الفصل الثالث

المبدلات (المجسات) الفيزيولوجية
PHYSIOLOGICAL TRANSDUCERS

(٣,١) مقدمة
Introduction

إن المبدلات (أو المجسات) أجهزة تحول شكلاً من أشكال الطاقة إلى شكل آخر. وبسبب الميزات المعروفة لطرق القياس الكهربائية والإلكترونية فإن الممارسة العادية هي أن تُحوَّل جميع الظواهر غير الكهربائية المصاحبة للحوادث الفيزيولوجية إلى كميات كهربائية. لقد طُوِّر العديد من الطرق لهذا الغرض وتم استخدام مبادئ الفيزياء الأساسية بشكل واسع من أجل ذلك. إن أبسط هذه الطرق هو تغير في عناصر دارة كهربائية كالمقاومة والسعة والتحريض (المحاثة) تبعاً للحوادث المراد قياسها.

كما أن المجسات الكهروضغطية والكهروضوئية شائعة كثيراً أيضاً. تُكتشف الحوادث الكيميائية بقياس التيار المار عبر المحلول الكهربائي (الإلكتروليت) أو بتغيرات الكمون التي تنشأ عبر الإلكترودات الغشائية. وهناك عدد من العوامل التي تحدد اختيار مجس ما لاستخدامه لدراسة ظاهرة معينة، وتتضمن هذه العوامل:

- مطال الكمية المقيسة.
- درجة الدقة المطلوبة.
- الخواص السكونية (الستاتيكية) أو الحركية (الديناميكية) للعملية المدروسة.
- موقع التطبيق على جسم المريض سواء للمراقبة قصيرة أو طويلة الأجل.
- اعتبارات اقتصادية.

(٣,٢) تصنيف المبدلات (ا سات)
Classification of Transducers

يمكن تطبيق كثير من الخواص والمبادئ الفيزيائية والكيميائية والبصرية لبناء مجسات للتطبيق في المجال الطبي. ويمكن تصنيف المجسات بطرق عديدة مثل:

١- حسب العملية المستخدمة لتحويل طاقة الإشارة إلى إشارة كهربائية. وتبعاً لذلك فإن المجسات يمكن تقسيمها إلى:

- *مجسات ناشطة (فعالة):* تحول شكلاً من أشكال الطاقة مباشرة إلى آخر. مثال ذلك الخلية الفوتوفولتية التي تُحول فيها الطاقة الضوئية إلى كهربائية.

- *مجسات خاملة:* تتطلب تغذيتها بالطاقة لكي تحول تغيرات المقيس. وهي تستخدم مبدأ التحكم بجهد تهييج تيار مستمر أو بإشارة حاملة ذات تيار متناوب. مثال ذلك مقاومة متغيرة موضوعة في جسر واتستون يعكس فيه الجهد عند خرج الدارة المتغير الفيزيائي. إن المجس الفعلي هنا هو عنصر دارة خامل لكنه يحتاج إلى أن يُغذى بالطاقة عن طريق إشارة تهييج ذات تيار مستمر أو متناوب.

٢- حسب المبادئ الفيزيائية أو الكيميائية المستخدمة. مثال ذلك أجهزة مقاومة متغيرة وأجهزة أثر هال Hall effect ومجسات الألياف البصرية.

٣- حسب التطبيق لقياس متغير فيزيولوجي معين. مثال ذلك مجسات التدفق والضغط ودرجة الحرارة .... الخ.

وتوضح الجداول (٣,١) إلى (٣,٣) المعاملات الحيوية الطبية الشائع مواجهتها مذكورة إلى جانب خواصها والمجسات المقابلة.

الجدول رقم (٣,١). إشارات من النظام القلبي الوعائي

المعامل المقيس	خصائص الإشارة الأولية	المبدل (ا س) المطلوب
ضغط دم (شرياني، مباشر)	مجال التردد: مستمر حتى ٢٠٠هرتز (٤٠ تكفي عادة)، مجال الضغط: (٢٠-٣٠٠) ملم زئبق، سالب قليلا في البطين الأيسر.	مجس ضغط ذو مقياس تمدد سلكي غير مرتبط، مجس ذو مقياس تمدد نصف ناقل مرتبط، مجس ضغط سعوي، محول تفاضلي.
ضغط دم (شرياني، غير مباشر)	مجال التردد: مستمر حتى ٥ هرتز، مجال الضغط: (٢٠-٣٠٠) ملم زئبق، الميكروفون: (١٠-١٠٠) هرتز. جهد الإشارة يعتمد على نوع الميكروفون المستخدم.	ميكروفون تردد منخفض لالتقاط أصوات كوروتكوف.
ضغط دم (وريدي، مباشر)	مجال التردد: مستمر حتى ٤٠هرتز مجال الضغط: (-٥) حتى (+٢٠) ملم زئبق.	مجس ضغط ذو مقياس تمدد بحساسية عالية.
ضغط دم شرياني، طرفي موجة نبضية	مجال التردد: (١ر٠-٥٠) هرتز كافية عادة، شكل الموجة (الأثر) مشابه لشكل موجة ضغط الدم الشرياني.	التقاط من شحمة الأذن أو الإصبع (مصدر ضوء وخلية ضوئية)، التقاط كهروضغطي أو بطريقة الممانعة.
تدفق دم (أبهري أو وريدي)	مجال التردد: صفر حتى ١٠٠ هرتز، المعدل: صفر حتى ٣٠٠ ميليلتر في الثانية.	طريقة الأثر، مقياس تدفق كهرومغناطيسي، مقياس تدفق دوبلر فوق صوتي.

