٧ – ٢ مقاومات الأفلام الرقيقة

بالرغم من أن المقاومات المصنعة بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة أكثر تكلفة من المقاومات المصنعة بتكنواوجيا الأفلام السميكة، فهي الأكثر شيوعا فى تطبيقات المقاومات فى الترددات الميكروووية حيث تتميز بأفضل الخصائص الكهربائية٠

٧ – ٢ – ١ تصنيع مقاومات الأفلام الرقيقة

ظهرت المقاومات المصنعة بتكنواوجيا الأفلام الرقيقة مع ظهور الركائز من السيليكون والجاليوم أرسنيد والألومينا. وذلك بترسيب طبقة رفيعة للغاية (مئات أنجستروم) من المواد المستخدمة لتصنيع المقاومات على كامل سطح الركيزة بإستخدام تقنية التناثر وعادة ما يتم ترسيب طبقة من مادة موصلة فوق طبقة المقاومة٠ وبإستخدام عملية التصوير الحفرى على الركيزة يتم إزالة جزء من الطبقتين من كل منهما بشكل مستقل، حيث يمكن تكوين سبيكة موصلة بين جسم المقاومة والمكونات الأخرى٠ المواد المستخدمة فى تصنيع المقاومات بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة عادة مواد نتريد تانتالوم أو نيكل كروم ويمكن تصنيع مقاومات ذات مقاومة نوعية تتراوح بين ٥ أوم/مربع الى ٢٥٠ أوم/مربع٠ كما أن تقنية الفيلم السميك ذات نطاق أكبر بكثير.

- **المعامل الحرارى للمقاومة**

رقاقة المقاومات بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة عادة لا يتم تسويقها حيث أن المقاومات بتكنولوجيا الأفلام السميكة أرخص ، ومع ذلك، تستخدم فى التطبيقات التى يمثل المعامل الحرارى فيها عامل مهم لرقاقة المقاومات٠ يمكن الحصول على معامل حرارى للمقاومة أقل من ٢٥ جزء من المليون لكل درجة حرارة٠ القيم النموذجية للمعامل الحرارى للمقاومات المصنعة من مادة نيكل – كروم تتراوح من صفر الى ٥ جزء من المليون لكل درجة حرارة وللمقاومات المصنعة من نتريد تانتالوم تتراوح من صفر الى ١٠٠ جزء من المليون لكل درجة حرارة٠

- **إستقرار درجة الحرارة**

من المعروف أن مقاومة السطح[١] للمقاومات المصنعة من نتريد تانتالوم بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة تتزايد مع مرور الوقت حيث تتأكسد طبقة السطح (موصلية أكسيد المعدن الناشئ أقل من المواد الأصلية)٠ وللتغلب على هذا الأثر، يمكن المحافظة على قيم المقاومات بتحميصها عند درجات حرارة عالية تصل إلى ٤٠٠ درجة مئوية لمدة ساعة واحدة٠ يمكن أن ترتفع قيمة المقاومة الى نسبة تصل إلى ٤٠% خلال فترة تحقيق الإستقرار، يجب أن يراعى التغير فى قيمة المقاومة حتى مرحلة الإستقرار عند تصميم الشكل الهندسى ، ويجب أن تصنع المقاومات بقيم أدنى من قيمتها المستهدفة مما يحقق منع مزيد من التغيير في قيمة المقاومة مع مرور الوقت٠

٧ – ٢ – ٢ مقاومات ميسا[٢]

تستخدم مقاومات ميسا في تصميم الدوائر المتكاملة للموجات الميكروووية[٣] ، وعادة تتطلب مقاومة عالية القيمة مع دقة منخفضة تصل درجة التسامح فيها الى (+/−٢٠٪) والتى تتطلب قدرة ومعاملات درجات حرارة عالية وهذا يتناسب مع بعض تطبيقات الترددات اللاسلكية، يستخدم الترانزستور المتأثر بالمجال كعنصر تحكم لتطبيقات التبديل (تشغيل أو

---

[١] مقاومة السطح هى مقياس لمقاومة الأفلام الرقيقة منتظمة السمك ٠ تستخدم مقاومة السطح عادة لوصف المواد المخدرة من أشباه الموصلات ، وترسيب المعادن، معجون الطباعة المقاوم وطلاء الزجاج.

[٢] ميسا عبارة عن مساحة على رقاقة أشباه الموصلات حيث لم تتم عمليات إزالة ِ في الطبيعة فإن مصطلح ميسا يمثل جبل ذو سطح مستوى ؛ مصطلح الميسا فى تكنولوجيا أشباه الموصلات أيضا شكل هرمى يرتفع فوق الركيزة شبه العازلة المحيطة به، ولكن الارتفاع عادة أقل من واحد ميكرون

[٣] تستخدم الدوائر المتكاملة المتجانسة الميكروووية **Monolithic microwave integrated circuits (MMICs)** مجموعة من الإلكترونيات مثل الهواتف الخلوية، وأنظمة تحديد المواقع لأنظمة الصواريخ والرادار.٠ ولها أداء عالي وموثوقية، ولكن يمكن أن تكون مكلفة وصعبة للإنتاج.

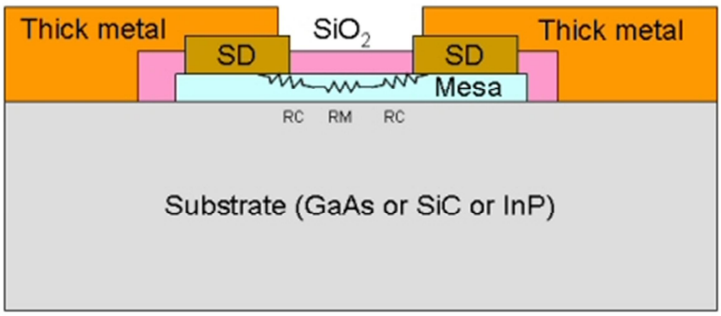
إيقاف التشغيل)٠ مصطلح ميسا يطلق على منطقة على رقاقة سليكون وهى على شكل جبل مسطح ترتفع فوق الركيزة شبه العازلة المحيطة بها ولكن الإرتفاع عادة أقل من واحد ميكرون٠ ومن الممكن تكوين المقاومة بإستخدام تقنيات زرع الأيونات[٤] فى مستوي الركيزة، وهذه المقاومات المزروعة لها نفس خصائص مقاومات ميسا ٠

الشكل (٧-٣٠) صورة ميكروسكوبية لتكوين طبقة ميسا

يتم تكوين أقطاب مقاومات الميسا بإستخدام وصلة معدنية بين المنبع - والمستنزف (أيضا تسمى مقاومة معدنية) التى يتم سبكها عند درجة حرارة عالية ذات مقاومة منخفضة القيمة٠ يتم دوماً إضافة طبقة لحماية المقاومة غالبا من ثانى أكسيد السليكون وغالبا ما تكون مكشوفة للسماح بتوصيل القطب المعدنى المستخدم لخطوط الإرسال كما ينبغي تجنب الوصلة المعدنية بين المنبع - والمستنزف٠

[٤] مقاومات السيلكون المتجانسة بقيم الميجا أوم (Meg-Ohm silicon monolithic resistors) تصنع بمقاومة سطح حتى ١٢ ك أوم/ المربع وتستخدم مقاومة مزروعة فى شريحة موصلية (ب) التي دفنت تحت طبقة (ن) كطبقة حارسة٠

يوضح المقطع العرضي للشكل القيمة الكلية للمقاومة لها ثلاثة مكونات على التوالى والمشار اليها (رسى)[٥] و (رم)[٦] و (رسى) ٠



الشكل (٧-٣١) المقطع العرضي للشكل القيمة الكلية للمقاومة لها ثلاثة مكونات على التوالى

مقاومة الميسا نفسها (ر م) لها قيمة يتم حسابها من بمعرفة مقاومة السطح وعدد المربعات التي يحددها التصميم (الطول/العرض)٠ القيم النموذجية لمقاومة السطح تتراوح من ١٠٠ الى ٥٠٠ أوم / مربع إعتماداً على آلية الإستخدام ، وهي عادة ما تكون أعلى بكثير من قيم المقاومات المعدنية بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة٠ مقاومة السطح (ر ف)[٧] هى أساسا نفس المقاومة للتيار المباشر، لأن سمك مقاومات الميسا عادة أصغر بكثير من عمق السطح[٨].

