النوع الثالث :

نبائط الموجات الدقيقة
Microwave Devices

تغطي الموجات الدقيقة (المايكروويف microwave) مدى الترددات مابين 1 GHz (١ كيكاهرتز) اي(10^9 Hz) و 1000 GHz والذي يمثل اطوال الموجة من 30 cm الى 0.03 cm . ويشار الى الترددات مابين 30 GHz _ 300 GHz بحزمة الترددات المليمترية لان طول الموجة يقع بين 1 mm و 10 mm واما الترددات الاعلى فتدعى بحزمة الموجات دون المليمترية submillimeter

يمكن تشغيل العديد من النبائط شبه الموصلة والتي تم وصفها في الفصول السابقة في مدى الموجات الدقيقة . الا ان قابلية النبيطة للعمل في هذه الترددات تستوجب تقليص ابعاد النبيطة والتقليل من المقاومات والمتسعات الشاردة (الطفيلية parasitic) الى الحد الادنى . فعلى سبيل المثال يجب تقليل طول البوابة في MESFET لكي يزداد تردد القطع ويجب تقليل مقاومة التلامس للمصدر والمصرف لاجل تجاوز تحديد الاستجابة الترددية بحاصل ضرب RC . ويلخص الجدول ادناه نماذج من نبائط الموجات الدقيقة ومبدأ عملها .

الجدول يوضح **نبائط الموجات الدقيقة شبه الموصلة**

النبيطة	مبدأ العمل
ثنائي فاراكتر Varactor	تتغير رادتها مع فولتية الانحياز
ثنائي $p-i-n$	متسعتها ثابتة تقريباً وفولتية الانحياز عالية
ترانزستور مزدوج الشحنة	تشترك الالكترونات والثقوب في عمليات التوصيل
ثنائي التلامس النقطي Point contact	مساحة صغيرة ـ متسعة صغيرة
ثنائي شوتكي	النقل بواسطة الحاملات الاغلبية ـ الزرق الثرموآيوني
JFET	حاملات اغلبية ـ التحكم بالتيار بواسطة فولتية انحياز مفرق البوابة
MESFET	حاملات اغلبية ـ التحكم بالتيار بفولتية انحياز بوابة شوتكي
MOSFET	انتقال الحاملات الاقلية في قناة منقلبة سطحية
ثنائي نفقي	النفق عند الانحياز الامامي لمفرق p^+-n^+ مقاومة تفاضلية سالبة .
ثنائي عكسي Backward diode	النفق خلال مفرق بانحياز عكسي او بانحياز يقارب الصفر
ثنائي IMPATT	تأثيرات التهوير وزمن العبور كتوليد قدرة عالية
ثنائي BARITT	تأثيرات الزرق خلال الحاجز وزمن العبور
TED	انتقال الالكترون من وادي الطاقة الواطئة والتحركية العالية الى وديان الطاقة العالية والتحركية الواطئة .

و سنتناول في هذه المحاضرة اربع نبائط خاصة بالموجات الدقيقة

أولا:-

1 الثنائي النفقي TUNNEL DIODE

يرتبط الثنائي النفقي بظاهرة النفق الكمي[1] . فالزمن المستغرق في النفق عبر النبيطة قصير جداً . مما يمكن استخدام النبيطة في مدى الموجات المليمترية . وبسبب نضوج تقنيتها فان الثنائي النفقي يستخدم في تطبيقات خاصة للموجات الدقيقة ذات القدرة الواطئة . كالمذبذب المحلي local oscillator ودائرة اقفال التردد frequency locking circuit .

2. ثنائي IMPATT

الكلمة IMPATT اختصار لـ "impact ionization avalanche transit time." ويعني (زمن العبور عند التيهور بالتأين الاصطدامي) وتستخدم ثنائيات IMPATT خاصية التأين الاصطدامي وزمن العبور للنبائط شبه الموصلة للحصول على مقاومة سالبة عند ترددات الموجات الدقيقة . فالثنائي IMPATT يعد من اكثر المصادر المصنعة من الحالة الصلبة قدرة على انتاج الموجات الدقيقة . ويعد IMPATT في الوقت الحاضر النبيطة الاكثر قدرة من بين جميع نبائط الحالة الصلبة لتوليد اعلى قدرة من الموجات الدقيقة المتواصلة (continuous wave cw) عند الترددات المليمترية . (أي بحدود 30 GHz) . الا انه هنالك مشكلة في تطبيقات IMPATT تستحق الملاحظة وهي ان الضوضاء بسبب التقلبات العشوائية في عمليات التضاعف التيهوري تكون عالية . وسنعرض في البند 6.5 شرحا لخواص القدرة والضوضاء لنبائط الموجات الدقيقة المختلفة

