- وصلات من النحاس للتوصيل بدلا من وصلات الألومنيوم فى الوصلات الداخلية٠
- عوازل من مواد عازلة منخفضة عامل العزل٠
- ترسيب طبقة من السيلكون على العازل

- **إستخدام مادة السليكون المتوترة في العمليات المستخدمة من قبل شركة أي بي أم والمعروفة بتوتر السيليكون مباشرة على عازل[١٣]**
- **دوائر تشتمل على بوابات متعددة مثل ترانزستور ثلاثي البوابات ويجري تصنيعها فى مؤسسة إنتل من العام ٢٠١١ في عمليات إنتاجية بمساحات ٢٢ نانو متر.**

- **التغليف :**

الدوائر المتكاملة فى السابق كان يتم تعبئتها في حزم مسطحة من السيراميك، التي ظلت تستخدم لموثوقيتها وحجمهاالصغير لسنوات عديدة. ثم تحول تغليف الدوائر التجارية بسرعة للحزم في خط مزدوج[١٤] من السيراميك ولاحقا من البلاستيك.



الشكل (٥ – ٩) شريحة (م – س – ع لترانزستور م – أ – س بقناة ن) من الإتحاد السوفياتي" صنعت في عام ١٩٧٧، كجزءا من آلة حاسبة يتكون من أربعة رقاقات مصممة في ١٩٧٠

---

[١٣] السليكون المتوتر في عملية المستخدمة من قبل شركة أي بي أم والمعروفة بتوتر السيليكون مباشرة على عازل (**strained silicon directly on insulator**) والمشار لها – سيلكون متوتر مباشرة على عازل (س م م ع ع– **SSDOI**)

[١٤] تغليف الدوائر التجارية تحركت بسرعة للحزمة في خط مزدوج (**dual in-line package**) **(DIP)**

في عام ١٩٨٠ تم دمج أطراف متعددة للدوائر المتكاملة الكبيرة جدا تجاوزت الحد العملي للحزم في خط مزدوج للتعبئة ، مما أدى إلى ظهور ما يشار إليه بشبكة إبر مصفوفة ورقائق حزم النقل[١٥] . ظهر تغليف السطوح في أوائل الثمانينات، وأصبح منتشرا في أواخر الثمانينات، بإستخدام وصلات أدق على شكل جناحين ، على نحو ما يجسده مخطط الدوائر المتكاملة كما فى الشكل (٥ – ٩) . في أواخر التسعينات، أصبحت الحزمة البلاستيكية المسطحة الرباعية الرقيقة والصغيرة[١٦] الأكثر شيوعاً على الرغم من إستخدام حزم الشبكة التى لا تزال تستخدم في كثير من الأحيان للمعالجات. حزم كرة الشبكة كانت موجودة منذ السبعينات – فى التسعينات ظهرت حزم مصفوفة شبكة الكرة[١٧] وهى رقاقة الوجه، التي تسمح بعدد من المخارج أكثر من الأنواع الأخرى في الحزمة الواحدة ، فى مصفوفة شبكة الكرة تم تركيب إسطمبة محملة بالمقلوب (منعكسة) ومتصلة بين كرات الحزمة عبر شريحة الركيزة المشابهة للوحة الدوائر المطبوعة بدلاً من الأسلاك. تسمح مصفوفة شبكة الكرة لمجموعة إشارات المدخلات والمخرجات (تسمى منطقة الدخل والخرج) أن تكون موزعة على كامل الإسطمبة بدلاً من أن يقتصر موضعها على هامش الرقاقة عندما يتم الجمع بين إسطمبات متعددة على طبقة سفلية صغيرة من السيراميك في كثير من الأحيان، والتى يشار لها بنموذج متعدد الرقائق[١٨].

- **رقاقة تعريف بيانات وتشتمل معظم الدوائر المتكاملة الكبيرة على بطاقة تحديد المعلومات وتتكون من أربعة أجزاء مشتركة : إسم الشركة المصنعة أو الشعار ورقم الدائرة،**

---

[١٥] فى عام ١٩٨٠ تجاوز عدد الحزم الحد العملى للخط المزدوج (DIP) للتغليف الذى أدى الى شبكة إبر مصفوفة (pin grid array(PGA)) وأدى الى عدم وجود حاملات شرائح (leadless chip carrier(LCC)) للتغليف

[١٦] الحزمة البلاستيكية المسطحة الرباعية الرقيقة (plastic quad flat pack (PQFP) and thin small-outline package (TSOP) packages)

[١٧] وقد وجدت منذ السبعينات حزم شبكة مصفوفة بالكرة Ball grid array(BGA) مثل رقاقة الوجه Flip-chip CBGA package packagesBall Grid Array

[١٨] نموذج متعدد الرقائق (Multi-Chip Module) والمشار له (MCM)

ورقم دفعة إنتاج الجزء والرقم التسلسلي وكود مكون من أربعة أرقام يحدد زمن تصنيع الرقائق٠ وكثيراً ما تحمل أجزاء صغيرة للغاية على سطح الشريحة لعدد االمنتجين في جدول البحث عن خصائص الرقائق ٠عادة يتم تحديد تاريخ التصنيع كرقمين يحددان سنة الصنع متبوعاً برقمين آخرين تحدد رمز أسبوع الإنتاج ، على سبيل المثال شريحة تحمل رمز ٨٣٤١ تم تصنيعها في الأسبوع ٤١ لعام ١٩٨٣ ٠

- **الملكية الفكرية:**

النسخ بتصوير كل طبقة من الدوائر المتكاملة وإعداد قناع لإنتاجها على أساس الصور الفوتوغرافية التي تم الحصول عليها هي السبب الرئيسي لوضع تشريع لحماية تصاميم الدائرة٠ تم إستنباط نوع جديد من حماية الملكية الفكرية إمتدادا لقانون حماية شرائح أشباه الموصلات (ق ح ش ش م)[١٩] والصادر فى ١٩٨٤ لحماية الأقنعة المتداولة من رقائق أشباه الموصلات٠ وتم إعتماد معاهدة بإسم "الملكية الفكرية والمشار لها (م م ف د م)"[٢٠] فيما يختص بالدوائر المتكاملة ٠

- **تطورات أخرى:**

في الثمانينات، تطورت العناصر التماثلية القابلة للبرمجة التى تحتوي على الدوائر المنطقية ودوائر الربط التي يمكن برمجتها من المستخدم، بدلاً من أن يتم تثبيت برمجتها بواسطة الشركة المصنعة للدوائر المتكاملة٠ وهذا يسمح ببرمجة الشريحة الواحدة لتنفيذ مهام من نوع مختلف مثل بوابات المنطق والمجمعات والمسجلات٠ يمكن للعناصر الحالية المسماة صفائف البوابة القابلة للبرمجة[٢١] تنفيذ عشرات آلاف من دوائر المنطق والتشغيل بالتوازي حتى إلى ١.٥ جيجاهرتز٠

---

[١٩] (ق ح ش ش م) قانون حماية شرائح أشباه الموصلات **Semiconductor Chip Protection Act** والمشار له **(SCPA)**

[٢٠](م م ف د م) فى عام ١٩٨٩ تم إعتماد معاهدة بشأن "الملكية الفكرية" فيما يختص بالدوائر المتكاملة ويشار لها **(IPIC Treaty).**

[٢١] (**field-programmable gate arrays**) تسمح ببرمجة شريحة واحدة لأداء وظائف مختلفة مثل البوابات المنطقية ودوائر الإضافة والمسجلات وتسمى هذه العناصر حاليا بمصفوفات البوابة القابلة للبرمجة في الميدان

وقد أستخدمت تقنيات أكثر دقة فى صناعة الدوائر المتكاملة على مدى العقود الثلاثة الماضية لإنشاء الأجزاء الميكانيكية الصغيرة جداً، التى تعمل بالكهرباء بإستخدام تقنية تعرف بإسم النظم الكهروميكانيكية[٢٢] وتستخدم هذه الأجهزة في مجموعة متنوعة من التطبيقات التجارية والعسكرية وتشمل التطبيقات التجارية كمثال شاشات العرض والطابعات النافثة للحبر، ومقاييس التسارع وجيروسكوبات المستخدمة لفتح أكياس الهواء فى السيارات٠ إعتبارا من عام ٢٠١٤، فإن الغالبية العظمى من الترانزستورات مصنعة على طبقة واحدة على وجه واحد من شريحة السيليكون في مستوى مسطح ثنائي الأبعاد٠ صمم الباحثون نماذج أولية من عدة بدائل واعدة، مثل:

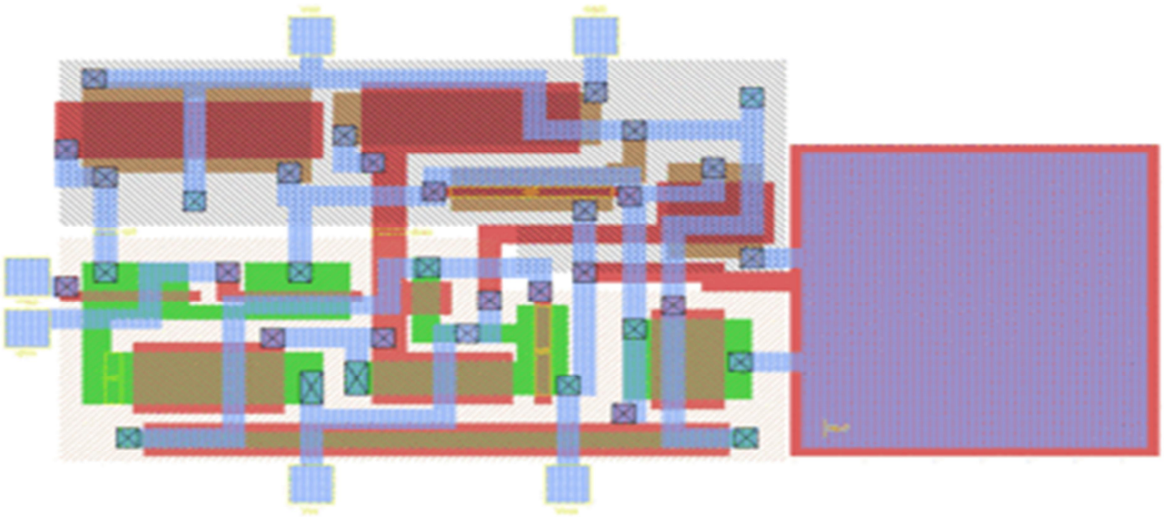
- تصنيع ترانزستورات على كامل سطح كرة صغيرة من السيليكون٠
- تصفيف عدة طبقات من الترانزستورات لعمل دوائر متكاملة ثلاثية الأبعاد ٠
- تكوين ترانزستور من مواد أخرى مثل: الجرافين ، مولبدينيت، نتريد الجاليوم، أنبوب نانوي من الكربون للترانزسستور المتاثر بالمجال، ترانسستور مشابهه لأسلاك متناهية الصغر ، ترانزستورات المتأثرة بالمجال من مواد عضوية٠ ، إلخ.
- شرائح الركائز من مواد جديدة لإنتاج " عناصر إلكترونية وترانزستورات مرنة"[٢٣] ، مما قد يؤدي إلى كمبيوتر على شكل لفائف٠ منذ العام ٢٠٠٠ ، إهتمت كل البحوث الأكاديمية والصناعية بإدماج الوظائف البصرية (الحوسبة الضوئية) على رقائق السليكون والذى أدى إلى تسويق أجهزة أستقبال وإرسال ضوئية ناجحة من السيليكون على أساس متكامل يجمع بين الأجهزة الضوئية (المعدلات، كاشفات، موجهات) بالتكنولوجا التكاملية معدن – اكسيد – سليكون مع العناصر الإلكترونية٠

---

[٢٢] النظم الكهروميكانيكية وتشمل التطبيقات التجارية مثل أجهزة العرض الضوئى (DLP) وطابعات الألوان وأجهزة قياس التسارع والجيروسكوبات المستخدمة لتوزيع أكياس هواء السيارات والمشار لها (MEMS)

[٢٣] إستنباط مواد جديدة للركائز المرنة عادة لتكوين "الترانزستورات مرنة" للعرض المرن أو أجهزة إلكترونية مرنة ، مما قد يؤدي إلى كمبيوتر على شكل لفة للإستخدمات السريعة

٥ – ٤ تصميم الدوائر المتكاملة



الشكل (٥ – ١٠) التخطيط لمكبر تشغيلي بسيطة لدائر تكاملية من النوع (م – أ – س)

يوضح الشكل (٥ – ١٠) تخطيط لمكبر تشغيلي بسيط لدائرة متكاملة (م – أ – س) (المدخلات إلى اليسار ومكثف التعويض الى اليمين)٠ تستخدم الإلوان للتعرف على الطبقات المختلفة فى الدوائر المتكاملة (الطبقة المعدنية – طبقات السيلكون (ن) و(ب) وطبقة السيلكون متعدد البلورات)٠ يتجه تصميم الدوائر المتكاملة على وجه الخصوص على الدوائر المنطقية وتقنيات التصميم٠ تتكون الدوائر المتكاملة من المكونات الإلكترونية المنمنمة كجزء فى بنية شبكة كهربائية على ركيزة متجانسة من مواد أشباه الموصلات قبل الطباعة التصويرية٠ ويمكن تقسيم مجال تصميم الدوائر المتكاملة الى فئات عريضة لتصميم الدوائر المتكاملة الرقمية والتناظرية٠

٥ – ٤ – ١ تصميم الدوائر المتكاملة الرقمية[٢٤] لإنتاج مكونات مثل المعالجات الدقيقة والذاكرات مثل ذاكرة الوصول العشوائي وذاكرة للقراءة فقط والفلاش ومصفوفات البوابات

---

[٢٤] تصميم الدوائر المتكاملة الرقمية لإنتاج مكونات مثل المعالجات٠ مصفوفات البوابة القابلة للبرمجة في الميدان (FPGAs) والذاكرات الوصول العشوائي (RAM) وذاكرات للقراءة فقط (ROM) والدوائر المتكاملة الخاصة بالتطبيقات الرقمية (ASICs)

القابلة للبرمجة والدوائر الخاصة بالتطبيق الرقمية٠ ويركز التصميم الرقمي على صحة وجودة الدوائر المنطقية ، ووضع المكونات وإشارات التوقيت وتعظيم كثافة الدائرة٠ تصميم الدوائر التناظرية[٢٥] أيضا لها مجال تخصصى فى تصميم القوى وترددات الراديو٠ مضخم العمليات – المنظمات الخطية – حلقات تأمين الوجه – المذبذبات ودوائر التصفية النشطة٠ يهتم تصميم الدوائر التناظرية أكثر بفيزياء أشباه الموصلات مثل معامل الكسب والمطابقة وفقد الطاقة والمقاومات٠ عادة ما يكون تصفية وتضخيم الإشارات التناظرية حرج وكنتيجة لذلك تستخدم فى الدوائر المتكاملة التناظرية عناصر نشطة ذات مساحات أكبر من التصاميم الرقمية وهي عادة ما تكون أقل كثافة في عدد العناصر٠ الدوائر المتكاملة الحديثة معقدة جداً حيث يصل متوسط كثافة المكونات فى رقائق الكومبيوتر لأكثر من مليار ترانزستور كما أعلن فى عام ٢٠١٥ ٠ القواعد المتعلقة بما يمكن وما لا يمكن أن تصنع أيضا معقدة للغاية٠ العمليات المشتركة لإنتاج الدوائر المتكاملة بصفة عامة يحكمها أكثر من ٥٠٠ قاعدة فى عام ٢٠١٥ ٠علاوة على ذلك ونظراً لأن عملية التصنيع ذاتها لا يمكن التنبؤ بها تماما، فإنه يجب أن يراعى المصممين البيانات الإحصائية للتعقيدات الحديثة فى التصميم ، فضلا عن ضغوط السوق لإنتاج تصاميم جديدة بسرعة ، أدى إلى الإستخدام الواسع لأدوات التصميم الآلي في تصميم الدوائر المتكاملة٠ وبإختصار، فإن تصميم الدوائر المتكاملة بإستخدام برمجيات أتمتة التصميم الإلكتروني[٢٦] للتصميم والإختبار، والتحقق من التعليمات التي يجب أن تقوم بها الدائرة المتكاملة٠