تابع الجدول رقم (٣,١).

المعامل المقيس	خصائص الإشارة الأولية	المبدل (ا س) المطلوب
خرج قلبي (تدفق دم)	مجال التردد: صفر حتى ٦٠ هرتز (٥ هرتز كافية عادة)، مجال التدفق: (٤-٢٥) لتر في الدقيقة.	طرق تخفيف الصبغة، مكاملة تابع تدفق الدم الأبهري، طريقة التخفيف الحراري، مقياس تدفق كهرومغناطيسي ومكامل.
نبض القلب	المعدل: (٢٥-٣٠٠) نبضة في الدقيقة، المعدل العادي في حالة الراحة: (٦٠-٩٠) نبضة في الدقيقة، المعدل العادي للجنين (١١٠-١٧٥) نبضة في الدقيقة.	مشتق من الـ ECG أو من موجة ضغط الدم الشرياني أو من جهاز تخطيط الكظاظة الكهروضوئي. بالنسبة للجنين مشتق من الطريقة فوق الصوتية لمخطط صوت القلب أو من الـ ECG المأخوذ بإلكترودات فروة الرأس.
أصوات القلب	مجال التردد: (٢٠-٢٠٠٠) هرتز، جهد الإشارة يعتمد على نوع الميكروفون المستخدم.	ميكروفون ذو بلورة أو وشيعة متحركة.
مخطط قذف القلب BCG	مجال التردد: مستمر حتى ٤٠ هرتز	برنامج بلاتفورم الفترة اللامتناهية مع مقياس تسارع ذي مقياس تمدد.
مخطط ممانعة القلب RCG (Rheo-CG)	مجال التردد: مستمر حتى ٥٠ هرتز، مجال الممانعة: (١٠-٥٠٠) أوم، التردد النموذجي المستخدم لقياس الممانعة: (٢٠-٥٠) هرتز.	إلكترودات سطحية أو إبرية.
قياس تأكسج الدم	مجال التردد: صفر حتى ٦٠ هرتز (صفر حتى ٥ هرتز كافية عادة).	التقاط نبض كهروضوئي، حجرة عبور كهروضوئية.

الجدول رقم (٣,٢). إشارات من النظام التنفسي.

المعامل المقيس	خصائص الإشارة الأولية	المبدل (ا س) المطلوب
معدل التنفس	المجال العادي: صفر حتى (٥٠) نفس في الدقيقة	ثرمستور، إلكترودات تخطيط التنفس بقياس الممانعة، طريقة المفتاح الميكروي، كاشف CO_2.، مجسات قياس التمدد، مجسات انزياح دوبلر.
مخطط سرعة الهواء	مجال التردد: مستمر حتى ٥ هرتز	جهاز قياس سرعة الهواء طبقاً لـ فلايش، مقاييس تنفس BMR.
تخطيط التنفس بقياس الممانعة	مجال التردد: مستمر حتى ٣٠ هرتز (من حامل مفكك التعديل، التردد الحامل النموذجي المستخدم (٢٠-٥٠) كيلوهرتز)	إلكترودات سطحية أو إبرية.
الحجم المدي (حجم/نفس)	مجال التردد: مستمر حتى (٥) هرتز، القيمة النموذجية للإنسان البالغ (٦٠٠) ميليلتر لكل نفس.	مباشرة من مقياس التنفس، مكامَلا من مخطط سرعة الهواء.
التهوية في الدقيقة (حجم/دقيقة)	(٦-٨) لتر في الدقيقة.	مكامَلا من مخطط سرعة الهواء

تابع الجدول رقم (٣,٢).