كان ريد Read اول من قدم المقترح الاصلي لتصميم نبيطة موجات دقيقة من فصيلة IMPATT مؤلفة من تركيبة $n^+ - p - i - p^+$ أو $n^+ - p - \pi - p^+$

3 ثنائي BARITT

الكلمة BARITT تلخيص للعبارة "barrier injection transit time" اي زمن العبور بعد الحقن خلال الحاجز. والثنائي BARITT يعود الى عائلة ثنائيات الترددات الدقيقة والمرتبطة بزمن العبور. فالالية المسؤولة عن التذبذب المولد للموجة الدقيقة تعتمد على الزرق الثرموايوني وانتشار الحاملات الاقلية عبر حاجز جهد بانحياز امامي والتأخير في زمن عبور الحاملات المحقونة عبر منطقة الانجراف.

ولعدم وجود التأخير التيهوري في ثنائي BARITT لذا نتوقعه ان يعمل بقدرة اوطأ وبكفاءة اقل من ثنائي IMPATT ولكن من جهة اخرى نجد ان الضوضاء المرتبطة بزرق الحاملات عبر الحاجز اقل بكثير من ضوضاء التيهور المرتبط بثنائي IMPATT. ان المستوى الواطىء من الضوضاء والاستقرارية الافضل يجعل من ثنائي BARITT ملائماً للعديد من التطبيقات ذات القدرة الواطئة كالمذبذبات المحلية وكاشفات دوبلر Doppler detectors.

4 نبيطة الالكترون المنتقل TRANSFERRED-ELECTRON DEVICE

لوحظت ظاهرة الالكترون المنتقل اول مرة في عام 1963. وتم في اول تجربة الحصول على قدرة لموجة دقيقة من خلال مجال كهربائي مباشر dc ذات شدة تزيد على قيمة حرجة مقدارها عدة الاف فولت لكل سم تم تسليطه عبر عينة قصيرة نوع *n* من ارسنيد الكاليوم او فوسفيد الانديوم. ان نبيطة الالكترون المنتقل (TED) من نبائط الموجات الدقيقة المهمة. وتستخدم بكثرة بوصفها مذبذباً محلياً ومضخم قدرة للترددات مابين 1 GHz الى 100 GHz. وقد بلغت تقنية TED النضوج لتصبح مصدراً مهماً من نوع الحالة الصلبة للموجات الدقيقة ولتستخدم في الرادارات والتنبيه ضد التطفل intrusion alarms واجهزة اختبار المزجات الدقيقة.