- وصلات المقاومة

تحدد مقاومة الوصلة بوحدات (الأوم – ميكرون) كما هو موضح في المقطع العرضي فى الشكل (٧-٣١) ، ويمكن حساب قيمتها بقسمة عرض الوصلة، وليس مساحة الوصلة وفي هذه الحالة فأن البعد الوحيد الذي يجب أخذه فى الإعتبار هو عرض منطقة الوصلة وليس

---

[٥] دائرة مقاوم – مكثف (RC circuit, or RC filter or RC network) هى دائرة كهربائية تتكون من مقاومة ومكثف ويتم تغذيتها بمصدر جهد أو تيار

[٦] مقاومة الاتصال ميسا (Mesa contact resistance)

[٧] مقاومة السطح للترددات اللاسلكية مقابل تردد ربط المعادن على سبيل المثال النحاس أو الذهب يمكن أن تكون مفيدةً للغاية لتقييم التوهين لشريحة موصلات مثل الشريط الميكرو

[٨] سريان التيار الكهربائى فى الموصل بين السطح وعمق معين ويشار له بتأثير السطح (skin depth effect)

كامل السطح ٠ في مثل هذا التكوين الأفقي ، يتدفق التيار المباشر فى مسار المقاومة الأقل، وفي حالة الترددات اللاسلكية، تخترق موجه التيار المقاومة الهرمية ميسا حتى يصل إلى المعدن داخل الوصلة بين المنبع والمستنزف، حتى حافة المقاومة ميسا، حيث تتوقف وصلة المنبع والمستنزف٠ عند هذه النقطة يسرى التيار كلياً داخل مقاومة الميسا حيث يجب مراعاة مقاومة الوصلة٠ القيم النموذجية لمقاومة الوصلة تتراوح بين ١٠٠ إلى ٣٠٠ ميكرون أوم، وكمثال فإن قيمة المقاومة عرض وصلتها عشرة ميكرون يتراوح بين عشرة الى ثلاثون أوم٠ يمكن إهمال قيمة مقاومة الوصلة وهى لا تمثل مشكلة كبيرة، خاصة إذا كان تصميم المقاومة يساوى ١٠٠٠ أوم أو أكثر بغرض حجز[٩] الترددات اللاسلكية ٠ يصعب تجاهل قيمة مقاومة الوصلة في حالة المقاومة المرتدة [١٠]٠ عادة يتم قياس مقاومة الوصلة أو حساب التيار المباشر فقط ، حيث أنها صالحة بما يكفي لإستخدام مقاومة ميسا في مسار الترددات اللاسلكية؛ كمثال على هذا في مسار التغذية المرتدة على التوازى في مرحلة مكبر الصوت٠

- التعامل مع القدرة

هناك مشكلة مع مقاومات الميسا حيث تحتاج الأخذ فى الإعتبار إذا ما كان هناك رغبة فى تمرير أي قدر ملموس للتيار من خلال هذه المقاومات حيث أنها مقاومات من مواد شبه موصل وذات خواص غير خطية٠ المعاملات المرتبطة بالخواص الغير خطية هو الجهد الحرج ووحدته فولت/ ميكرون بيد أنه من الأسهل بكثير لمصمم الدوائر الكهربية مراعاة جهد التشبع لكل وحدة من عرض المقاومة٠

تيار التشبع = الجهد الحرج مقسوم على مقاومة السطح

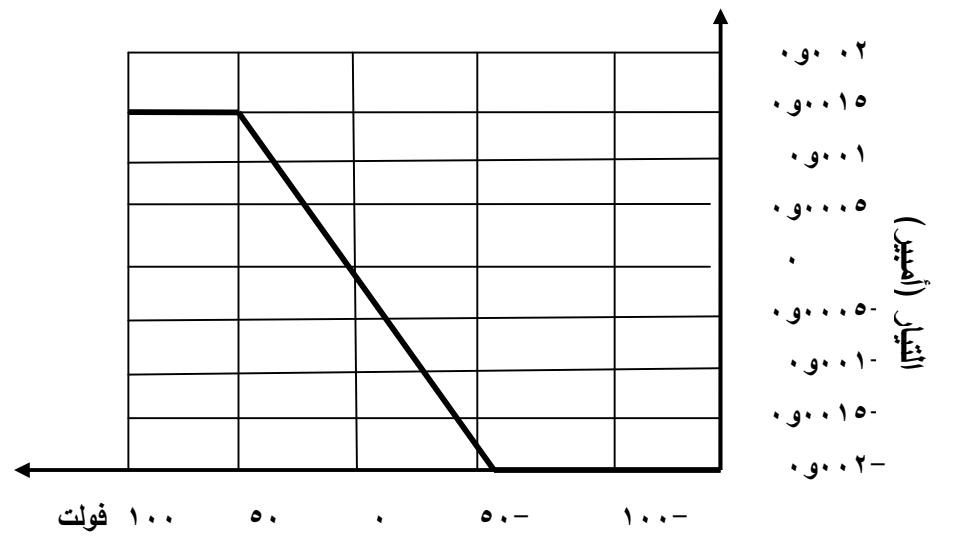
يوضح المنحنى كمثال فى حالة قيمة المقاومة ٢٠٠ أوم/مربع وأن قيمة الجهد الحرج ٠.٣ فولت/ميكرون. وبالتالى أى مقاومة عرضها ١٠ ميكرومتر سوف تتشبع عند تيار

---

[٩] فى الإلكترونيات ، عنصر المحاصرة هو ملف حث يستخدم لمنع الترددات العالية للتيار المتردد فى الدائرة الكهربائية

[١٠] ردود الفعل تشير إلى "تغذية عكسية (feeding back) لكمية صغيرة من إشارة من جزء لاحق من الدائرة الى جزء سابق، عادة ما تكون من خرج المحول إلى مرحلة العاكس(phase inverter) .

قيمته ١.٥ ميلى أمبير٠ فى المثال عرض المقاومة ١٠ ميكرو متر وطولها ١٠٠ ميكرو متر ينبغي أن تكون جيدة لحوالي ٣٠ فولت٠



الشكل (٧-٣٢) علاقة التيار بالجهد الحرج فى مقاومات ميزا (رأسى ٣و٠ فولت/ميكرون ، مقاومة سطح ٢٠٠ أوم/ مربع و العرض ١٠ ميكرون، والطول ١٠٠ ميكرون)

- **معامل درجة الحرارة**

المعامل الحرارى لمقاومات الميسا ضعيف جدا حوالى -٠.١%/درجة حرارة مئوية٠ فى حيز حتى أكثر من ١٠٠ درجة مئوية، ويصبح التغير فى قيمة المقاومة ١٠٪! ٠ يتم تطبيق قانون أوم حتى فى تطبيقات ترددات الموجات الميكروووية (الجهد = التيار X المقاومة) - ومع ذلك، غالباً ما يوجد بعض الخصائص اللاخطية المرتبطة بمصطلح المقاومة٠ قد يكون ذلك بسبب التعامل مع مواد أشباه الموصلات، التي قد يكون لها أثر تشبع، أو ربما بسبب تأثير درجة الحرارة على المقاومة بسبب تبديد الطاقة٠ حيث أن معاملات مواد أشباه الموصلات لا تتبع قانون أوم وبالتالى فنحن بحاجة لمنحنى تتبع ٠

- **مقاومة السطح وظاهرة عمق السطح**

تحدث ظاهرة عمق السطح فى الوصلات الكهربائية عند سريان التيار المتردد ولا تحدث عند سريان التيار المستمر وذلك بسبب تكوين التيارات الدوامية نتيجة الى المجالات الكهرومغناطيسية التي تنشأ عندما يتدفق التيار عبر الموصل٠ هذه التيارات الدوامة هي أقوى بالقرب من المركز وبالتالى تعوق تدفق التيار مما يتسبب فى تغير مسار التيار الكهربائى ويتدفق عبر المحيط الخارجي للموصل٠ وبالتالى تصبح المساحه اللي يمر فيها التيار صغيرة مما يعني إزدياد مقاومة السلك عند سريان التيار المتردد حيث أن مساحة المقطع العرضي المؤثر أقل من مساحة المقطع العرضي للموصل عند سريان التيار المستمر مع ثبات المقاومه النوعيه وطول السلك فى الحالتين – فالمتغير الوحيد هو مساحه المقطع العرضي المؤثر٠ وتتضح الظاهرة أكثر في خطوط الإرسال الشريطية فإن التيار الكهؤبائى يسرى فى المنطقة الأقرب الى الركيزة من المادة الموصلة مما يجعل مقاومة السطح فى تطبيقات الموجات الميكروووية أكبر من مقاومة السطح فى تطبيقات التيار المباشر٠