المعامل المقيس	خصائص الإشارة الأولية	المبدل (ا س) المطلوب
غازات في هواء الزفير	- مجال الـ CO_2 العادي: (صفر-١٠٪) من المدي النهائي - CO_2 (إنسان): ٤-٦٪ - مجال N_2O: صفر-١٠٠٪ - مجال الهالوثين: صفر-٣٪	حساسات تحت حمراء، مقياس الطيف الكتلي.
الغازات المستنشقة أو المنتشرة (تقنية غسل النتروجين)	المجال العادي لتفاضل تركيز النتروجين: صفر-١٠٪	جهاز تحليل النتروجين ذو أنبوب التفريغ
السعة الانتشارية الرئوية (باستخدام أول أكسيد الكربون)	المجال العادي (إنسان): (١٦-٣٥) ميليلتر.CO لكل ملم زئبق في الدقيقة.	امتصاص الأشعة تحت الحمراء من قبل أول أكسيد الكربون.
درجة الحموضة	مجال الإشارة: صفر حتى ± ٧٠٠ ملي فولت	إلكترودات كالوميل و زجاجية.
الضغط الجزئي لـ CO_2 المنحل	المجال: ١-١٠٠٠ ملم زئبق	إلكترود تسجيل مباشر لثاني أكسيد الكربون.
الضغط الجزئي لـ O_2 المنحل	- مجال القياس العادي: (صفر-٨٠٠) ملم زئبق - مجال القياس في الضغط الزائد: (٨٠٠-٣٠٠٠) ملم زئبق	إلكترودات تخطيط استقطاب (بولاروغرافي).
أيونات الصوديوم والكلور	مجال الإشارة: (٦٠) ميلي فولت لكل مجال عشري	إلكترودات خاصة حساسة للأيونات.

الجدول رقم (٣,٣). إشارات من النظام التنفسي.

المعامل المقيس	خصائص الإشارة الأولية	المبدل (ا س) المطلوب
درجة الحرارة	مجال التردد: مستمر حتى (١) هرتز	مزدوجات حرارية، مقياس حرارة ذو مقاومة، ثرمستور، ديود سيليكوني.
المقاومة الغلفانية للبشرة GSR	مجال المقاومة: (١-٥٠٠) كيلو أوم	إلكترودات سطحية مشابهة لإلكترودات الـ ECG.
مخطط الكظاظة (قياس حجم)	مجال التردد: مستمر حتى ٣٠ هرتز	تخطيط كظاظة (تحجم) نوعي بواسطة: - الطريقة الكهروضوئية - طريقة الممانعة - الطريقة الكهروضغطية.
مخطط المخاض (تقلص الرحم أثناء المخاض)	مجال التردد: مستمر حتى (٥) هرتز	مجسات قياس تمدد.
قوة أيزومترية (ثابتة)، تغير أبعاد		مقياس تمدد (مقاومة أو نصف ناقل

(٣,٣) خصائص أداء المبدلات (ا سات)
Performance Characteristics

توضع المجسات عادة عند دخل نظام قياس، ولذلك فإن خصائصها تلعب دوراً هاماً في تحديد أداء النظام. ويمكن تقسيم خصائص المجسات إلى فئات كما يلي:

(٣,٣,١) الخصائص السكونية (الستاتيكية) Static Characteristics

الدقة accuracy: يوصِّف هذا المصطلح الفرق الجبري بين القيمة المؤشر إليها والقيمة الحقيقية أو النظرية للمقيس. وعملياً يُعبَّر عن الدقة عادة كنسبة من كامل الخرج أو كنسبة مئوية من القراءة أو ± عدد الأرقام للقراءة الرقمية.

الدقة التكرارية precision: تشير إلى درجة قابلية التكرار لقياس ما. وينبغي ألاَّ يتم الخلط بينها وبين الدقة أعلاه. فمثلاً يمكن لجهد انزياح عن الصفر لمضخم عملياتي أن يعطي نتائج قابلة لإعادة الإنتاج جداً (دقة تكرارية عالية) لكنها يمكن أن لا تكون دقيقة.

الوضوحية (دقة التمييز) resolution: تشير دقة التمييز لمجس إلى أقل زيادة في الدخل قابلة للقياس.

الحساسية sesitivity: وهي تصف نسبة نقل الخرج بالنسبة للدخل.

الانحراف drift: يشير إلى التغير في خط القاعدة (الخرج عندما يكون الدخل صفراً) أو في الحساسية مع الزمن، درجة الحرارة ...الخ. وربما تجدر الملاحظة بأن حساسية الجهاز لا تغير منحني المعايرة إذا ما رُفعت أو خُفضت.