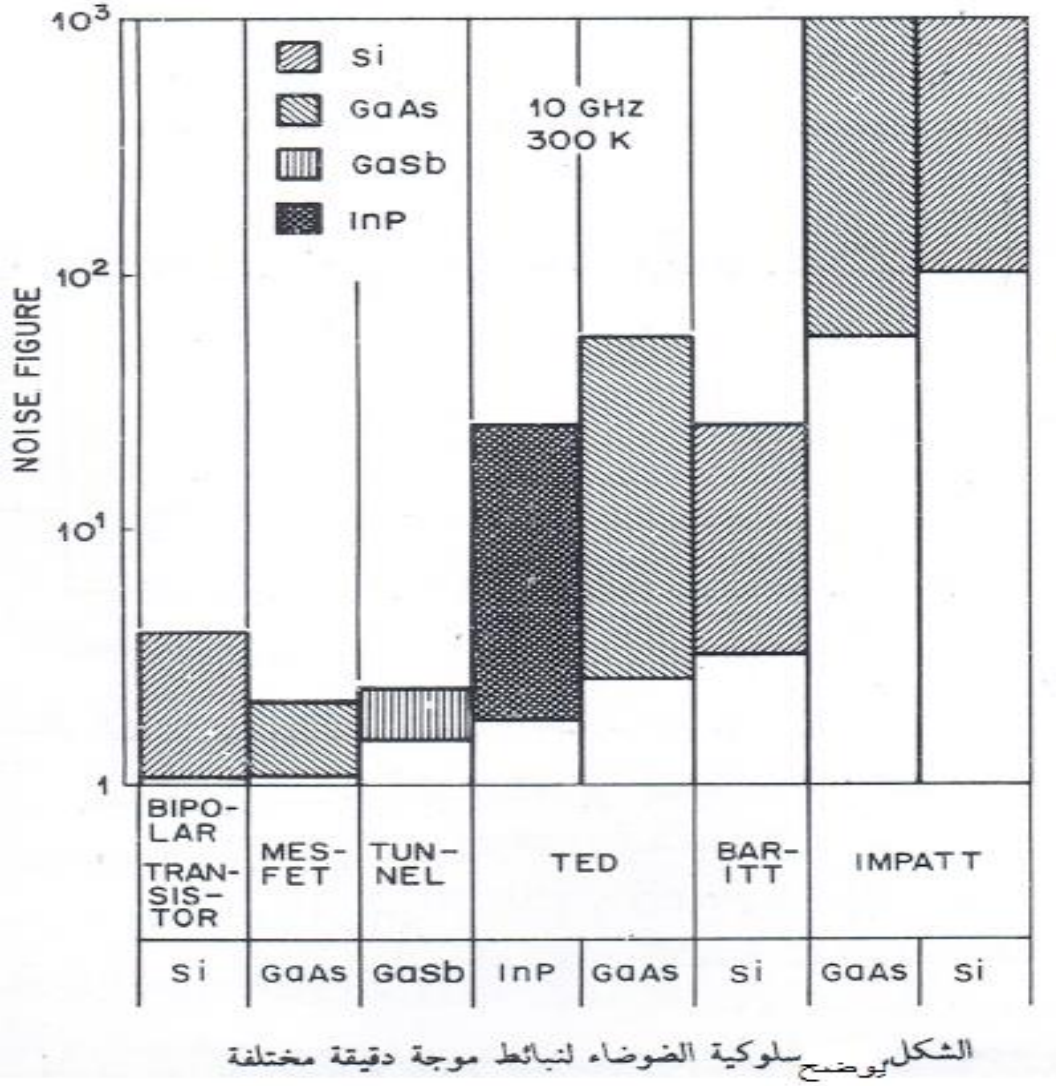
عند اختيار النبيطة لتطبيقات معينة في الترددات الدقيقة هنالك عدة عوامل تؤخذ بنظر الاعتبار وان القدرة الخارجة ليست بالمعيار الوحيد في هذا الاختيار . وأحد هذه العوامل هو الضوضاء ***noise*** . وتشير الضوضاء الى التقلبات التلقائية اما في التيار او في فولتية النبيطة وتنبع تسمية (الضوضاء) من دراسة الكسب العالي للمضخات عند الترددات السمعية . فعند تضخم التقلبات في التيار او الفولتية والمتولدة في نبيطة بوساطة مضخمات الترددات السمعية (audio-frequency amplifiers.) ثم تغذية الاشارة المضخمة الى مكبر صوت ينتج صوتاً هسيساً وبذا تستخدم تسمية الضوضاء . وقد اصبح من الشائع وصف اية تقلبات تلقائية . سواء كانت مسموعة ام لم تكن . بالضوضاء .

لما كان الاستخدام الرئيس لنبائط شبه الموصل هو في قياس مقادير فيزياوية صغيرة او في تضخيم اشارات صغيرة فان التقلبات التلقائية في التيار والفولتية تضع حداً ادنى للمقادير التي يراد قياسها او تضخيمها .

تعد درجة الضوضاء **noise figure** مهماً في قياس درجة جودة النبيطة والمقارنة بين واحدة واخرى ودرجة الضوضاء تساوي نسبة متوسط مربع فولتية الضوضاء الكلية عند الاخراج الى متوسط مربع فولتية الضوضاء الحرارية فقط . فعلى

ويبين الشكل ادناه درجة الضوضاء المقيسة للعوائل الست من النبائط ويلاحظ انه على الرغم من امتلاك ثنائيات **IMPATT** اعلى القدرات الخارجة فانها في الوقت نفسه لها اسوأ سلوك ضوضائي نتيجة للتقلبات العشوائية الكبيرة المرتبطة بالعمليات التيهورية . ومن جهة اخرى تمتلك الثنائيات النفقية قدرات اخراج واطئة وضوضاء واطئة وبهذا فان هنالك موازنة بين القدرة والضوضاء .

عامل آخر مهم يؤخذ بنظر الاعتبار هو سهولة التصنيع . فهنالك ميزة مرتبطة بالبساطة البنيوية للنبائط ذات الطرفين بالمقارنة بالترانزستورات الثلاثية الاطراف . فالمتسعات والمقاومات الشاردة في النبائط الثلاثية الاطراف تحد عادة من ترددات التشغيل الى مادون منطقة الموجة الملمترية .