---

[٢٥] يستخدم تصميم الدوائر التماثلية فى تصميم مكبرات العمليات (op–amps) منظمات القوى الخطية (linear regulators) دوائر المرحلة المؤمنة (phase locked loops) دوائر التذبذب (oscillators) ودوائر التصفية النشطة (active filters)

[٢٦] تصميم الدوائر المتكاملة بإستخدام برمجيات أتمتة التصميم الإلكتروني (EDA) فى التصميم والإختبار والتحقق من التعليمات الواجب إتباعها

- **الأساسيات :**

يتضمن تصميم الدوائر المتكاملة إنشاء المكونات الإلكترونية، مثل الترانزستورات والمقاومات والمكثفات ووصلات الربط المعدنية الداخلية للمكونات على ركيزة من أشباه الموصلات، عادة من السليكون٠ يعتبر عزل المكونات الفردية في الركيزة مشكلة يجب مراعتها نظراً لأن ركيزة السيليكون جيدة التوصيل الكهربائى وغالباً ما تشكل منطقة نشطة للمكونات الفردية٠ هناك طريقتين شائعتين هما العزل من خلال وصلات الشبه موصل الثنائية والعزل من خلال طبقة عازلة ويجب إيلاء إهتمام لفقد الطاقة من الترانزستورات وكثافة التيار فى وصلات الربط الداخلية ومقاومات وصلات الربط ٠ تسرب التيار في الروابط المعدنيه وأضرار التفريغ الكهروإستاتيك للمكونات الصغيرة أيضا تدعو الى الإهتمام ٠ وأخيراً، فإن التخطيط الفعلي لبعض الدوائر ككتل فرعية أيضا فى حاجة للإهتمام من أجل تحقيق السرعة المرجوة من عملية التصميم تمهيدا للإنتاح فيمكن فصل الأجزاء ذات التأثير السلبى للدائرة المتكاملة عن الأجزاء الساكنة ، لموازنة آثار توليد الحرارة عبر الدائرة المتكاملة وتسهيل وضع الوصلات للدوائر خارج الدائرة المتكاملة٠

- **خطوات التصميم :**

تتضمن دورة تصميم الدوائر المتكاملة النموذجية عدة خطوات كما فى الشكل (٥-١١):

١. دراسة جدوى وتقدير حجم الإسطمبات

٢. تحليل الوظائف

٣. نظام مستوى التصميم

٤. التصميم التناظري والمحاكاة & وتنسيق الدائرة

٥. التصميم الرقمي والمحاكاة & والتوليف

٦. محاكاة النظام & التحقق

٧. تصميم لإختبار وتلقائية توليد نمط الإختبار

٨. تصميم إنتاجية الدوائر المتكاملة

الشكل (٥ – ١١) الخطوات الرئيسية في تصميم تسلس متكاملة

٩. الوصلات الداخلة

١٠. إعداد بيانات الأقنعة

١١. الوصلات الخارجة

١٢. تصنيع الشرائح

١٣. إختبار الإسطمبات

١٤. التعبئة والتغليف

١٥. المصادقة على الركيزة وتكاملها

١٦. وصف وخواص الدائرة

١٧. شهادة إنتاج "صيغة الوثيقة المحمولة"

١٨. إنتاج

١٩. معدل التحليل/"الضمان وموثوقية مواد شبه الموصل

٢٠. تحليل االأخطاء من المرتجعات

٢١. الخطة المستقبلية لشرائح الدوائر المتكاملة بإستخدام معلومات السوق والإنتاج

كما يمكن تقسيم تصميم الدوائر المتكاملة الرقمية إلى ثلاثة أجزاء.

١. التصميم الإلكتروني على مستوى النظام: هذه الخطوة تقوم بتحديد المواصفات الوظيفية للمستخدم[٢٧] – يمكن للمستخدم إستخدام مجموعة متنوعة من اللغات، والأدوات لإنشاء هذا التوصيف وتشمل الأمثلة لغات سى / سى ++ (C/c + +) ونموذج نظام سى ونموذج نظام فيرلوج ونموذج مستوى المعاملات لسيمولنك وماتلاب ٠

٢. سجل مستوى النقل[٢٨]: هذه الخطوة تقوم بتنفيذ مواصفات المستخدم (ماذا يريد المستخدم أن تقوم به الرقاقة) ٠ يصف سجل مستوى النقل السلوك الدقيق للدوائر الرقمية على الرقاقة فضلا عن الوصلات للمدخلات والمخرجات

٣. التصميم المادي: تقوم هذه الخطوة بأخذ سجل مستوى النقل ومكتبة البوابات المنطقية المتاحة ويقوم بتصميم الرقاقة٠ وهذا ينطوي على معرفة البوابات المراد إستخدامها ،

---

[٢٧] قد يفضل المستخدم استخدم مجموعة متنوعة من لغات البرمجة ، وأدوات تكوين الوصف مثل (C++ model, C/ SystemC, SystemVerilog Transaction Level Models, Simulink and MATLAB)

[٢٨] (RTL) سجل مستوى النقل ويصف السلوك الدقيق للدوائر الرقمية على الرقاقة فضلا عن الوصلات للمدخلات والمخرجات

وتحديد أماكنها وتوصيلهما معا. مع ملاحظة أن الخطوة الثانية وهى تصميم سجل مستوى النقل مسئولة عن صحة ما تقوم به الرقاقة. وجودة التصميم المادي الذى لا يؤثر على الأداء الوظيفي على الإطلاق (إذا تم بشكل صحيح) ولكن يحدد مدى سرعة عمل الرقاقة والتكلفة المتوقعة.

- التكوين المصغر ، ومستوى تصميم النظام

تبدأ عملية تصميم الشريحة الأولى على مستوى النظام والتخطيط للتكوين المصغر للشريحة. يوجد بمؤسسات التصميم إدارة للدوائر المتكاملة بها الكثير من العاملين فى مجال التحليلات لعمل المشروع المقترح لتصميم الشريحة الجديدة لتناسب الجزء المتعلق بصناعتها. تجتمع لجنة من المصممين ذوى الخبرات لتقرير عمل الرقاقة والإحتياجات الوظيفية للرقاقة وإقرار التصميم والتحقق من الآليات ومنهجيات الإختبار للمشروع ، يتحول التصميم الأولى إلى تحديد مستوى النظام ومحاكاته مع نماذج بسيطة بإستخدام بعض لغات البرمجة ومضاهاة أدوات التشغيل لتصميمات نقية وجديدة وتعديل مجموعات التعليمات الموجودة للحصول على وظائف جديدة للشريحة. التصميم في هذه المرحلة هو غالباً عمليات الترميز[٢٩] فى تنسيق أو تنفيذ حساب الفاصلة العائمة . في مراحل لاحقة في عملية التصميم، كل من هذه العبارات تتسع لمئات الصفحات من الوثائق النصية.

- تصميم سجل مستوى النقل: هذا هو الجانب الأصعب في تصميم الدوائر المتكاملة. بناء على إتفاق لتصميم النظام، يقوم مصممى سجل مستوى النقل بتطبيق النماذج الوظيفية[٣٠] في لغات وصف العناصر مثل فيريلوج ، أو نظم فيريلوج أو لغة وصف الأجهزة

---

[٢٩] (Encoding processes) التصميم في هذه المرحلة لتنفيذ ترميز البيانات مثل حساب الفاصلة العائمة (*MP3* format or implements IEEE floating-point arithmetic) – في مراحل لاحقة في عملية التصميم كل من هذه العبارات تبحث الحالات التى تتسع لمئات الصفحات من الوثائق النصية

[٣٠] مصممى سجل مستوى النقل (RTL) تنفيذ النماذج الوظيفية في توصيف برنامج المتطلبات الخشنة (hardware) مثل برامج فيريلوج () ، نظم برامج فيريلوج أو لغة وصف الأجهزة المستخدمة في أتمتة التصميم الإلكتروني () لوصف النظم الرقمية والإشارات المختلطة مثل مصفوفات البوابة القابلة للبرمجة في الميدان، والدوائر المتكاملة