الخطية: وهي تظهر مدى قرب منحني معايرة مجس إلى خط مستقيم محدد ضمن نسبة مئوية محددة من كامل الخرج. وبشكل أساسي فإن الخطية تعكس أن الخرج بطريقة ما متناسب طرداً مع الدخل.

العتبة: إن عتبة المجس هي أصغر تغير في المقيس ينتج عنه تغير في خرج المجس قابل للقياس. تضع العتبة حداً أدنى لقدرة مجس على القياس.

الضجيج: وهو إشارة غير مرغوب فيها عند الخرج عائدة إما إلى مصدر داخلي وإما إلى تداخل.

البطاء Hysteresis: يصف تغير الخرج مع نفس القيمة للدخل ولكن بتاريخ مختلف لتغير الدخل. فمثلاً يُشاهد البطاء عندما تكون خصائص الدخل/الخرج لمجس مختلفة من أجل دخول متزايدة عنها من أجل دخول متناقصة. وهذا يحدث عندما لا تُستعاد بعض الطاقة المطبقة من أجل الدخول المتزايدة عندما يتناقص الدخل.

المدى (الاتساع) Span: يشير إلى مجال التشغيل الكلي للمجس.

الإشباع: إن الخرج في مجس متناسب طرداً مع الدخل عموماً. ولكن أحياناً إذا ما استمر الدخل بالتزايد إيجابياً أو سلبياً فإنه يتم الوصول إلى نقطة حيث لا يعود المجس يزيد من خرجه إذا زاد الدخل، ما ينشأ عنه علاقة غير خطية. وتدعى المنطقة التي لا يتغير فيها الخرج مع تزايد الدخل بمنطقة الإشباع.

المطابقة Conformance : تشير المطابقة إلى قرب منحني معايرة إلى منحني ما محدد من أجل مجس غير خطي بحد ذاته أصلاً.

(٣,٣,٢) الخصائص الحركية (الديناميكية) Dynamic Characteristics

إن القليل فقط من الإشارات ذات الاهتمام في مجال التجهيزات الطبية كدرجة حرارة الجسم هي من النوع الثابت أو المتغير ببطء. إن غالبية الإشارات عبارة عن توابع للزمن ، وبالتالي فإن خاصية التغير مع الزمن هذه للإشارات الحيوية هو ما يتطلب أخذ الخصائص الحركية لنظام القياس بالاعتبار. ومن الواضح أنه عندما يتعرض نظام قياس إلى دخول متغيرة فإن العلاقة بين الخرج والدخل تصبح مختلفة تماماً عن تلك التي في حالة السكون. وبشكل عام فإنه يمكن التعبير عن استجابة النظام الحركية على شكل معادلة تفاضلية.

ومن أجل أي نظام حركي فإن مرتبة (أو درجة) المعادلة التفاضلية التي توصّف النظام تدعى مرتبة (أو درجة) النظام. ويمكن تصنيف غالبية أنظمة التجهيزات الطبية كأنظمة من المرتبة الصفرية و الأولى والثانية ومرتبة أعلى.

نظام من الدرجة الصفرية : إن لهذا النظام أداء حركي مثالي ؛ لأن الخرج متناسب طرداً مع الدخل من أجل جميع الترددات وليس هناك تشويه مطالي أو طوري. إن المقاومة المتغيرة (مقسم الجهد) الخطية المستخدمة كمجس للانزياح مثال جيد للمجسات من المرتبة الصفرية.

نظام من الدرجة الأولى : توصَّف الأداة أو المجس من الدرجة الأولى بمعادلة تفاضلية خطية. إن مجسات درجة الحرارة مثال نموذجي لجهاز قياس من الدرجة الأولى لأنه يمكن وصفها بمعامل وحيد هو الثابت الزمني T. إن المعادلة التفاضلية لنظام من الدرجة الأولى هي :

$$y + T\,dy/dx = x(t)$$

حيث x هي الدخل و y هي الخرج و x (t) هو التابع الزمني للدخل.

نظام من الدرجة الثانية : تُعتبر أداة أو مجس من الدرجة الثانية إذا كان المطلوب لوصف الاستجابة الحركية هو معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية. نظام النابض–الكتلة لقياس القوة هو مثال نموذجي لنظام من الدرجة الثانية. هناك معاملان يوصِّفان هذا النظام هما التردد الطبيعي f_n (أو السرعة الزاوية الطبيعية ω_n حيث $\omega_n=2\pi f_n$) ومعدل التخامد z. المعادلة التفاضلية لهذا النظام هي :

$$\left(1/\omega_n^2\right)d^2y/dx^2 + \left(2z/\omega_n\right)dy/dx + y = x(t)$$

حيث تقاس ω_n بالراديان/ثانية وحيث z كمية لابُعدية (ليس لها وحدة قياس). وربما تجدر الملاحظة بأن الكتلة والنابض وعنصر التخميد اللزج تقوم في هذا النظام بمعاكسة قوة الدخل المطبق وأن الخرج هو الإزاحة الناتجة للكتلة المتحركة المربوطة إلى النابض.