الشكل يوضح سلوكية الضوضاء لنبائط موجة دقيقة مختلفة

رابعا :-

النبائط المتكاملة : Integrated Devices

عادة ماتستخدم النبائط المنفردة في تطبيقات الموجات الدقيقة والتطبيقات الضوئية وتطبيقات القدرة . وعلى سبيل المثال فان ثنائي IMPATT يستخدم مولداً للموجات الدقيقة. وباعث الليزر مصدراً ضوئياً والثايرستور مفتاح قدرة عالية. على أية حال فان معظم النظم الالكترونية تبنى على اساس الدائرة المتكاملة (IC) والتي هي عبارة عن مجموعة من النبائط الفعالة (مثل الترانزستور) والنبائط غير الفعالة (مثل المقاومة والمتسعة) المصنعة على ارضية شبه الموصل الاحادي البلورة وهذه النبائط تترابط ببعضها البعض حسب نمط معدني معين[1] .

ان قطع الدوائر المتكاملة من الممكن ان تحوى على بضع عناصر (ترانزستورات ثنائيات ومقاومات ومتسعات الخ) او على عدد هائل من العناصر ممكن ان يصل الى المليون او اكثر . ومنذ اختراع الدوائر المتكاملة في سنة 1958 فان عدد العناصر التي تحتويها قطعة الدائرة المتكاملة تنمو بصورة اسية . وعادة ماتسمى الدوائر المتكاملة التي تحتوي الى حد 100 عنصر لكل قطعة بالدوائر ذات التكامل الصغير (SSI) والتي تحتوي الى حد 1000 عنصر لكل قطعة بالدوائر ذات التكامل المتوسط (MSI) والتي تحتوي الى حد 100000 عنصر لكل قطعة بالدوائر ذات التكامل العالي (LSI) والتي تحتوي على اعداد اكبر من ذلك فتسمى بالدوائر ذات التكامل العالي جداً (VLSI) . في هذا الفصل سوف نبين دائرتين من نوع VLSI . دائرة المعالج الدقيق 32-bit والذي تحتوي على اكثر من 150000 عنصر ودائرة ذاكرة حركية ذات الوصول العشوائي (1-megabit) (DRAM) والتي تحتوي على اكثر من 2.200.000 عنصر .

نبائط ذاكرة NMOS NMOS Memory Devices

الذاكرات هي عبارة عن نبائط بامكانها خزن المعلومات الرقمية (او معلومات data) على شكل ارقام ثنائية *bits* . هنالك العديد من دوائر الذاكرة قد تم تصميمها وتصنيعها باستخدام تقنية NMOS . للغالبية العظمى من الذاكرات يفضل استخدام تنظيم ذاكرة الوصول العشوائي (RAM) . في الـ RAM تنظم خلايا الذاكرة على شكل مصفوفة ويمكن الوصول اليها بشكل عشوائي لا يعتمد على ترتيب مواقعها لخزن المعلومات (كتابة) او لاخراجها (قراءة) . ان في ذاكرة الوصول العشوائي المستقرة (SRAM) يمكن ابقاء المعلومات مخزونة بصورة لانهائية . ويمكن تنفيذ الـ SRAM على شكل دائرة مرجاح flip-flop لخزن رقم ثنائي واحد من المعلومات . وتتكون خلية SRAM من اربعة ترانزستورات MOSFET تعزيزية وترانزستورين MOSFET استنزافية . وانه بالامكان الاستعاضة عن MOSFET الاستنزافي بمقاومات تصنع من سليكون متعدد البلورات غير مطعم وذلك للتقليل من استهلاك القدرة 11.7 .

تصغير النبيطة Device Scaling

لاجل زيادة عدد المركبات لكل قطعة دائرة متكاملة يجب تقليص ابعاد النبيطة . وهناك حالياً نبائط للاغراض التجارية تدنو اطوالها السماتية (مثل طول البوابة) من 1 الى 2 مايكرون ونتوقع في المستقبل المنظور ان تتقلص الابعاد الدنيا الى مادون المايكرون . ولكن مع اختزال طول القناة تظهر ظواهر غير مرغوب فيها وتدعى بتأثيرات القناة القصيرة *short-channel effects* .

الوسائل المختلفة للتحكم في فولتية العتبة . لقد تم تقليص ابعاد الدوائر المتكاملة منذ بداية عهدها في 1959 وحتى يومنا بمرتبتين (مائة ضعف) وكان المحفز الاساس في تقليص ابعاد النبيطة هو الحاجة الى تصنيع دوائر متكاملة معقدة جداً مؤلفة من مئات الالاف من الترانزستورات على قطعة **chip** شبه موصلة مفردة . وفي الوقت الحاضر نجد ان اقصر قناة تم تكوينه هي بطول **1 μm** .