لفيريلوج٠ بإستخدام عناصر التصميم الرقمي مثل عناصر التجميع ، عناصر الإنحراف ، ووضع الآلات فضلا عن مفاهيم هندسة الكمبيوتر٠ يقوم مصممى سجل مستوى النقل بتحويل الوصف الوظيفي للشريحة الى نماذج ومكونات على الرقاقة للعمل معا٠ كل من البيانات البسيطة الموصوفة في تصميم النظام تتحول بسهولة إلى الآلاف من الأسطر من التعليمات البرمجية لسجل مستوى النقل، لهذا السبب فأنه من الصعوبة بمكان التأكد من أن سجل مستوى النقل سوف يقوم بتنفيذ الشيء الصحيح في جميع الحالات الممكنة التي قد يرغب فيها المستخدم٠ لتقليل عدد الأخطاء الوظيفة، تقوم مجموعة تدقيق منفصلة بدراسة سجل مستوى النقل وتصميم آليات الإختبار والتصميم للتحقق من أن سجل مستوى النقل يقوم بتنفيذ نفس الخطوات تحت ظروف مختلفة كثيرة، مصنفة حسب المجال الوظيفي للشريحة ٠ تستخدم العديد من التقنيات[٣١] كل منها مفيد – منها محاكاة منطق واسعة النطاق، مضاهاة الأجهزة، وبرنامج لينت للتحقق من تشابه التعليمات البرمجية ، وهلم جرا ٠ يمكن لخطأ صغيرة جعل الرقاقة كلها عديمة الفائدة ٠ تسبب الخطأ فى الجزء الخاص بالقسمة العائمة فى دائرة مشهورة[٣٢] بنسبة ٦١ جزء من المليون، وهى من الحالات التي حدثت بشكل نادر فى شركة إنتل ٠ ولم يلاحظ أحد حتى تم إنتاج الملايين من الرقاقة لمدة أشهر٠ بعد ذلك إضطرت شركة إنتل إلى تقديم عرض إستبدال مجاناً لكل الرقاقات التى بيعت حتى يمكن إصلاح الخطأ مما تسبب فى خسارة بتكلفة قدرها مبلغ ٤٧٥ مليون دولار٠

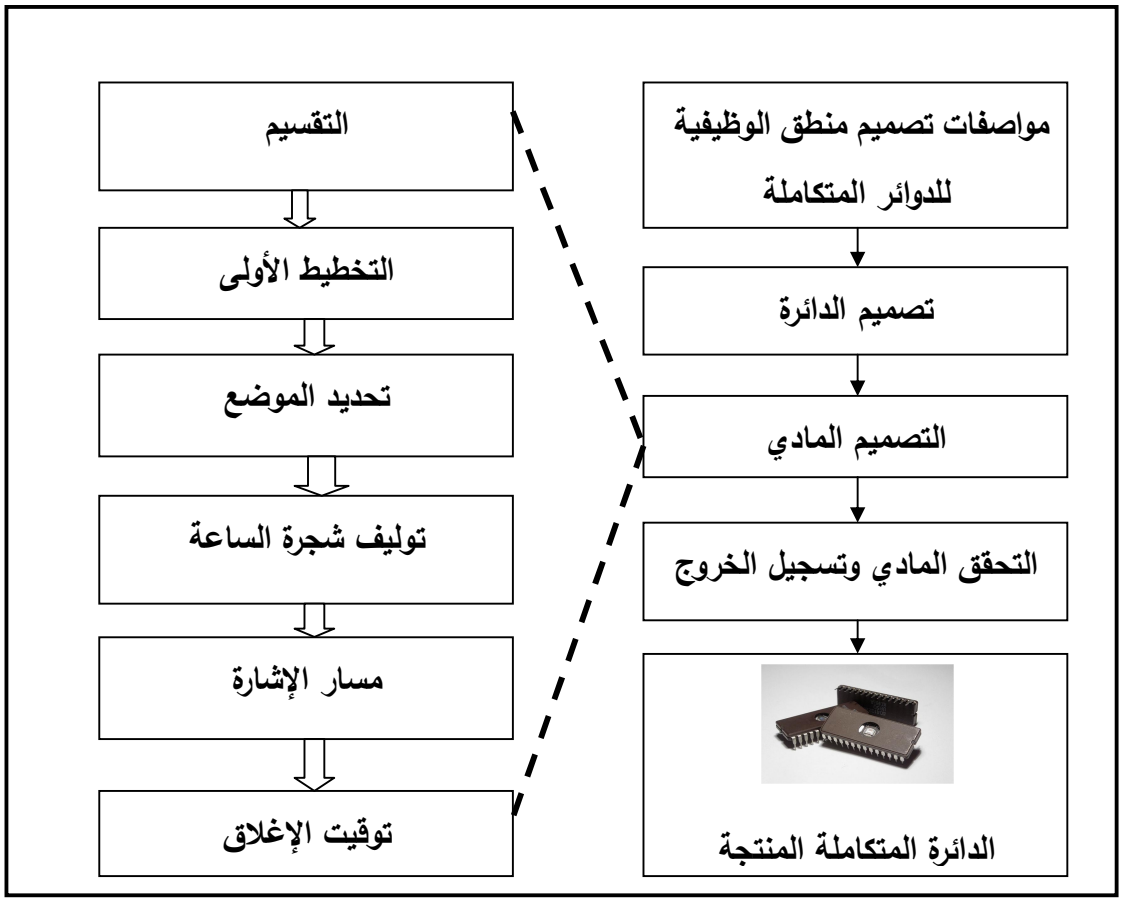
---

[٣١] يستخدم العديد من التقنيات، التى تتسم بعدم المثالية ولكن كل منها مفيد – محاكاة منطق واسعة النطاق (logic simulation)،الطرق النموجية (formal methods)، مضاهاة المكونات الخشنة (hardware emulation)، التحقق من التعليمات البرمجية(lint-like code checking)، تغطية التعليمات البرمجية (code coverage) وهكذا

[٣٢] (Pentium FDIV bug) هو خلل في وحدة النقطة العائمة (floating point unit(FPU)) فى الدائرة المتكاملة (P5 Intel Pentium) بسبب الخطأ، يمكن دائرة المعالج بإرجاع نتائج العشرية غير صحيحة ، مشكلة مزعجة للحسابات الدقيقة اللازمة في مجالات مثل الرياضيات والعلوم ، وحدة النقطة العائمة (FPU) أصبحت تعرف باسم (Pentium FDIV bug) – الخلل (FDIV) هو لغة التجميع (the x86 assembly language mnemonic) لقسمة الفاصلة العائمة٠ مثال واحد وجد حيث نتيجة القسمة تم إرجاع حوالي ٦١ شريحة لكل مليون٠

- **التصميم المادي:**

سجل مستوى النقل هو نموذج سلوكيات للوظائف الفعلية لما يفترض أن تعمل في إطاره الرقاقة. سجل مستوى النقل ليس له أي صلة بالجوانب المادية لكيفية عمل الرقاقة في الحياة الحقيقية فيما يخص المواد وطبيعتها وخواصها الكهربائية. ولهذا السبب، فإن الخطوة التالية في عملية تصميم دائرة متكاملة هى مرحلة التصميم المادي، يتم تحويل سجل مستوى النقل إلى تمثيل هندسي لجميع العناصر الإلكترونية مثل المكثفات والمقاومات وبوابات المنطق والترانزستورات التي سوف تتكون على الرقاقة.