إن التردد الطبيعي في أنظمة الدرجة الثانية عبارة عن مؤشر (أو دليل) على سرعة استجابة النظام بينما معدل التخامد عبارة عن مقياس لاستقرار النظام. يعطي النظام ذو التخميد الناقص خرجاً اهتزازياً كجواب على دخل عابر، بينما يعطي النظام ذو التخميد الزائد جواباً بطيئاً حيث يأخذ وقتاً طويلاً للوصول إلى قيمة الحالة الثابتة. ولذلك فإن المطلوب من مثل هذه الأنظمة أن تكون مُخمَّدة بشكل حرج من أجل خرج مستقر.

إن زمن الاستجابة معامل مهم آخر لتوصيف الأداء الحركي لمجس، فهو يصف جواب مجس على تغير بشكل درجة step في الدخل (المقيس) ويتضمن زمن الصعود وزمن الهبوط وثابتاً زمنياً.

(٣,٣,٣) خصائص أخرى Other Characteristics

هناك خصائص أخرى كثيرة تحدد أداء وانتقاء مجس ما من أجل تطبيق خاص في أنظمة التجهيزات الطبية، وفيما يلي بعض هذه الخصائص:

- ممانعة الدخل وممانعة الخرج.
- مجال الحمل الزائد.
- زمن التعافي بعد الحمل الزائد.
- جهد التهييج excitation.
- زمن التخزين (الصلاحية) shelf life.
- الموثوقية (الوثوقية/الاعتمادية) reliability.
- الحجم والوزن.

(٣,٤) مبدلات (مجسات) الحركة والوضعية والإزاحة
Displacement, Position and Motion Transducers

تفيد هذه المجسات في قياس الحجم والشكل والوضعية (الموضع) لأعضاء ونسج الجسم. وتُعمَل القياسات التالية بشكل خاص:

الوضعية (أو الموضع): هو الموقع الحيّزي لجسم أو نقطة بالنسبة لنقطة مرجعية.

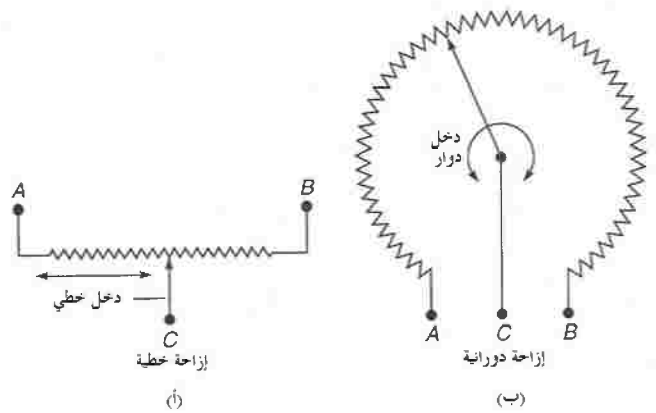
الإزاحة: هي شعاع يمثل تغيراً في الموضع لجسم أو نقطة بالنسب لنقطة مرجعية. ويمكن للإزاحة أن تكون خطية أو زاوية.

الحركة: تغير في الموضع بالنسبة لنظام مرجعي.

يمكن استخدام مجسات الإزاحة في كلا النظامين المباشر وغير المباشر للقياس. فمثلاً بالإمكان استخدام القياسات المباشرة للإزاحة لتحديد التغير في أقطار الأوعية الدموية والتغيرات في حجم وشكل حجيرات القلب. أما القياسات غير المباشرة فتُستخدم للتحديد الكمي لحركة السوائل عبر صمامات القلب. فمثلاً هناك كشف لحركة القلب بشكل غير مباشر من خلال حركة غشاء ميكروفون. إن قياسات الإزاحة ذات أهمية كبيرة لأنها تشكل الأساس لكثير من المجسات لقياس الضغط والقوة والتسارع ودرجة الحرارة ... الخ. وتُستخدم الأنواع التالية من المجسات بشكل عام لقياس الإزاحة والموضع والحركة.

(٣,٤,١) المبدلات (ا سات) ذات المقاومة المتغيرة (مقسم الجهد) Potentiometric Transducers

وهو أحد أبسط المجسات لقياس الإزاحة وهو عبارة عن مقاومة متغيرة (مقسّم جهد) تشبه المتحكم بالصوت في جهاز إلكتروني صوتي. إن المقاومة بين طرفين على هذا الجهاز لها علاقة بالإزاحة الخطية أو الزاوية لسدادة منزلقة على طول عنصر مقاومة (الشكل رقم ٣,١).