- **دالة المقاومة مع درجات الحرارة**

تتعرض جميع المقاومات لقدر من التباين مع زيادة درجات الحرارة٠ عادة ما يكون الإختلاف بشكل خطي ويتم التعبير عن معامل درجة حرارة مقاومة (∝) بجزء من المليون لكل درجة حرارة مئوية٠

$$R_{T2} = R_{T1} \times [1 + \propto (T_2 - T_1)]$$ **المعادلة (٧-١)**

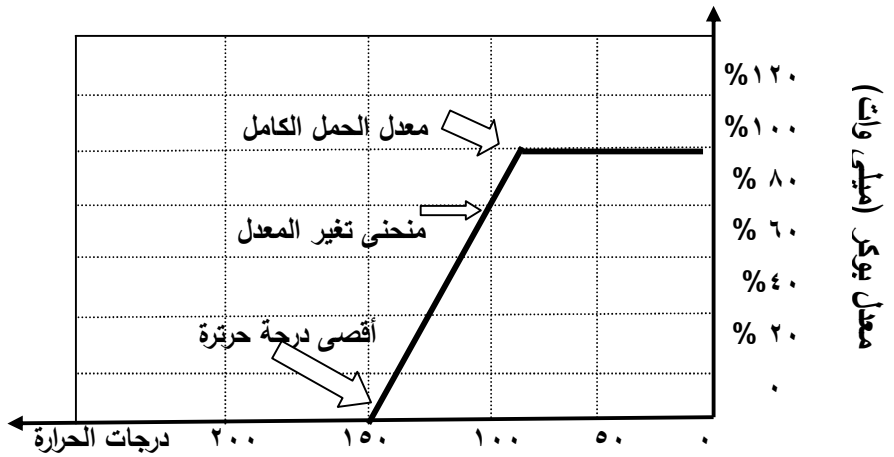
معامل درجة حرارة المقاومة يمكن أن يكون سالب أو موجب٠ في الحالة الأولى هو تناقص قيمة المقاومة مع إرتفاع درجة الحرارة. وفي الحالة الثانية فإنه يزيد مع زيادة درجة الحرارة٠ نجد أن معامل درجة حرارة المقاومة فى الفلزات النقية معامل موجب التأثير أما فى مواد الكربون والمواد المقترنة به عادة ما يكون تأثير معامل درجة الحرارة سالب٠ يتم تصنيع بعض سبائك الوصلات الكهربائية بحيث يقترب معامل درجة الحرارة الى الصفر٠

٧ – ٢ – ٣ المقاومات الحرارية[١١]

هي المقاومات التي أنتجت خصيصا لتطبيقات معامل درجة الحرارة، وغالباً ما تستخدم كعناصر تحكم في درجة الحرارة وبالتالى تتبع الخواص الغير خطية٠

- **معدلات القدرة**

يحدد معدل القدرة فى المقاومة بمقدار القدرة المستهلكة عند أقصى درجة حرارة ، التي لا تتسبب ضرر في المقاومة٠ ما يعني لا يجب أن يصل معدل القدرة نقطة درجة الحرارة الساخنة[١٢] متجاوزا الحد الذى يؤدي إلى ضرر دائم فى المقاومة٠



الشكل (٧–٣٣) العلاقة بين معدل القدرة مع درجات الحرارة٠ تستخدام درجة ميل المعدل لحساب نموذج مكافئ للمقاومة الحرارية (عدد درجات الحرارة لكل وات)٠

يحدد معدل القدرة درجتن للحرارة – الأولى الى أى درجة حرارة قصوى تتوافق عند تقدير الحد الأقصى للطاقة والثانية هى الدرجة التى يصل فيها الفقد الى الصفر٠ ما بين درجتى الحرارة فإن معدل القدرة يتمثل خطيا مع درجات الحرارة٠ أمرين يمكن أن يستدل بهما من هذا

---

[١١] الثرمستور (thermistor) هو نوع من المقاومات التي تعتمد على درجة الحرارة

[١٢] البقعة الساخنة (Spot Hot) نموذج دقيق وسريع حرارية مناسب للاستخدام في الدراسات التكوينية٠ تستند الى الدائرة المكافئة للمقاومات الحرارية والسعات التي تتوافق مع الكتل التكوينية الدقيقة والجوانب الأساسية للحزمة الحرارية

التعريف: الحد الأقصى لسعة تخزين القدرة يتناسب مع معدلات درجة الحرارة وأيضا يمكن إستخدام درجة ميل المعدل لحساب نموذج مكافئ للمقاومة الحرارية (عدد درجات الحرارة لكل وات)٠ الفرق بين درجة الحرارة فى حالة عدم وجود حمل والحد الأقصى لدرجة الحرارة مع أقصى حمل ٠ من المنحنى فإن المقاومة الحرارية تساوى (١٥٠ – ٨٥ درجة)/ ١ وات تساوى ٦٥ درجة حرارة لكل وات٠

٧ – ٢ – ٤ تصميم وتصنيع المقاومات بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة

أصبحت المقاومات بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة مجال هام للبحوث بسبب جودة خصائصها الكهربائية لا سيما في تكنولوجيا الموجات الميكروووية وصغر أبعاد الدائرة المصنعة٠ والهدف ترسيب مقاومة من مادة نيكل كروم على ركيزة عازلة من الزجاج، وعمل نقاط التوصيل المناسبة لإجمالي المقاومة المطلوبة (أوم)٠ من أجل تصميم مقاومة رقيقة يجب معرفة مقاومة السطح أولا٠ مقاومة السطح للمقاومة بتكنولوجيا الأغشية الرقيقة هى مقياس لسمك منتظم موحد٠ وتقاس مقاومة السطح بوحدات أوم/ مربع وهو تطبيق لنظام ثنائي الأبعاد حيث يعتبر الفيلم الرقيق كيان ثنائى الأبعاد٠ وهى مكافئة للمقاومة النوعية المستخدمة في النظم ثلاثية الأبعاد٠ يمكن حساب مقاومة موصل منتظم ثلاثي الأبعاد كما يلى:

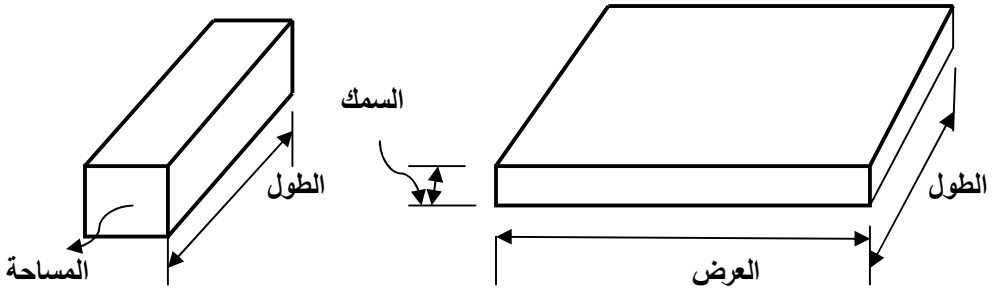
$$R = {\rho L}/{A} \qquad \text{المعادلة (٢-٧)}$$

حيث (ρ) هى المقاومة النوعية و(A) المساحة و(L) الطول٠ والمساحة تساوى حاصل ضرب العرض (W) مضروب فى سمك السطح (t)٠ وبإعادة ترتيب عناصر المعادلة – نحصل على :

$$\mathbf{R = \frac{\rho L}{t w} = R_s \frac{L}{w}} \qquad \text{المعادلة (٣-٧)}$$

حيث (R_s) مقاومة السطح٠ ويستخدم مصطلح (الأوم/ مربع) لأنه يعطي المقاومة بوحدة الأوم لتمرير التيار المار من جانب واحد من منطقة مربعة إلى الجانب الآخر، بغض النظر

عن أبعاد المربع. على سبيل المثال فى مربع الطول (L) والعرض (W) فإن المقاومة (R) تساوى مقاومة المساحة (R_s) لأى مساحة مربع كما هو موضح فى الشكل.



الشكل (٧-٣٤) إستخدام الشكل الهندسى لإختيار حجم المقاومة المناسب

يمكن حساب حجم المقاومة المادية بسهولة بقسمة قيمة المقاومة المطلوبة على مقاومة السطح المطلوبة وبناء على المتطلبات والمساحة المتوفرة، يمكن إختيار حجم المقاومة المناسب. من أجل تصميم مقاومة بالقيمة المطلوبة، يجب إتباع الخطوات التالية:

١. حساب الأبعاد المطلوبة
٢. التخطيط الخاص بالفيلم مع نقاط الإتصال
٣. رسم التخطيط بمساعدة برامج تصميم البرمجيات وطبع نسخة على سطح شفاف
٤. قص التخطيط بعناية فائقة من السطح الشفاف، والتي ستستخدم كقناع أثناء الترسيب.
٥. تحميل المواد التي سيتم ترسيبها على متن قارب/فتيلة في الأنبوبة المفرغه.
٦. الحصول على أدنى ضغط ممكن بإستخدام مضخة دوارة ومضخة إنتشار (إنخفاض الضغط يحقق أفضل جودة للفيلم)
٧. إبقاء القناع أمام الركيزة أثناء الترسيب ومتابعة السمك المطلوب بجهاز رصد السمك.
٨. تنفيس قاعة الترسيب ببطء وإخراج الفيلم.
٩. عمل نقاط الوصلات بإضافة مادة الفضة (للحصول على وصلات جيدة)
١٠. نقل القياسات على رقاقة.
١١. إجراء الحسابات النظرية لعدد خمسة مقاومات كعينات قياسية.