الشكل (٥ – ١٢) خطوات التصميم المادي ضمن مخطط إنسيابي لتصميم الرقمي

فيما يلي الخطوات الرئيسية للتصميم المادي الذى يتطلب تكرار لخطوات سابقة لضمان تحقيق جميع الأهداف ٠ وهذه مشكلة صعبة في حقيقتها تسمى إغلاق التصميم[٣٣] ٠

- التوليف المنطقى[٣٤] : التأكيد أن سجل مستوى النقل يشتمل على قائمة الأهداف المستهدفة في إنتاج الشريحة٠
- التخطيط الأولى: يقتطع سجل مستوى النقل مساحة كبيرة فى الرقاقة، يتم تحديد مواقع إبر الإدخال/الإخراج ويتم وضع المكونات الكبيرة على شكل صفوف وأعمدة٠
- المواضع: يتم تعيين البوابات بشكل جانبى غير متداخلة في منطقة الإسطمبة٠
- تأكيد المواقع والبوابات:التحولات المنطقية والنقاط التكرارية لإغلاق قيود الأداء والطاقة
- ساعة الإدراج[٣٥] : أسلاك إشارة عقارب الساعة عادة فى شكل شجرة توقيت ٠
- التوجيه: تتم إضافة الأسلاك التي تربط البوابات في قائمة التصميم٠
- شبكة الأسلاك المثلى[٣٦] : الأداء – (توقيت الإغلاق) – الضوضاء (تكامل الإشارات)، – العائد (قدرة التصميم على التصنيع) – إلغاء الإنتهاكات ٠
- القدرة على تصنيع التصميم : تعديل التصميم حيثما أمكن، لجعله سهل وفعال قدر الإمكان لبدأ الإنتاج٠ ويتحقق ذلك بإضافة مداخل ومخارج إضافية أو إضافة طبقات ٠
- التدقيق النهائي: نظراً لتكلفة الأخطاء وإستهلاك وقتاً طويلاً لتحديد الخطأ، يستدعى كقاعدة عامة تدقيق الأخطاء على نطاق واسع ، والتأكد من االتخطيط للبوابات قد تم القيام به بشكل صحيح، والتحقق من أنه تم إتباع قواعد الإنتاج بشكل واقعى٠

---

[٣٣] في الواقع لا يوجد تقدم مباشرة – تكرار كبير مطلوب لضمان تحقيق جميع الأهداف في وقت واحد٠ وفى الحقيقة هذه مشكلة صعبة تسمى إغلاق التصميم الصحيح٠

[٣٤] التوليف المنطقى (Logic synthesis)

[٣٥] الإدراج على مدار الساعة: أسلاك إشارة الساعة (عادة، على شكل الأشجار) أدخلت فى التصميم

[٣٦] مرحلة ما بعد الأسلاك المثلى: أداء توقيت الإغلاق (timing closure) ، الضوضاء وسلامة الإشارة (signal integrity) والعائد القدرة على تصنيع التصميم (ability Design for manufacture) وإزالة الانتهاكات (violations are removed)

- **التأكيد على إتمام عمليات إنتشار الشوائب والعزل حيثما كان ذلك ممكن مع التقيد بقواعد التصميم التي سبق تحديدها بالإسطمبة[٣٧]**
- **إنشاء المخارج والأقنعة : التأكد من أن بيانات التصميم تحولت إلى الأقنعة الضوئية في ضوء إعداد بيانات القناع٠**

- **التصميم التناظري :**

قبل ظهور المعالجات الدقيقة والبرمجيات كمتطلبات أدوات التصميم، كان يتم تصميم الدوائر المتكاملة التناظرية بإستخدام الحسابات اليدوية وإنتاجها من عدة أجزاء٠ وكانت هذه الدوائر المتكاملة أقل تعقيد ، على سبيل المثال، مكبر العمليات عادة ما يتضمن ما لا يزيد عن عشرة ترانزستورات وعدد قليل من الوصلات٠ غالباً كانت تتم تكرارية عملية التجربة والخطأ بشكل هندسى لحجم العنصر لتحقيق القدرة على إنتاج الدائرة المتكاملة٠ إعادة إستخدام تصميمات مثبته تسمح تدريجيا بتعقيد أكثر فى الدائرة المتكاملة التى سيتم تكوينها٠ عندما كان إستخدام الكمبيوتر بتكلفة غير مرتفعة ومتوفرة فى السبيعنات ، كان يتم إعداد وكتابة برامج الحاسب لمحاكاة تصميم الدوائر بدقة أكبر من العمليات الحسابية اليدوية٠ أول محاكاة للدوائر المتكاملة التناظرية[٣٨] (برنامج محاكاة مع تركيز على الدوائر المتكاملة – سبايس) ساهمت أدوات المحاكاة المحوسبة فى زيادة تعقيد تصميم الدوائر المتكاملة بالمقارنة بتصميم دوائر متكاملة بتحقيق الحسابات اليدوية ، مما جعل عملية تصميم الدوائر المتكاملة التناظرية محددة وممكنة٠ محاكاة الدوائر المحوسبة ساهم فى العثور على الأخطاء مبكرا فى دورة التصميم قبل التصنيع٠ بالإضافة إلى ذلك، يمكن تنفيذ

---

[٣٧] التصميم للإنتاج : تطوير التصميم لجعله سهل وفعال قدر الإمكان للإنتاج. وذلك بإضافة موجهات إضافية أو إضافة طبقات غير فعاله معدنية/نشر/بولي حيثما كان ذلك ممكن مع التقيد بقواعد التصميم التي تم تحديدها لعمليات السبك

[٣٨] أول جهاز محاكاة للدوائر التناظرية المتكاملة كان يسمى برنامج محاكاة الدوائر المتكاملة (SPICE) ٠ أدوات المحاكاة المحوسبة الدائرة ساعدت فى تمكين زيادة تعقيد تصميم الدوائر المتكاملة فى العمليات الحسابية أمكن تحقيق عملية تصميم الدوائر المتكاملة التناظرية (ASICs)

محاكاة دوائر محوسبة أكثر تطورا بالمقارنة من تحليل الدوائر المملة جداً بالحسابات اليدوية، وتسمح بتحليل[٣٩] مونتي كارلو وعملية تحليل الحساسية ليكون عمليا. يمكن محاكاة آثار المعاملات مثل إختلاف درجة الحرارة، التباين فى تركيز الشوائب والإختلافات فى العملية الإحصائية بسهولة وتحديد مقدرة تصنيع تصميم الدائرة المتكاملة٠ عموما – محاكاة الدوائر المحوسبة الشاملة، يتيح بدرجة أعلى الثقة بأن الدائرة سوف تعمل كما هو متوقع عند صنعها.

- **التكيف مع التغير:**

ينطوي التحدي الأكثر أهمية فى تصميم الدوائر المتكاملة التناظرية على تباين تكوينات العناصر المفردة على رقاقة أشباه الموصلات٠ وخلافا لتصميم مستوى الدوائر الذي يسمح للمصمم تحديد بعض العناصر التي تم إختبارها وإهمال البعض وفقا للقيمة، يمكن أن تختلف قيم العناصر فى الدائرة المتكاملة على نطاق واسع والتى لا يمكن السيطرة عليها من قبل المصمم٠ على سبيل المثال، يمكن أن تختلف قيم بعض المقاومات فى الدائرة المتكاملة بنسبة ± ٢٠% وإختلاف معامل الكسب β لدائرة متكاملة لترانزستور ثنائى القطبية من ٢٠ الى ١٠٠ ٠ في أحدث عمليات تصميم وإنتاج لدائرة متكاملة (م – ا – س المتكاملة) فإن قيمة كسب التيار β لترانزستور (ب– ن – ب رأسى) وصلت الى أقل من واحد وبالطبع هذا غير مقبول٠ يمكن أن تختلف خواص العناصر إلى حد كبير فى كل دائرة متكاملة مفردة بسبب إختلاف معدلات وتدرجات تركيز الشوائب٠ السبب الكامن وراء هذا التغير أن العديد من عناصر أشباه الموصلات ذات حساسية كبيرة للفروق العشوائية التى لا يمكن السيطرة عليها في العملية٠ يمكن أن تكون تغييرات طفيفة فى تفاوت زمن وكمية ومستويات إنتشار الشوائب ، وما إلى ذلك مما له تأثيرات كبيرة على خواص العناصر٠ إلا أن هناك بعض تقنيات التصميم المستخدمة للحد من آثار الإختلافات فى قيم العناصر:

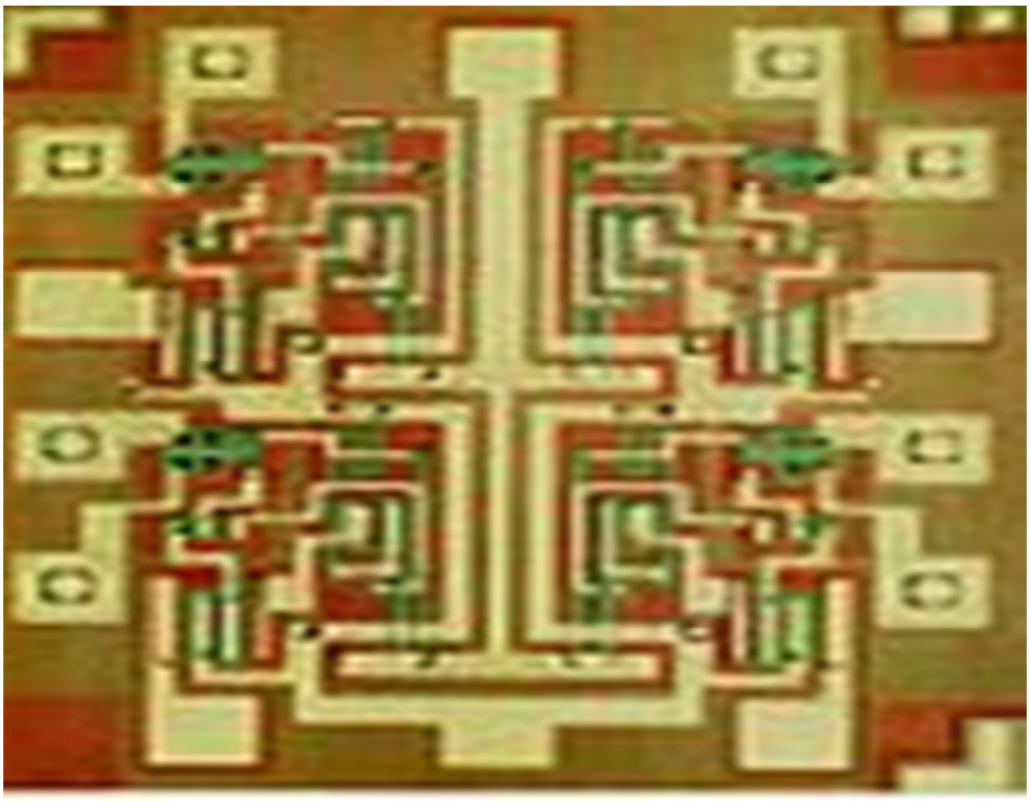
- **إستخدام نسب المقاومات، المتجاورة والمتطابقة ، بدلاً من قيمة المقاومات المطلقة ٠**

---

[٣٩] تسمح بتحليل مونتي كارلو (Monte Carlo analysis) وعملية تحليل الحساسية لتكون عملية

- إستخدام عناصر متطابقة مع الأشكال الهندسية حيث تكون متطابقة فى الإختلافات ،
- إنتاج كمية كبيرة من العناصر كي تصبح نسبة الإختلافات الإحصائية جزء ضئيل من خواص العناصر الكلية ،
- تجزئة العناصر الكبيرة ، مثل المقاومات إلى أجزاء وتشابكها لإلغاء الإختلافات ،
- إستخدام تخطيط ثابت للعناصر المشتركة لإلغاء الإختلافات في العناصر التي يجب أن تتطابق تماما (مثل ترانزستورى التفاضلية فى مكبر العمليات) ،

٥ – ٥ خارطة الطريق الدولية لتكنولوجيا أشباه الموصلات



الشكل (٥ – ١٤) تباين تكوينات العناصر المفردة على الرقاقة لدائرة متكاملة تناظرية

الجدول (٥ – ٢) تطور التغيرات فى سمك التكوينات فى الدوائر المتكاملة التناظرية بخارطة التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات

١٩٧١	١٩٧٤	١٩٧٧	١٩٨٢	١٩٨٥	١٩٨٩	١٩٩٤
١٠ ميكرو	٦ ميكرو	٣ ميكرو	٥و١ ميكرو	١ ميكرو	نانو ٨٠٠	نانو ٦٠٠
١٩٩٥	١٩٩٧	١٩٩٩	٢٠٠١	٢٠٠٤	٢٠٠٦	٢٠٠٨
نانو ٣٥٠	نانو ٢٥٠	نانو ١٨٠	نانو ١٣٠	نانو ١٨٠	نانو ٦٥	نانو ٤٥
٢٠١٠	٢٠١٢	٢٠١٤	٢٠١٦ –٢٠١٧	٢٠١٧ –٢٠١٨	٢٠٢٠ –٢٠٢١	
نانو ٣٢	نانو ٢٢	نانو ١٤	نانو ١٠	نانو ٧	نانو ٥	

خارطة التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات[٤٠] هى مجموعة من الوثائق التي وضعتها مجموعة من خبراء صناعة أشباه الموصلات. هؤلاء الخبراء هم ممثلين عن المنظمات الراعية التي تضم "مؤسسات صناعة أشباه الموصلات فى " للولايات المتحدة وأوروبا، واليابان، وكوريا الجنوبية وتايوان. خارطة التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات (إتراس)[٤١] يقصد بها تقييم وضع التكنولوجيا فقط بصرف النظر عن أي إعتبارات تجارية تتعلق بمنتجات الأفراد أو المعدات. تمثل الوثائق أفضل الآراء بشأن إتجاهات البحوث في المجالات التالية للتكنولوجيا، بما في ذلك حدود زمنية تصل إلى حوالي ١٥ سنة في المستقبل:

- **برامج/تصميم النظام**
- **الإختبارات وإختبار المعدات**
- **العمليات الأساسية والنهائية**
- **عملية التكامل والعناصر والهياكل**

---

[٤٠] خارطة التكنولوجيا الدولية لأشباه الموصلات تشتمل على مجموعة من الوثائق التي تنتجها مجموعة من خبراء صناعة أشباه الموصلات. هؤلاء الخبراء هم ممثلى المنظمات الراعية التي تضم مؤسسات صناعة أشباه الموصلات"

[٤١] (The ITRS) مجموعة من الخبراء لتقييم وضع للتكنولوجيا فقط وغض النظر عن أي اعتبارات تجارية تتعلق بالمنتجات الفردية أو المعدات

- **الترددات اللاسلكية والتكنولوجيا التناظرية/ والإشارات المختلطة**
- **النظم الكهروميكانيكية الميكروووية[٤٢]**
- **الطباعة التصويرية[٤٣]**
- **الوصلات الداخلية للدائرة المتكاملة**
- **تكامل المصنع**
- **التجميع والتغليف**
- **البيئة، الصحة والسلامة المهنية**
- **تعزيز العائد**
- **علم القياس**
- **النمذجة والمحاكاة**
- **أجهزة البحوث المستجدة**
- **مواد البحوث المستجدة**

يتطلب بناء دوائر المتكاملة، أو أي عنصر أشباه الموصلات، سلسلة من العمليات– الطباعة التصويرية ، النقش والإزالة ، وترسيب المعادن، وهلم جرا٠ كل عملية من هذه العمليات تصنع بآلات متخصصة صممت من قبل مجموعة متنوعة من الشركات التجارية٠ مما يجعل من الصعب المضي قدما في هذا الشأن في كثير من الحالات ولا يجدي نفعاً لشركة واحدة إدخال منتج جديد إذا لم تكن متوفرة الخطوات الأخرى اللازمة في نفس الوقت تقريبا٠ يمكن أن تساعد خارطة طريق التكنولوجيا هذا الإتجاه ويمكن لكل منتج أن يضع الهدف لتنفيذ جزء من هذه الخارطة فى التاريخ المتوقع بخريطة الطريق ٠

---

[٤٢] (MEMS) إختصار لمصطلح (electromechanical Systems Micro) ويعنى النظم الكهروميكانيكية الميكروووية

[٤٣] (Photolithography) وهى أحد الخطوات التكنولوجية فى صناعة أشباه الموصلات وتعنى الطباعة التصويرية تمهيدا لعملية الحفر أو إزالة أجزاء من طبقة مادة تمهيدا لعملية أخرى

مع تخطيط تدريجي لإنتاج أدوات لموردي المعدات المتخصصة. فظهرت الحاجة إلى خريطة طريق واضحة لإستباق متطلبات السوق وتحديد الإحتياجات التكنولوجية لإنتاج الدوائر المتكاملة.

الجدول (٥ - ٣) خريطة طريق واضحة لإستباق تطور السوق وخطة وتحديد الإحتياجات التكنولوجية لإنتاج الدوائر المتكاملة.