الشكل رقم (٣,١). مبدأ مجس الإزاحة ذي مقسم الجهد لقياس: (أ) إزاحة خطية، (ب) إزاحة زاوية.

عندما تكون النهايات الطرفية المثبتة لمقسم الجهد مربوطة إلى تغذية بالطاقة سواء بالتيار المتناوب أو المستمر فإن الجهد عند المنزلقة يتغير مع إزاحة الجسم. وهناك مقسمات جهد متنوعة متاحة لتطبيقات مختلفة، فهناك ذات اللفة الواحدة وهناك ذات اللفات المتعددة (لفتان إلى عشر لفات) وهناك الخطية واللوغاريتمية وذات المقاطع.

(٣,٤,٢) السعة (المواسعة) المتغيرة Variable Capacitance

إذا تغيرت المسافة بين زوج من الصفائح المعدنية المكوّنة لسعة فسيكون هناك تغير في السعة طبقاً للعلاقة:

$$C = 0.0885\ k\ .\ A/d$$

حيث : C هي السعة بالفاراد ، و d المسافة بين الصفيحتين بالسنتيمتر و A مساحة كل صفيحة متماثلة من الصفيحتين بالسنتيمتر المربع و k ثابت كهربائي للوسط الذي يفصل بين الصفيحتين.

يمكن تغيير كل كمية من كميات هذه المعادلة لتكوين مجس إزاحة. فبإزاحة إحدى الصفيحتين بالنسبة للأخرى ستتغير السعة عكساً مع المسافة الفاصلة بين الصفيحتين ، وهذا سيعطي علاقة بين الإزاحة والسعة على شكل قطع زائد. أما إذا بقي الفاصل بين الصفيحتين ثابتاً وأُزيحت الصفيحتان بالنسبة لبعضهما جانبياً فإن مساحة التراكب ستتغير وسينتج عن ذلك علاقة بين الإزاحة والسعة يمكن أن تكون خطية وهذا يعتمد على شكل الصفيحتين الفعليتين.

تعني العلاقة العكسية بين C و d أن الحساسية تزداد إذا ما تناقصت المسافة بين الصفيحتين. ولذلك فإن المرغوب فيه هو تصميم مجس سعوي بفاصل صغير بين الصفيحتين ومساحة كبيرة للصفيحتين. إلا أنه في حالة مجس الإزاحة فإن التغير في السعة هو المتناسب مع الإزاحة والحساسية ستكون مستقلة عن مساحة الصفيحة ولكنها تزداد كلما اقتربت d من الصفر.

يتم عمل السعة كجزء من هزاز LC من أجل قياس الإزاحة بحيث يمكن تحويل تغير التردد الناتج إلى جهد خرج مكافئ. إلا أن الافتقار إلى التكرارية والصعوبة في موضعة المجس بشكل صحيح يجعلان من القياس مهمة صعبة.

إن المجسات السعوية مجسات إزاحة حساسة جداً. ولذلك فإن المطلوب أن تكون معزولة حرارية وكبلات توصيلها مصنوعة بأقصر ما يمكن لتجنب تورط سعة الكبل في دارة القياس. إن سيئة المجسات السعوية هي حاجتها إلى نظام تغذية بالطاقة عالية التردد خاص من أجل تشغيلها.

(٣,٤,٣) التحريض (المحارضة/ المحاثة) المتغير Variable Inductance

يمكن استخدام التغير في التحريض لقياس الإزاحة بتغيير أي من معاملات الملف (أو الوشيعة) الثلاث المعطاة في المعادلة التالية :

$$L = n^2 G \mu$$

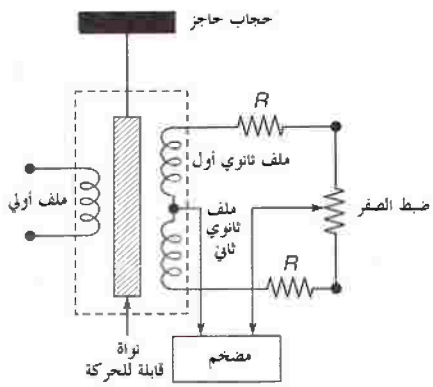
حيث L هي تحريض (محارضة) الوشيعة و n عدد اللفات في وشيعة و μ نفوذية الوسط و G عامل الشكل الهندسي.