إجراء الحسابات النظرية (معاملات التصميم) لعدد الخمسة مقاومات المطلوبة (مثلا ٥٠، ١٠٠، ١٥٠، ٢٠٠ و ٢٥٠ أوم)٠ لتصميم وتصنيع مقاومة ١٧٥ أوم مثلا – ومقارنتها مع االمقاومات القياسية أعلاه، ودراسة الشكل التالى:

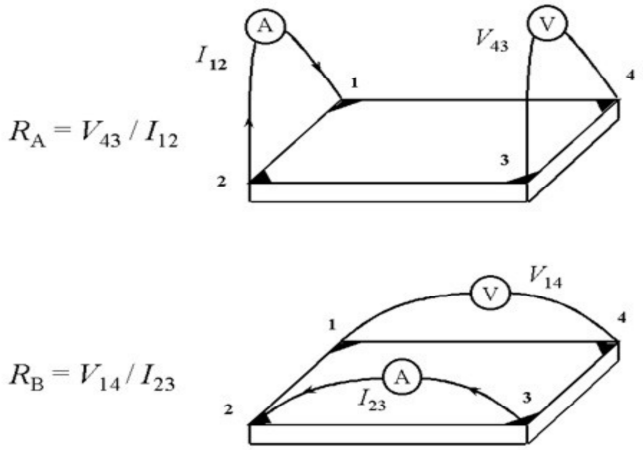


Figure 2

الشكل (٧–٣٥) أسلوب تصميم وتصنيع مقاومة

من أجل تحديد مقاومة السطح والمقاومة النوعية للفيلم تتبع الخطوات التالية:

١. توصيل التيار (I_{21}) وقياس الجهد (V_{34})

٢. عكس الأقطاب التيار (I_{12}) وقياس الجهد (V_{43})

٣. تكرار للقيم الست المتبقية (V_{41} و V_{14} و V_{12} و V_{21} و V_{23} و V_{32})

٤. تعطي ثمانية قياسات من الجهد القيم الثمانية التالية من المقاومة، التي يجب أن تكون إيجابية:

$$R_{21,34} = V_{34/21},\ R_{12,43} = V_{43/12},$$
$$R_{32,41} = V_{41/32},\ R_{23,14} = V_{14/23},$$
$$R_{43,12} = V_{12/43},\ R_{34,21} = V_{21/34},$$
$$R_{14,23} = V_{23/14},\ R_{41,32} = V_{32/41}.$$

المعادلة (٧–٤)

لاحظ مع هذا الترتيب والتبديل فإن الفولتميتر يقرأ فقط قيم الجهد الموجبة فقط، أن النصف الثاني من هذا التسلسل من القياسات زائد عن الحاجة، مما يسمح بتحقيق الأتساق في قياس التكرار ونوعية وصلات المقاومه٠ يتطلب قياس الأتساق بعد عكس التيار أن:

$$R_{21,34} = R_{12,43}\, R_{43,12} = R_{34,21}$$

$$R_{32,41} = R_{23,14}\, R_{14,23} = R_{41,32} \qquad \text{المعادلة (٧-٥)}$$

تتطلب نظرية المعاملة بالمثل

$$R_{21,34} + R_{12,43} = R_{43,12} + R_{34,21}, \qquad \&$$

$$R_{32,41} + R_{23,14} = R_{14,23} + R_{41,32}. \qquad \text{المعادلة (٧-٦)}$$

في حالة فشل أي من أعلاه أن يكون صحيحاً ضمن ٥% (يفضل أن يكون ٣%)، يجب التحقق في مصادر الخطأ.

ويمكن تحديد مقاومة المساحة و قياس المقاومة النوعية من خواص المقاومتين

$$R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})/4 \qquad \&$$

$$R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})/4 \qquad \text{المعادلة (٧-٧)}$$

عن طريق معادلة فإن دير باوو

$$\exp(-R_A/R_S) + \exp(-R_B/R_S) = 1 \qquad \text{المعادلة (٧-٨)}$$

للحل العددي للمعادلة المذكورة أعلاه يجب الرجوع الى برنامج بيلو الروتيني ٠ إذا كان سمك طبقة (d) فإن المقاومة النوعية (ρ) تساوى مقاومة المساحة (R_S) مضروبة فى السمك (d) ومنها يمكن حساب مقاومة المساحة ($\rho = R_S\, d$) ٠

٧ – ٢ – ٥ أنواع المقاومات

مقاومة القاعدة – مقاومة الباعث – مقاومة القاعدة المضغوطة – المقاومات ذات مقاومات المساحة العالية – مقاومات معدنية – مقاومات بولي – المقاومات بين الباعث والمستنزف – مقاومات الأفلام الرقيقة

- **مقاومة القاعدة**

متاحة في تكوين الترانزستور ثنائى القطب مع الترانسزتور المتأثر بالمجال[١٣] وتتراوح مقاومة سطح القاعدة فى الترانزستور ثنائى القطب من ١٠٠ الى ٢٠٠ أوم/مربع وتتراوح فى الترانسزتور المتأثر بالمجال من ٣٠٠ الى ٦٠٠ أوم/مربع – ومن مزاياها أن مقاومة المساحة دقيقة نسبيا ويتم تطعيم مقاومة القاعدة بكثافة شوائب عالية بما يكفي للتقليل من التحوير٠ وتعتبر مقاومة القاعدة أفضل المقاومات المتاحة التى يتم تكوينها فى الترانزستور ثنائى القطب ومن عيوبها إقتران المقاومة بالسعة في حالة عدم الحذر عند توجيه إشارات ويجب أن توضع في مكان مناسب٠

- **مقاومة الباعث**

تستخدم في الترانزستور ثنائى القطب كمعيار[١٤] لترانزستورات القوى وتستخدم كمقاومة للتيار وأيضا تستخدم كأنفاق فى مستوى واحد فى العمليات المعدنية ومن مزاياها لا توجد صعوبة في وصلة الباعث، ربما الأفضل في تكوين الترانزستور ثنائى القطب ومن عيوبها إنخفاض مقاومة المساحة ، فهى مناسبة للمقاومات الصغيرة < ١٠٠ أوم، ويجب أن توضع في مكان مناسب٠ إذا كان جهد التغذية أكثر من ٦ فولت، تتعرض الوصلة بين الباعث – القاعدة الى الإنهيار الجليدي٠

---

[١٣] التكوين (BiCMOS) تطورت تكنولوجيا أشباه الموصلات التي تدمج نوعين من تكنولوجيا أشباه الموصلات سبق فصلهما وهما الترانزستور ثنائى القطبين (bipolar junction transistor) و والترانزستور (م أ س التكاملى) (CMOS) فى دائرة متكاملة واحدة٠

[١٤] الكوابح الكهربائية عنصر يهدف إلى الحد من كمية التيار في دائرة كهربائية٠ تختلف الكوابح في تعقيد التصميم٠ . يمكن أن تكون بسيطة كسلسلة من المقاومات أو ملفات المحث، أو المكثفات أو مزيج منهم أو معقدة ككوابح إلكترونية تستخدم فى المصابيح الفلورية ومصابيح التفريغ عالية الكثافة٠

- **مقاومة القاعدة المضغوطة[١٥]**

مقاومة المساحة الفعلية من ٢ الى ١٠ كيلو أوم/مربع المسموحة للتصميم، تستخدم لإنتاج المقاومات ذات القيمة العالية التي لا تصنع إقتصاديا بإستخدام آليات إنتشار قابلة للتعميم، وتستخدم أيضا لتكوين مقاومات مضغوطة عالية القيمة٠ ومن مزاياها تتحمل جهد تفاضلي أكبر لو أنها صممت في قطاعات متعددة ومن عيوبها يمكن أن تتطابق إذا كانت متطابقة في الأبعاد ولنفس جهد التغذية ، يجب أن توضع في مكان مناسب، إذا كان جهد التغذية أكثر من ٦ فولت، تتعرض الوصلة بين الباعث – القاعدة الى الإنهيار الجليدي٠