الخواص	١٩٩٢	١٩٩٥	١٩٩٨	٢٠٠١	٢٠٠٤	٢٠٠٧
حجم الرقاقة المستقبلى بالميكرون	٥و٠	٣٥و٠	٢٥و٠	١٨و٠	١٢و٠	١و٠
عدد البوابات فى الرقاقة بالمليون	٣و٠	٨و٠	٢	٥	١٠	٢٠
عدد البايت فى الرقاقة						
ذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية[٤٤]	١٦ م	٦٤ م	٢٥٦م	١ ج	٤ج	١٦ج
ذاكرة الوصول العشوائي الساكنة	٤ م	١٦م	٦٤م	٢٥٦م	١ج	٤ج
تكلفة إنتاج الشريحة (مليون دولار/سم^{٢})	٤	٩و٣	٨و٣	٧و٣	٦و٣	٥و٣
حجم الرقاقة (مم^{٣})						
البوابات المنطقية	٢٥٠	٤٠٠	٦٠٠	٨٠٠	١٠٠٠	١٢٥٠
الذاكرات	١٣٢	٢٠٠	٣٢٠	٥٠٠	٧٠٠	١٠٠٠
قطر الشريحة (مم)	٢٠٠	٢٠٠	٢٠٠- ٤٠٠	٢٠٠- ٤٠٠	٢٠٠- ٤٠٠	٢٠٠- ٤٠٠
كثافة العيوب (عيب / سم^{٣})	١و٠	٥٠و٠	٣٠و٠	١٠و٠	٠٠٤و٠	٠٠٢و٠
مستويات الوصلات الداخلية (للدوائر التناظرية	٣	٤- ٥	٥	٥-٦	٦	٦-٧
القدرة القصوى (وات / إسطمبة)						
عالية الأداء	١٠	١٥	٣٠	٤٠	١٢٠-٤٠	٤٠-٢٠٠
المحمولة	٣	٤	٤	٤	٤	٤
جهد المصدر (فولت)						
سطح المكتب	٥	٣و٣	٢و٢	٢و٢	٥و١	٥و١
المحمولة	٣و٣	٢و٢	٢و٢	٥و١	٥و١	٥و١

[٤٤] Dynamic random access memory (DRAM) ذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية و Static (SRAM) random access memory ذاكرة الوصول العشوائي الساكنة ووحدات القياس ميجا بايت وجيجا بايت

لعدة سنوات، قدم إتحاد صناعة أشباه الموصلات[٤٥] بإلقاء هذه المسؤولية للتنسيق إلى الولايات المتحدة، التى قادت لإنشاء النمط الأمريكي لخارطة الطريق، "خطة خارطة الطريق التكنولوجيا الوطنية لأشباه الموصلات (نتراس) ٠ أول خارطة طريق لأشباه الموصلات هى التي نشرتها رابطة صناعة أشباه الموصلات[٤٦] في عام ١٩٩٣ ، والتى أصبحت في عام ١٩٩٨ أقرب إلى نظيراتها الأوروبية واليابانية والكورية والتايوانية بإنشاء خريطة الطريق الدولية الأولى[٤٧] ٠ وقد أصبح عدد الشركات التابعة للمجموعة الدولية لرابطة صناعة أشباه الموصلات فى العام ٢٠٠٣ عدد ٩٣٦ شركة – تم تقسيم المنظمة إلى "مجموعات عمل تقنية"[٤٨] عددها ١٧ مجموعة ، يركز كل منها على أحد العناصر الرئيسية لهذه التكنولوجيا المرتبطة بسلسلة الإمداد٠ تقليديا، يتم تحديث خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات في السنوات الزوجية ويتم تدقيقها في السنوات الفردية٠ وصدر آخر تنقيح لخارطة الطريق في عام ٢٠١٣ ومنها توصيف خارطة الإسقاط للترانسسنور بإستخدام النمذجة التنبؤية واسعة النطاق٠

---

[٤٥] (Semiconductor Industry Association – SIA) رابطة صناعة أشباه الموصلات أعطت مسؤولية التنسيق للولايات المتحدة، مما أدى إلى خلق النمط الأمريكي فى خارطة الطريق، ووضع خارطة وطنية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات (Roadmap for Semiconductors National Technology – NTRS)

[٤٦] (Semiconductor Industry Association – SIA) رابطة صناعة أشباه الموصلات هى أول من أعلن عن خريطة الطريق عام ١٩٩٣

[٤٧] (International Technology Roadmap for Semiconductors، ITRS) خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات

[٤٨] (TWGs) تم تقسيم المنظمة إلى "مجموعات عمل تقنية (Technical Working Groups) الى عدد ١٧ مجموعة ، يركز كل منها على عنصر رئيسي للتكنولوجيا والمرتبطة بسلسلة التوريد والانتاج

- **خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات الثانية**

أعلنت لجنة الإسناد في أبريل عام ٢٠١٤، أن خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات الثانية[٤٩] سيعاد تنظيمها بصورة أفضل. إشتملت الخطة على جميع العناصر المدرجة من المجموعات التقنية السبعة عشر وتركيزها فى سبعة مواضيع:

١. نظام التكامل: يتناول تصميم التكوينات الهندسية ، وكيفية إدراج كتل غير متجانسة.

٢. خارج نظام الإتصال: يتناول التقنيات اللاسلكية وكيفية عملها، وكيفية إختيار الحل الأفضل

٣. التكامل المختلط الغير متجانس: يتناول إدماج التكنولوجيات المصنعة بشكل منفصل في وحدة جديدة حتى تعمل أفضل مما تفعل القطع الفردية بشكل منفصل.

٤. المكونات المختلطة الغير متجانسة : تتناول العناصر المختلفة التي تشكل الأنظمة المختلطة الغير المتجانسة، مثل النظم الكهروميكانيكية الميكروووية ، وتوليد الطاقة الكهربائية، وعناصر الاستشعار.

٥. التكنولوجيات المختلفة عن تكنولوجيا الترانزستور (م – أ – س المتكاملة والمشار لها سى موس) : تتناول المكونات التي تقدم عناصر إلكترونيه بتكنولوجيات[٥٠] غير تكنولوجيا الترانزستور (معدن – أكسيد – سليكون المتكاملة) مثل ناقل الإلكترونيات بالزيادة والنقصان[٥١] وعناصر مقاومات الذاكرة[٥٢] وغيرها.

---

[٤٩] فى ابريل ٢٠١٤ أعلنت خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات (ITRS) إعادة تنظيم خارطة (ITRS) أفضل لتناسب احتياجات الصناعة. وضعت الخطة جميع العناصر المدرجة في المجموعات الفنية السابقة وعددها ١٧ مجموعة وتقسيمها الى سبعة مواضيع .

[٥٠] وتهتم بالعناصر الإلكترونية وليست على أساس تكنولوجيا (CMOS) مثل (spintronics) ، (memristors) ، وغيرها

[٥١] (Spintronics) وتعنى النقل الدائرى للإلكترونيات (spin electronics) وأيضا تعنى إلكترونيات التموية (fluxtronics) وهى دراسة للإتجاهات المتجانسة (intrinsic spin) للإلكترون وما يرتبط بالعزم المغناطيسي، بالإضافة إلى الشحنات الإلكترونية الأساسية فى عناصر الحالة الصلبة. وتختلف النقل الدائرى للإلكترونيات (spin electronics) عن الإلكترونيات المغناطيسية القديمة ، في أن يتم التلاعب بها بكل من المجالات المغنطيسية والمجالات الكهربائية

[٥٢] (memristor) وتعنى مجموعة مقاومات الذاكرة (portmanteau of *memory resistor*)

٦. المزيد : لأن هناك عمل لا يزال يتعين القيام به، سوف تعمل هذه المجموعة على إستمرار تقليص تكنولوجيا الترانزستور (معدن – أكسيد – سليكون التكاملية).

٧. تكامل المصنع : يتناول البحث عن أدوات جديدة وعمليات إنتاج التكامل للمكونات المختلطة الغير متجانسة من كل هذه الأشياء.

- خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات المطورة (إتراس)

كما سبق أن ذكرنا أنه فى السنوات الزوجية تخضع خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا لأشباه الموصلات لبعض التغييرات وحيث أن العام ٢٠١٠ من السنوات الزوجية المقرر فيها مراجعة بنود الخريطة – فقد حدثت تغيرات كبيرة في عام ٢٠١٠، بما في ذلك تغيير الأطر الزمنية لعناصر البوابة التناظرية مثل[٥٣] لذاكرة الوصول العشوائي السلبية وأيضا لذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية ، مع عمل خطط إسترجاع إحتياطية للطباعة الحجرية بإستخدام الأشعة فوق البنفسجية[٥٤] وربط التغييرات الهيكلية، والتقدم المحرز في التعبئة والتغليف ثلاثي الأبعاد. وقد كان للموجز التنفيذي لخريطة ٢٠١٠ عمل ممتاز بتسليط الضوء على التغييرات من ٢٠١٠– ٢٠٢٤ .

---

[٥٣] electrically erasable programmable read-only memory (NAND) برمجة ذاكرة القراءة فقط القابلة للمسح المستخدمة فى كروت الذاكرة ومحركات أقراص (USB) المحمولة ومحركات الأقراص ذات الحالة الصلبة تلك التي أنتجت في عام ٢٠٠٩ أو في وقت لاحق ومنتجات مشابهة لتخزين ونقل البيانات.(DRAM) dynamic random access memory ذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية وهى نوع من (RAM) random access memory ذاكرة الوصول العشوائي التى تقوم بتخزين كل بت من البيانات إلى مكثف منفصل في دوائر المتكاملة.

[٥٤] (EUVL) Extreme ultraviolet lithorgraphy الطباعة الحجرية بالأشعة فوق البنفسجية المتطرفة) تعتبر التكنولوجيا الأكثر جدوى للزخرفة

الجدول (٥ – ٤) يوضح الجدول التالى تغيير الأطر الزمنية لعناصر البوابة التناظرية لذاكرة الوصول العشوائي السلبية (ناند) وأيضا لذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية (درام)

ITRS Technology Trend Targets (including PIDS 2011 roadmap flash and DRAM trend driver proposals)

	Year of Production	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25
2010 ORTC	Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f) [A]	38	32	28	25	23	20	18	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9	8.0	7.1	6.3	N/A
2010 PIDS Projection based on survey data	Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f) [B]	N/A	26	24	22	20	19	18	16	14	13	12	11	9	8	8	8	N/A
2010 WAS	DRAM ½ Pitch (nm) (contacted) [C]	52	45	40	36	32	28	25	22.5	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9	N/A
2010 PIDS Projection based on survey data	DRAM ½ Pitch (nm) (contacted) [D]	N/A	42	36	31	28	25	24.0	21.0	18.0	16.0	14.0	13.0	12.0	10.0	9.0	8.0	N/A
	MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)[1,2]	54	45	38	32	27	24	21	18.9	16.9	15.0	13.4	11.9	10.6	9.5	8.4	7.5	N/A
	MPU Printed Gate Length (GLpr) (nm) ††[1]	47	41	35	31	28	25	22	19.8	17.7	15.7	14.0	12.5	11.1	9.9	8.8	7.9	N/A
	MPU Physical Gate Length (GLph) (nm)[1]	29	27	24	22	20	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4	N/A
	ASIC/Low Operating Power Printed Gate Length (nm) ††[1]	54	47	41	35	31	25	22	19.8	17.7	15.7	14.0	12.5	11.1	9.9	8.8	7.9	N/A
	ASIC/Low Operating Power Physical Gate Length (nm)[1]	32	29	27	24	22	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4	N/A
	ASIC/Low Standby Power Physical Gate Length (nm)[1]	38	32	29	27	22	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4	N/A
	MPU Etch Ratio GLpr/GLph (nm)[1]	1.6039	1.5296	1.4588	1.4237	1.3895	1.3561	1.3235	1.2917	1.2607	1.2304	1.2008	1.1720	1.1438	1.1163	1.0895	1.0633	N/A

كما تدعو خارطة الطريق إلى أدوات نمذجة ومحاكاة أفضل لنهج التغليف ثلاثي الأبعاد للحد من التكلفة العالية والتأخير الزمني لتصنيع نماذج متعددة.

الجدول (٥ – ٥) تحديث وربط المستوى الدولى لخارطة الطريق لعناصر ثلاثية الأبعاد

المستوى العالمى للتصنيف W2W, D2W, or D2D 3D	٢٠٠٩ – ٢٠١٢	٢٠١٣ – ٢٠١٥
أقل قطر من خلال أطراف السيلكون (TSV)[٥٥]	٤ – ٨ ميكرو متر	٢ – ٤ ميكرو متر
أقل مساحة من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٨– ١٦ ميكرو متر	٤ – ٨ ميكرو متر
أقل عمق من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٢٠– ٥٠ ميكرو متر	٢٠– ٥٠ ميكرو متر
أكبر نسبة العرض إلى الارتفاع من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٥ : ١ – ١٠ : ١	١٠ : ١ – ٢٠ : ١
دقة تلاحم الترابط	١– ٥و١ ميكرو متر	٥و٠ – ١ ميكرو متر
الحد الأدنى لمساحة التوصيل الضغط الحراري	١٠ ميكرو متر	٥ ميكرو متر
(طلمبة اللحام) الحد الأدنى لمساحة التوصيل	٢٠ ميكرو متر	١٠ ميكرو متر
عدد الطبقات	٢ – ٣	٢ – ٤

الجدول (٥ – ٦) مستوى الربط المتوسط لعناصر سيلكون كربيد ثلاثية الأبعاد فى خريطة الطريق، الأحدث

المستوى العالمى للتصنيف W2W, D2W, or D2D 3D	٢٠٠٩ – ٢٠١٢	٢٠١٣ – ٢٠١٥
أقل قطر من خلال أطراف السيلكون (TSV)	١ – ٢ ميكرو متر	٨و٠ – ٥و١ ميكرو متر
أقل مساحة من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٢– ٤ ميكرو متر	٦و١ – ٣ ميكرو متر
أقل عمق من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٦– ١٠ ميكرو متر	٦– ١٠ ميكرو متر
أكبر نسبة العرض إلى الارتفاع من خلال أطراف السيلكون (TSV)	٥ : ١ – ١٠ : ١	١٠ : ١ – ٢٠ : ١
دقة تلاحم الترابط	١– ٥و١ ميكرو متر	٥و٠ – ١ ميكرو متر
الحد الأدنى لمساحة التوصيل الضغط الحراري	٢ – ٣ ميكرو متر	٢ – ٣ ميكرو متر
عدد الطبقات	٢ – ٣	٨ – ١٦ (DRAM)

[٥٥] لربط التكنولوجيات ثلاثية الأبعاد فى بوابة التحكم حرج لأنه يسبب ضغط عالي من خلال السليكون (TSV) through-silicon vias

References

1. *Gargini, P. (2000). "The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS): Past, present and future". 22nd Annual Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium. IEEE. pp. 3–5. doi:10.1109/GAAS.2000.906261.*
2. Jump up ^ *Schaller, R.R. (2004). Technological innovation in the semiconductor industry: a case study of the international technology roadmap for semiconductors (ITRS) (PDF) (Ph.D.). George Mason University.*
3. Jump up ^ *Schaller, R. (2001). "Technological innovation in the semiconductor industry: a case study of the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)". Management of Engineering and Technology, 2001. PICMET'01. Portland International Conference on 1. IEEE. p. 195. doi:10.1109/PICMET.2001.951917.* **Article summarizing thesis of the same name.**
4. Jump up ^ *Spencer, W.J. and Seidel, T.E. (1995). "National technology roadmaps: the US semiconductor experience". Solid-State and Integrated Circuit Technology, 1995 4th International Conference on. IEEE. pp. 211–220. doi:10.1109/ICSICT.1995.500069.*
5. Jump up ^ *Waldner, Jean-Baptiste (2007). Nanocomputers and Swarm Intelligence. London: ISTE. pp. 50–53. ISBN 1-84704-002-0.*
6. Jump up ^ *von Trapp, Francoise. "Executive Interview: Bill Bottoms Talks about Revamping the ITRS Roadmap". 3D InCites. 3D InCites. Retrieved April 14, 2015.*
7. Jump up ^ *von Trapp, Francoise. "Executive Interview: Bill Bottoms Talks about Revamping the ITRS Roadmap". 3D InCites. 3D InCites. Retrieved April 14, 2015.*