يمكن تغيير تحريض الوشيعة إما بتغيير أبعادها الفيزيائية وإما بتغيير نفاذية نواتها المغناطيسية. فالنواة التي لها نفوذية أكبر من الهواء يمكن جعلها تتحرك خلال الوشيعة في علاقة مع الإزاحة. ويمكن قياس التغير في التحريض باستخدام إشارة تيار متناوب تستجيب للإزاحة.

مجس الممانعة المغناطيسية المتغيرة هو مجس آخر مبني على التحريض. تبقى النواة في هذا المجس ثابتة ويتم تغيير الفجوة الهوائية في المسرى المغناطيسي للنواة من أجل تغيير النفوذية الفعالة. ربما تجدر الملاحظة مع ذلك بأن تحريض الوشيعة في هذه الحالات لا تكون علاقته خطية عادة مع إزاحة النواة أو حجم فجوة الهواء خصوصاً إذا كانت الإزاحات الواجب قياسها كبيرة.

(٣,٤,٤) المحولة التفاضلية المتغيرة الخطية Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

هناك ظاهرة مفيدة إلى حد بعيد تُستخدم أحياناً في تصميم وحدات التقاط الإزاحة وهي مبنية على أساس تغيرات في الارتباط بين ملفي محولة عندما تُزاح النواة المغناطيسية للمحولة بالنسبة لموضع هذين الملفين. يمكن استخدام هذه المجسات بشكل مريح لقياس الضغوط الفيزيائية. وعموماً فإن محولة تفاضلية مصممة بناء على هذا المبدأ تُستخدم لهذه الغاية (الشكل رقم ٣,٢). الملف المركزي هو الملف الأولي أو المزود بالطاقة والمربوط إلى هزاز موجة جيبية. الملفان الآخران (الثانويان) مربوطان بحيث إن خرجيهما يكونان متساويين في المطال ومتعاكسين في الطور.



الشكل رقم (٣,٢). مبدأ مجس الضغط ذي المحولة التفاضلية المتغيرة الخطية. المخطط يوضح المحولة التفاضلية والـ ـدارة الجـ ـسرية لكـ ـشف الإشارات التفاضلية.

عندما تكون النواة المغناطيسية الحديدية موضوعة بشكل تناظري بين الملفات ويكون الملفان الثانويان مربوطين على التسلسل فإن جهد الخرج المحرَّض عبرهما سيكون صفراً.

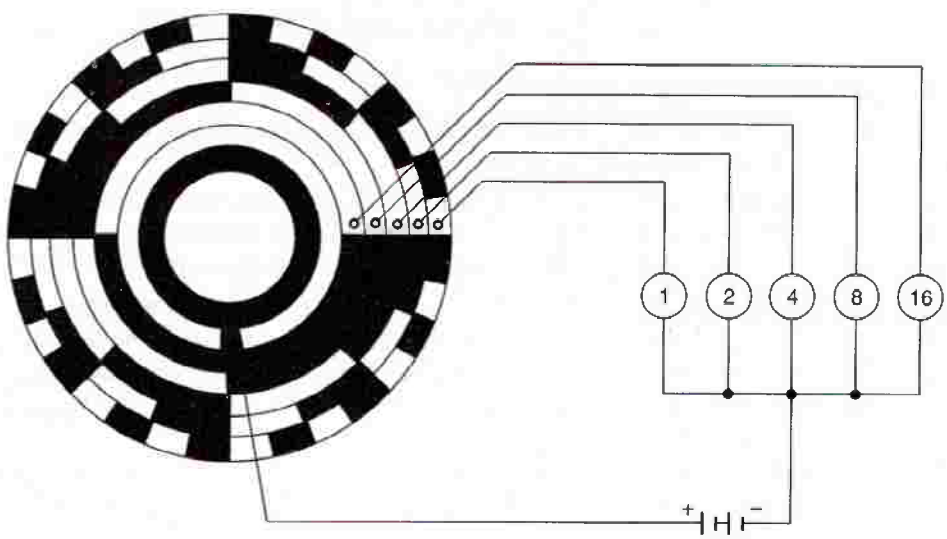
عندما تُحرك النواة فإن الجهد المحرَّض في أحد الملفين الثانويين يزيد على ذاك المحرض في الآخر والمحصلة تكون جهداً عند الخرج. ينعكس طور الخرج إذا ما تحركت النواة متجاوزة الوضع المركزي. ويمكن استخدام دارة جسرية بسيطة للكشف عن الإشارات التفاضلية المنتَجَة بهذا الشكل. ويمكن متابعة معالجة الإشارة ليتم إظهار خرج

معيّر على شكل ميليمتر إزاحة بشكل مباشر. وبما أن هناك بعض الربط السعوي بين ملفات المجسات التفاضلية فإنها تنتج مركبة تعامدية للجهد المحرض في الملفات الثانوية. وبسبب وجود هذه المركبة فإنه من غير الممكن عادة تخفيض جهد الخرج إلى الصفر ما لم يتم تغيير طور الجهد المساند backing voltage.