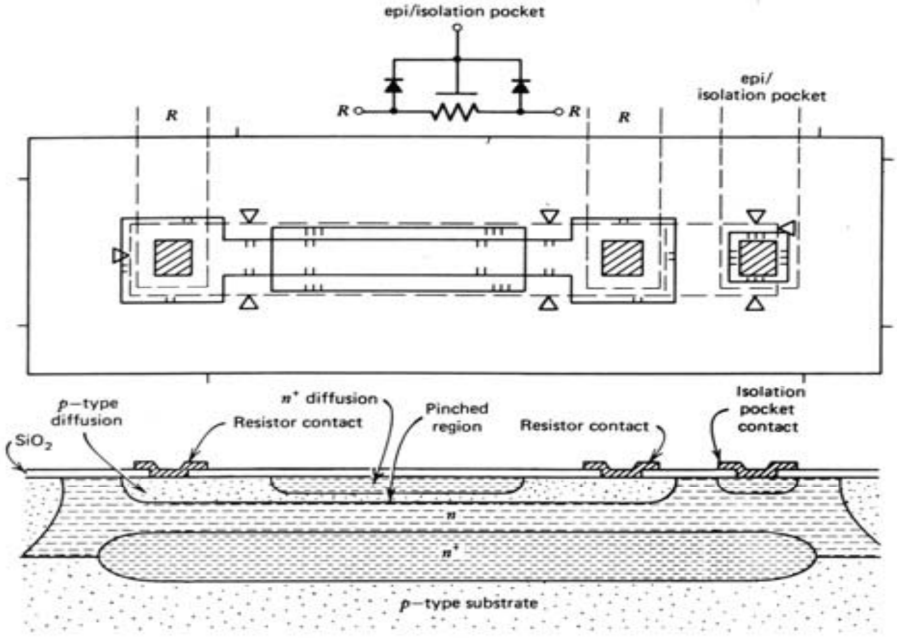


Figure 2.32 Pinch resistor structure.

الشكل (٧–٣٦) الشكل التكوينى لمقاومة القاعدة المضغوطة فى الترانزستور ثنائى القطب

---

[١٥] تتشكل المقاومات عن طريق خطوة الإنتشار فى قاعدة الترانزستور ثنائى القطب ، المقاومة المضغوطة (pinched resistor) وهى مقاومة الإنتشار للقاعدة والباعث (base and emitter diffusion) أو السيلكون متعدد البلورات (poly–Silicon) أو السيلكون متعدد البلورات شبه العازل (SIPOS) insulating Poly Silicon Semi المتكون بإضافة ذرات أكسجين أثناء الترسيب السيلكون متعدد البلورات إستنادا لقيم المقاومات المطلوبة

- **المقاومات ذات مقاومات المساحة العالية**

يمكن تكوين مقاومة مساحتها من ١ الى ١٠ كيلو أوم/مربع . وتتألف من زرع مادة البورون فى المنطقة الضحلة الفوقية[١٦] – تتألف نقاط الوصلات من تطعيم القاعدة للحصول على وصلة مقاومه جيدة٠ العمق النموذجى للوصلة هو ٥و٠ ميكرون وينبغي أن يكون دائماً تحت المنطقة المدفونة من النوع (ن)[١٧] لتمنع إعادة تغذية مكان المقاومة ويعمل كحاجز لحقن الشحنات الأقلية إذا كانت المقاومة ذات تغذية أمامية للحظات ٠

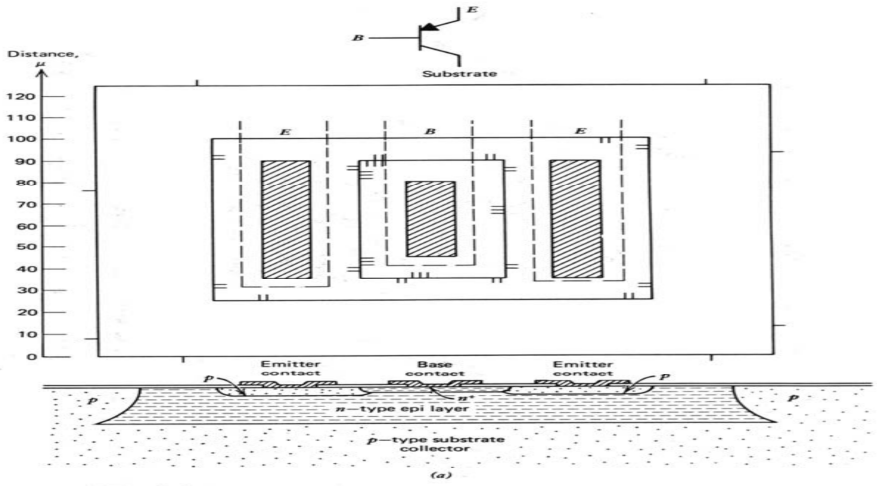


Figure 2.27*a* Substrate *pnp* structure.

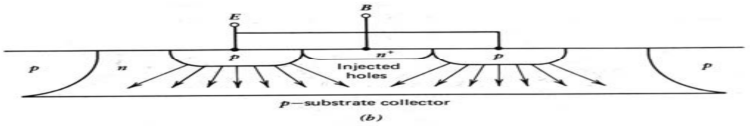


Figure 2.27*b* Minority-carrier flow in the substrate *pnp* transistor.

الشكل (٧-٣٧) سريان تيار الشحنات الأقلية فى ركيزة الترانزستور (ب ن ب)

ومن مزاياها أن قيم مقاومة السطح النموجية ٢ كيلو أوم/مربع ومفيدة لتكوين أعداد كبيرة من المقاومات في مناطق محدودة وهى أقل فى نسبة التغيير عن المقاومة المضغوطة

---

[١٦] فى بعض عناصر غلكترونيات القوى فإن سمك التحصين (epi thickness) المطلوب في بعض الأحيان سميكاً (السمك مطلوب لدعم المنطقة العازلة – depletion region– للعناصر عالية الجهد)٠ لهذه التطبيقات، يمكن إستخدام سمك االركيزة بالكامل كمجمع (collector) للترانزستور

[١٧] تأثير الطبقة المدفونة (نوع ن) N-type buried layer (NBL) ا تخطيط فراغ لوكوس (LOCOS space) على الأداء (ESD performance) وجهد الدفع من جانب عناصر (م أ س) lateral DMOS (LDMOS) device

ومقاومة السطح عالية عن مقاومات القاعدة وتستخدم عموما في تصميم الترانزستور ثنائى القطب مع تيارات تغذية < ١ ميلى أمبير٠ ومن عيوبها تصنيع مقاومات الجهد العالى من البورن لنشر الشحنات وهى عرضه لآثار التحوير المتضررة من تغيير الموصلية ويمكن حدوث إنهيار جليدي محدود بضحالة زرع "المقاومات الفوقية ٠ تتكون مساحة المقاومات من ٥ الى ١٠ كيلو أوم من ترسيب طبقة مستوية متجانسة بين الركيزة ومنطقة القاعدة كما أن جهد القطع النموذجى من ٢٠ الى ٤٠ فولت وتستخدم حصريا في تطبيقات بدء التشغيل حيث أنها توفر كمية ضئيلة من التيار ، ولا تستخدم في إعداد كبيرة بسبب التغيرات الغير خطية وتعانى من الجهد العالى٠

- مقاومات معدنية

تتكون من طبقة الومنيوم معدنية فوق منطقة أكسيد ويمكن إستخدام طبقتين من المعدن وتستخدم فى دوائر الإستشعار ومحددات الطاقة فى الترانزستور ثنائي القطب إلا أنها تتطلب تقنيات خاصة لتوفير الإحساس بالجهد الضئيل عبر المقاومة وهى مقاومات مساحتها تتراوح من٢٠ الى ٤٠ ميلى أوم/مربع بسبب إختلاف سمك المعادن من١٠ الى١٥ كيلو أنجستروم. يمكن أن نتوقع +/-٢٠% تباين في مقاومة المساحات المعدنية لإختلاف السمك٠

- مقاومات البولي سيلكون

تستخدم فى تكوين البوابة فى الترانزستور أحادى القطب بشكل كبير لتحسين موصلية مقاومة المساحة من ٢٥-٥٠ أوم/مربع، ولا تعتمد المقاومة النوعية فقط على االشوائب، ولكن أيضا على الشكل البلورى وهى من أفضل المقاومات في معظم العمليات بسبب صغر تخطيطها وتكوينها، كما يمكن تعديل قيم الموصلية قليلاً إذا كانت قيمة المقاومة < ١ كيلو أوم إلا أنها كثيرة التغير، والسعة الطفيلية معتدلة إذا لم تكن فى أعلى منطقة الأكسيد ، يفضل ألا تتعامل مع التغيرات المفاجئة فى الحمل الزائد٠