لما كانت تأثيرات القناة القصيرة تضيف مشكلات الى تشغيل النبيطة و تؤدي الى تردي ادائها فانه من الضروري ازالة هذه التاثيرات او على الاقل التقليل منها لضمان الحفاظ على نفس المميزات التي تمتلكها النبيطات ذات القناة الطويلة. ويتبع اسلوب منمق من اجل تقليل ثاتيرات القناة القصيرة و الابقاء على سلوكية القناة الطويلة وذلك بمجرد اختزال جميع الابعاد والفولتيات بمقياس ثابت k (اكبر من 1) بحيث تبقى المجالات الكهربائية الداخلة بنفس القيمة التي هي عليها في الترانزستورات ذات القناة الطويلة . وتكون الابعاد الجديدة :

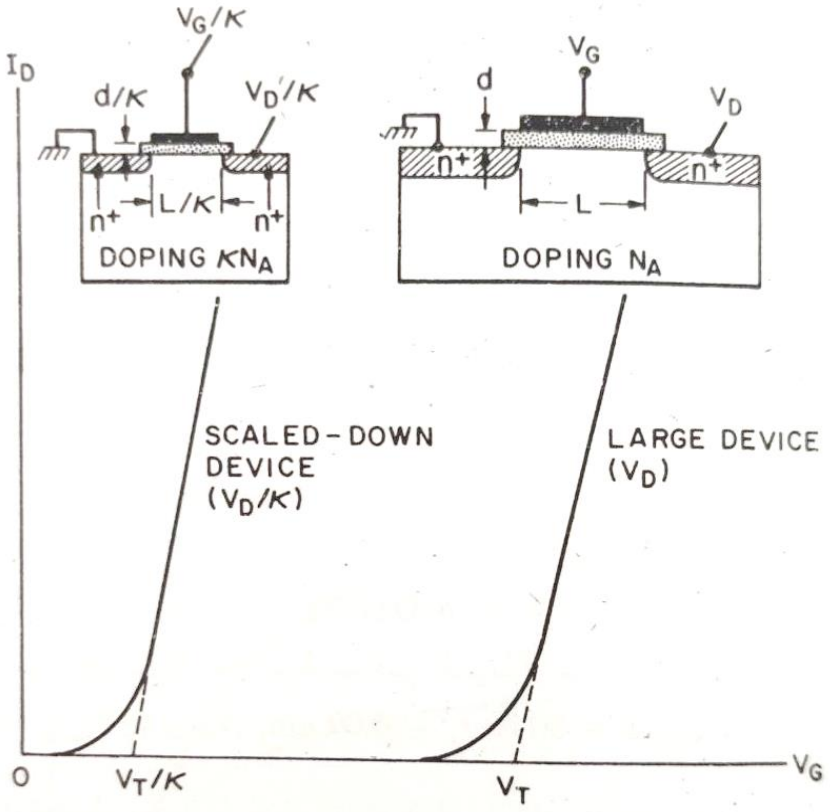
$$L' = \frac{L}{\kappa}, \quad d' = \frac{d}{\kappa}, \quad Z' = \frac{Z}{\kappa} . \qquad (109)$$

ولمجال كهربائي ثابت تتغير الفولتية تبعاً للمعادلة ،

$$V' = \frac{V}{\kappa} . \qquad (110)$$

وبذلك فان تصغير النبيطة يؤثر ايجابا في جميع المتغيرات الانفة الذكر الا واحدة. فسرعة التشغيل تزداد وكثافة المركبات تزداد وتبقى كثافة القدرة ثابتة. الا ان كثافة التيار تزداد بنسبة عامل المقياس k . وللموصلات المعدنية حد اعلى مما تستطيع تحمله من كثافة تيار يفرضه النزوح الكهربائي . اي حركة الذرات من موقع الى آخر بتأثير القوة الكهربائية . فهذه الظاهرة تحدد اقصى كثافة تيار في موصلات الالمنيوم عند حوالي $10^5\ A/cm^2$

ويبين الشكل 46 نبيطة بحجمها الكبير (على اليمين) وبعد التصغير (على اليسار) وتأثير التصغير على مميزاتها . ونلاحظ ان فولتية العتبة تختزل بنفس عامل التصغير .



الشكل 46 ، تصغير MOSFET بنسبة عامل مقياس ثابت