٧ – ٢ – ٦ إعتبارات تصميم المقاومات

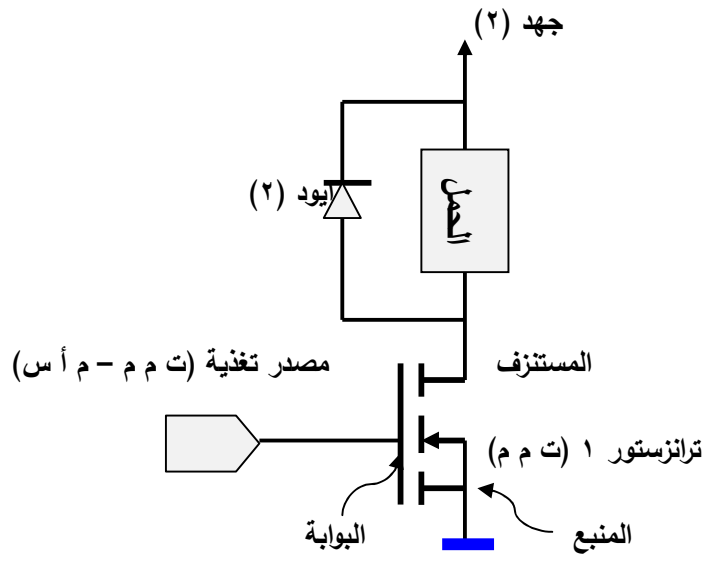
يجب أن يراعى فى تصميم المقاومات عدة معاملات مثل قيمة المقاومة – تغير قيمها مع الزمن ومع درجات الحرارة – قدرات المقاومة في مجال التعامل مع السعة – إختيار مادة تصنيع المقاومة – المقاومة النوعية للمساحة .

- **المقاومات بين المنبع والمستنزف[١٨]**

نجد أن المقاومة تساوى مقاومة المساحة

$$R = Rs\,[Ld/(Wd+Wb)] + 2Rh\,[Lh/(Wd+Wb)]$$

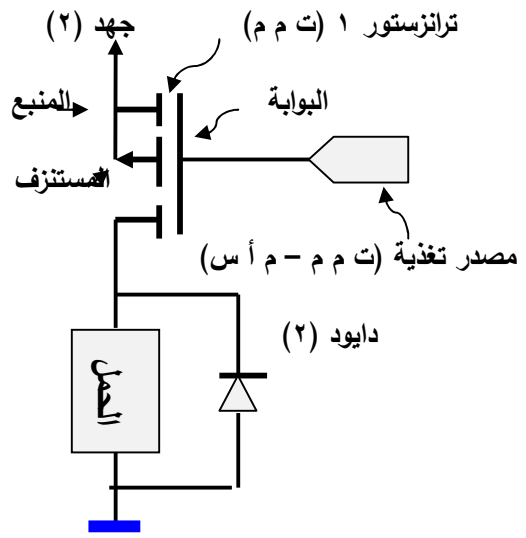
يعتبر الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال) مقاومة متغيرة تتمثل فى المنطقة بين المنبع والمستنزف وهى دالة لفرق الجهد على طرفى البوابة – المنبع.



الشكل (٧ – ٣٨) الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال)
مقاومة متغيرة تتمثل فى المنطقة بين المنبع والمستنزف

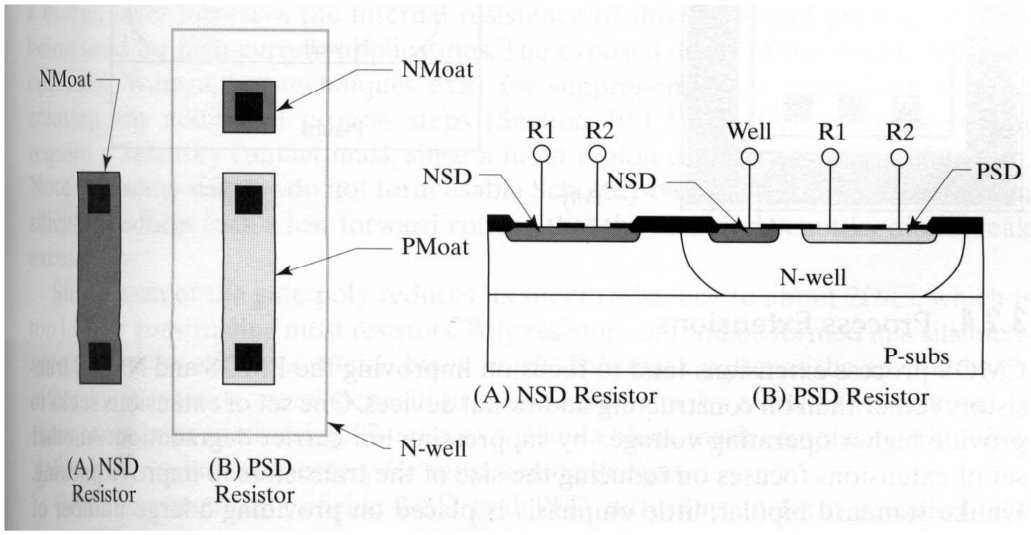
[١٨] إمتداد ذرات التطعيم االمنبع والمستنزف وتضاؤلها يتم التحكم في كليهما بإستخدام طبقات االمنبع والمستنزف بنوعيها (ن و ب) بالنسب المطلوبة لتصميم المقاومات

فى حالة عدم وجود فرق فى الجهد على طرفى البوابة – المنبع تكون المقاومة بين المنبع والمستنزف عالية جداً وتعتبر عنصر تبديل لدائرة مفتوحة – حيث لا يتدفق تيار خلال طرفى المنبع والمستنزف٠ عندما يكون هناك فرق جهد كبير بين البوابة والمنبع فإن مقاومة المنبع – المستنزف تكون منخفضة جداً ويمكن إعتبارها عنصر تبديل لدائرة مغلقة ويتدفق التيار خلال طرفى المنبع والمستنزف٠



الشكل (٧ – ٣٩) الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال) موصلية (ب) كمقاومة متغيرة تتمثل فى المنطقة بين المنبع والمستنزف

فى حالة قناة ذات موصلية (ب) فى الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال) فإن المنبع متصل بالبطارية. من أجل السماح للتيار بالتدفق تحتاج أن تكون البوابة متصلة بالأرض٠ لوقف سريان التيار تتطلب توصيل البوابة بالبطارية٠ المشكلة المحتملة إذا كان جهد البطارية جهد عالي جداً فقد يكون من الصعب رفع جهد البوابة إلى جهد البطارية٠ ليس ذلك فحسب لكن الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال) له بعض القيود على فرق الجهد بين البوابة والمنبع٠ من الناحية المثالية يجب أن تكون مقاومة المنبع – المستنزف عالية جداً عندما لا يتدفق تيار ومنخفضة جداً عندما يتدفق التيار٠



الشكل (٧ – ٤٠) مقطع أفقى فى الترانزستور (م – أ – س المتأثر بالمجال) موضح فية القناة بين المنبع والمستنزف بنوعيها (ن) و (ب)

- **مقاومة فيوز[١٩]**

فى الهندسة الكهربائية وهندسة الإلكترونيات نوع من المقاومات ذات مقاومة منخفضة وتعمل كعنصر وقائى لمنع التيار العالى من المرور فى المعدات والأجهزة٠

الشكل (٧ – ٤١) مقاومة فيوز كعنصر وقائى لمنع التيار العالى من المرور فى المعدات والأجهزة

[١٩] فى الإلكترونيات والهندسة الكهربائية – قاطع التيار (fuse) هو نوع من المقاومة ذات قيم منخفضة تتصرف كجهاز تقريبى (sacrificial device) لتقديم الحماية من التيار المرتفع (over current)

- **عناصر زينر المقاومة للتيار[٢٠]**

يمكن أن تستخدم ثنائيات زينر كعنصر مقاوم ٠ وصلة أشباه الموصلات الثنائية التي تعمل كصمام ثنائي محمل بتيار مرتفع يتسبب فى رفع لدرجات الحرارة العالية أعلى من ١٠٠ درجة مئوية وكثافة التيار أعلى من ١٠ امبير/سم^{٢} يخضع المعدن للحركة الكهربائية مكونا شرارات خلال وصلة شبه الموصل التى تؤدى الى قصرها ، وتعرف هذه العملية في الصناعة بإنطلاق زينر٠ يتم تشكيل الشرارة على سطح السليكون وأقل قليلاً أسفل طبقة التخميل دون الأضرار بها٠ إنطلاق زينر لا تؤثر فى سلامة وموثوقية الدايود٠

عادة ما يكون هناك نبضة بالميلي ثانية عند ١٠٠-٢٠٠ ميلى أمبير كافية للترانزستور ثنائى القطبية المشتركة، للتكوينات الغير محسنة للمكافحة فهناك تكوينات متخصصة لإنخفاض الطلب على الطاقة٠ المقاومة الناتجة من الوصلات حوالى ١٠ أوم. يصنع عنصر المقاومة لزينر دون خطوات تصنيع الإضافية مع معظم تكنولوجيات الترانزستور٠ وهى أكثر شيوعا في الدوائر التناظرية ودوائر الإشارات المختلطة٠ سبق إستخدامها خاصة مع تصنيع الترانزستور ثنائى القطب ، حيث لا يتوفر طبقة أكسيد رقيقة اللازمة لمكافحة العناصر العازلة٠ ومن عيوبها إنخفاض المساحة مقارنة بالأنواع الأخرى٠

- **مقاومات الأفلام الرقيقة**

مقاومات رقيقة بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة تصنع بترسيب مواد المقاومة على ركيزة عازلة بتكنولوجيا التناثر٠ ثم يتم إزالة بعض المساحات بطريقة مماثلة للعملية (الحفر) فى تصنيع لوحات الدوائر المطبوعة ؛ حيث يغطى بمادة حساسة للضوء٠ ثم تغطيتها بقناع إزالة، وتعريضها للأشعة فوق البنفسجية، ثم يتم وضع قناع الطلاء وراء الشريحة٠

---

[٢٠] الطريقة الثالثة لتصنيع العناصر المكافحة تتمثل بإحداث إنهيار جليدي مؤقت في وصلة ثنائية شبة موصل (ب – ن) كافية لتسبب تدفئة محلية للمعدن عبر الوصلات٠ هذا الأسلوب ينشأ العناصر المكافحة وتعرف فى الصناعة بمسمى رطانة (jargon) وهى مشابهه لإنطلاق ظاهرة زينر(Zener zap) ٠

المعادلة (٧-٩) $R = Rs\ (L / W)\ (\rho)$

حيث : (R) هى المقاومة الكلية (٢/١) و(R_s) مقاومة المساحة أوم/مربع و (ρ) المقاومة النوعية لمادة المقاومة و(t) سمك المقاومة بالسنتيمتر و (L) طول المقاومة بالسنتيمتر و (W) عرض المقاومة بالسنتيمتر ٠

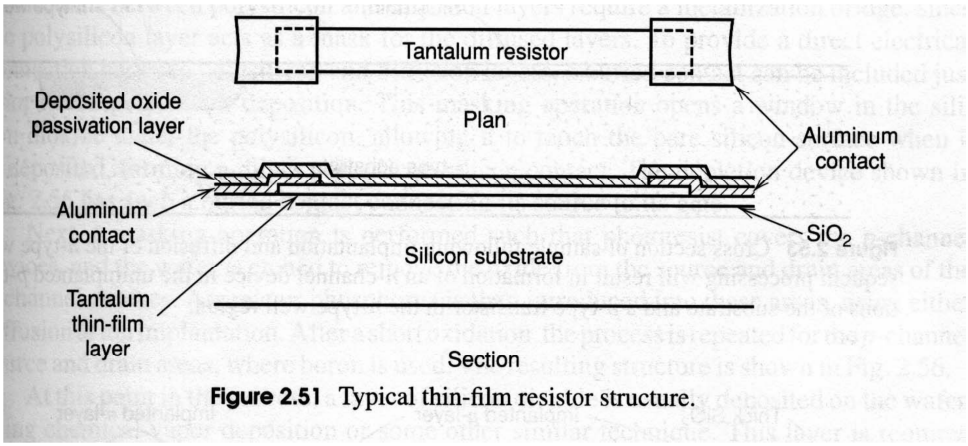


Figure 2.51 Typical thin-film resistor structure.

الشكل (٧ – ٤٢) مقطع أفقى لتكوين مقاومات الأفلام الرقيقة النموذجية

- مقاومات التغيير والتبديل ذات الوصلات المنزلقة

تنقسم مقاومات التغيير والتبديل[٢١] هما الوصلات المنزلقة والشريحة الترومبون[٢٢] لكل منها أسلوب ينطوي على قناع مختلف، ولا توجد طريقة واحدة يمكن ضبط كل أنواع المقاومات ٠

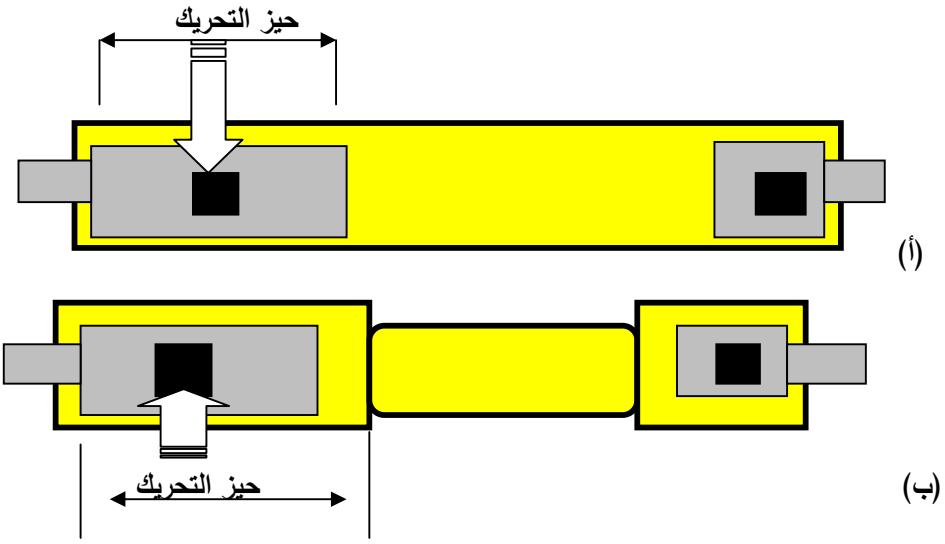
- مقاومات التغيير والتبديل الشريحة الترومبون

الترومبون أنبوبة أسطوانية منحنية على شكل ممدود للحرف إس "S"٠ بدلاً من أن يكون أسطواني تماما من البداية إلى النهاية،

---

[٢١] يصنع " وجه تمويه" (Fuzz Face) مع بعض الترانزستورات الجرمانيوم لضغط (to tweak) قيم المقاومة قليلاً٠ ولكن ما قد يبدو أنها أفضل قليلاً إذا تم ضبطها. وهناك عدة مقاومات ويبدو أنها قليلةً التفاعلية

[٢٢] والترومبون (trombone) عبارة عن أنبوب أسطواني غالباً على شكل "S" ممدود



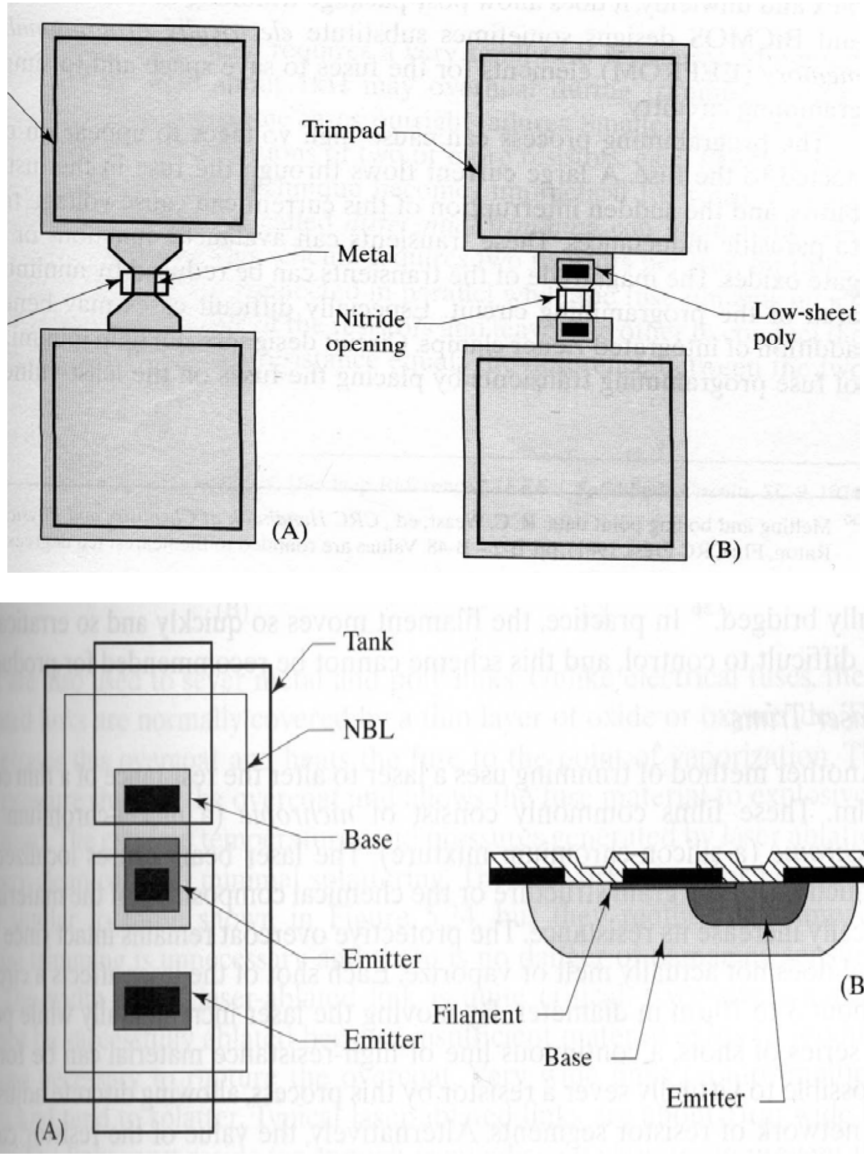
الشكل (٧ – ٤٣) مقاومات التغيير والتبديل ذات وصلة منزلقة

المكان البديل للمقاومة بعد تحريك الترومبون (trombone)

الشكل (٧ –٤٣) مقاومات التغيير والتبديل الشريحة الترومبون

٧ – ٢ – ٧ تقليم المقاومات[٢٣]

على مر السنوات، ظهرت تقنيات التقليم لتحسين الدقة وكفاءة الدوائر المتكاملة. وفي هذا السياق يشير التشذيب أو التقليم لإجراء ضبط للدوائر المتكاملة بعد تصنيعها ٠

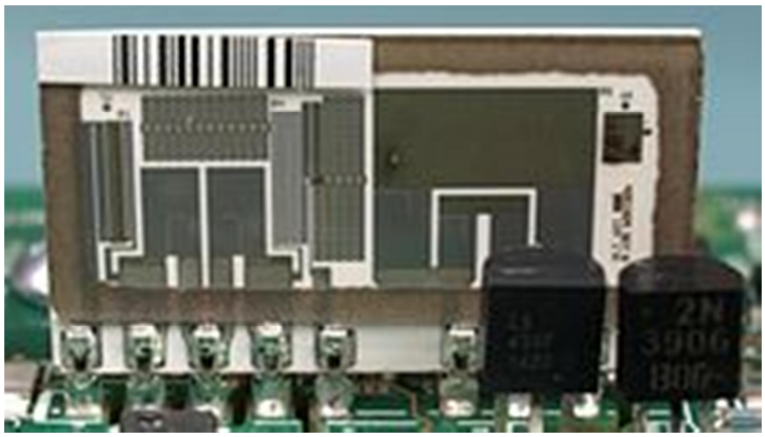


الشكل (٧ –٤٤) آلية التقليم لتحديد قيم المقاومات

---

[٢٣] من الصعب تصنيع المقاومات بقيمة المقاومة الصحيحة، غالباً تصنع المقاومات بقيمة أقل وبعد ذلك تقلص لرفع قيمة المقاومة إلى القيمة المطلوبة. على مر السنين، آلية التقليم تطورت لتحسين دقة والعائد للدوائر المتكاملة ٠

ويتم عادة التشذيب أو التقليم على مستوى الشريحة على إسطمبة منفردة ولكن يمكن أداؤها على إسطمبة بعد التغليف. ويستهدف التشذيب عادة لتحقيق تحسن في المعاملات الرئيسية مثل الجهد المقابل لمعالج العمليات ، والقيمة المطلقة للجهد المرجعي، أو وقت تأخير محدد في سلسلة بوابات المنطق. عملية التقليم بإستخدام شعاع ليزر لضبط معاملات التشغيل فى دائرة إلكترونية. تتميز تقنية التقليم بالليزر بالدقة فى إستقطاع السمك المفلطح لشبكة المقاومة بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة المستخدمة في جهاز متعدد وظائف القياس. السيراميك المدعوم بغطاء زجاجى محكم. وعلامات القطع باليزر المرئية في بعض المواد . أحد التطبيقات الأكثر شيوعاً بإستخدام أشعة الليزر حرق أجزاء صغيرة من المقاومات، لرفع قيمتها ويمكن إجراء عملية الحرق بينما يتم إختبار الدائرة بمعدات الإختبار التلقائي، مما يؤدي إلى القيم النهائية المثلى للمقاومة في الدائرة. يتم تعريف قيمة المقاومة بأبعادها الهندسية (الطول، العرض، الارتفاع) ومواد تصنيع المقاومة. القطع الجانبي في مادة المقاومة بالليزر يقلل أو يطيل مسار تدفق التيار ويزيد من قيمة المقاومة. يتم الحصول على نفس التأثير بإستخدام الليزر على المقاومة أو على الركيزة السيراميك أو بتكنولوجيا التكوين السطحى[٢٤].

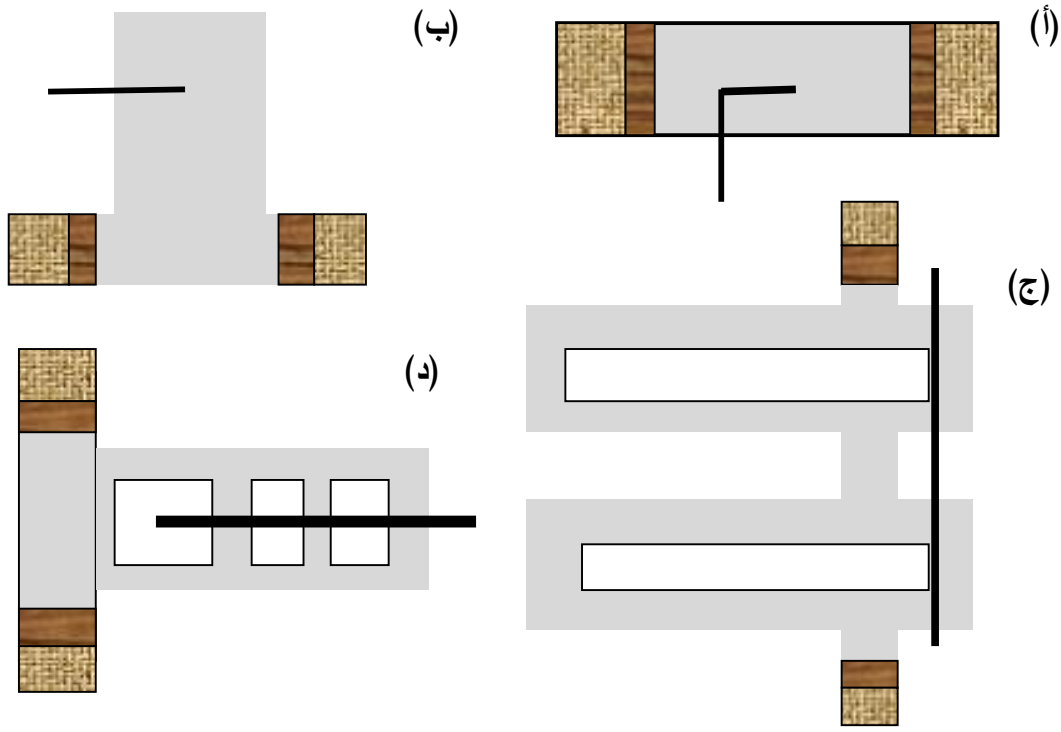


الشكل (٧ –٤٥) التقليم بإستخدام شعاع ليزر لضبط معاملات التشغيل فى دائرة إلكترونية

---

[٢٤] تكنولوجيا التكوين السطحى (SMT) هى طريقة لإنتاج الدوائر الإلكترونية حيث توضع المكونات مباشرة على سطح الدائرة المطبوعة (PCBs) .

يتم تكوين السطوح بنفس التكنولوجيا كما يمكن إقتطاع أجزاء منها بنفس الأسلوب٠ يتم بناء رقاقة المكثفات كمكثفات متعددة الطبقات٠ بتبخير الطبقة العليا بشعاع الليزر يقلل من السعة بسبب تقليل مساحة منطقة القطب العلوي٠ هذه النظم تتطلب دقة التخطيط ، أو تعديل معاملات المكونات الفردية بإستخدام شعاع ليزر لإزالة الأجزاء الدقيقة للمواد٠ يجري توظيف تقنية التشذيب بالليزر المتفوقة على نطاق واسع العالم،



الشكل (٧ – ٤٦) أشكال هندسية لمقاومات الأفلام الرقيقة

References

1) **Hastings, Alan The Art Of Analog , Design Prentice Hall 2001**
2) **Gray, Lewis, and Meyer. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, 4thed., Wiley, New York, 2001 ,**
3) **Howe, R.T. Measurement and Control of Thin Films _ Applications and Design of Thin Film Resistors** www.mic.com
4) **Thin Film Http://www.tpub.com/neets/book14**
5) **Fine Film** Http://www.ohmcraft.com/main_info.html