وتعمل مجسات الإزاحة ذات المحولة التفاضلية عموماً بالمشاركة مع مضخمات حاملة. يبلغ تهييج التشغيل النموذجي لهذه المجسات ٦ فولت عند ٢,٥ كيلو هرتز. ولما كان جهد خرج الـ LVDT متناسب طرداً مع جهد التهييج فإن الحساسية تُحدد عند تهييج ١ فولت. تملك الأجهزة التجارية نموذجياً حساسية ٠,٥–٢ ميلي فولت لكل ٠,٠٠١ سنتيمتر إزاحة من أجل دخل ١ فولت. هناك إزاحات متاحة لكامل التدريج ٠,٠٠١–٢٥ سنتيمتر مع خطية ± ٠,٢٥٪.

(٣,٤,٥) المرمزات الخطية أو الزاوية Linear or Angular Encoders

مع الاستخدام المتزايد للتكنولوجيا الرقمية في التجهيزات الحيوية الطبية فقد أصبح من المرغوب فيه امتلاك مجسات تستطيع أن تعطي الخرج بالشكل الرقمي مباشرة. وهناك الآن مجسات متاحة لقياس الإزاحة الخطية أو الزاوية تعطي خرجاً بالشكل الرقمي. هذه المجسات هي في الأساس أقراص أو مساطر مرمَّزة بأنماط رقمية محفورة تصويرياً على صفائح زجاجية. يُفك ترميز هذه الأنماط باستخدام مصدر ضوء ومصفوفة من الكاشفات الضوئية (ديودات أو ترانزستورات ضوئية). يتم الحصول على إشارة رقمية تشير إلى وضعية القرص المرمِّز والتي تمثل الإزاحة الجاري قياسها. ويوضح الشكل رقم (٣,٣) أنماطاً نموذجية على المرمزات الرقمية.



الشكل رقم (٣,٣). مرمز حيزي يستخدم نظام عد ثنائياً.

يتألف المرمز من قرص إسطواني بأنماط الترميز مرتبة على شكل حلقات متمحورة لها عدد محدد من المقاطع على كل حلقة. يتناقص عدد المقاطع على الحلقات المتمحورة في عد ثنائي (٣٢-١٦-٨-٤-٢) من اثنين وثلاثين مقطعاً (١٦ مقطعاً ناقلاً و١٦ غير ناقل) على الحلقة الخارجية نزولاً إلى مقطعين على الحلقة الداخلية. وسيكون لكل وضع زاوي للقرص مجموعة مختلفة من المقاطع تشير إلى وضع المحور المركب عليه القرص. ولما كان للحلقة الخارجية من المرمز القرصي ٣٢ منطقة مميَّزة فإن دقة التمييز ستكون (١١,٢٥) درجة ((٣٢/١) (٣٦٠°)). ويمكن تحسين دقة التمييز بزيادة عدد المقاطع على كل حلقة ومن ثمَّ إنقاص قيمة الزاوية المقابلة لكل مقطع.

(٣,٤,٦) المبدلات (ا سات) الكهروضغطية Piezo-electric Transducers

الأثر الكهروضغطي خاصية تتمتع بها المواد البلورية الطبيعية تطور بموجبها كموناً كهربائياً على طول محور بلوري crystallographic axis في استجابة لحركة الشحنات كنتيجة للتشوه الميكانيكي. وبذلك فالكهرباء الضغطية (البيزوية) كهرباء ضغط. الأثر العكسي موجود أيضاً، فعندما يُطبق حقل كهربائي تغير البلورة شكلها. عند تطبيق ضغط ما فإن الشحنة Q الناشئة على طول محور معين تُعطى بالعلاقة:

$$Q = d.F \qquad \text{coulomb}$$

حيث d هو الثابت الكهروضغطي (يعبر عنه بالكولومب لكل نيوتن C/N) و F هي القوة المطبقة. ويمكن إيجاد التغير في الجهد بافتراض أن النظام يعمل كمكثف (سعة) بصفيحتين متوازيتين حيث الجهد E_o عبر المكثف هو حاصل قسمة الشحنة Q على السعة C ولذلك فإن:

$$E_o = Q / C = d.F / C$$

إن السعة بين صفيحتين متوازيتين بمساحة a ومفصولتين بمسافة x تعطى بالعلاقة:

$$C = \varepsilon (a/x)$$

حيث ε هو ثابت العزل الكهربائي للعازل بين الصفيحتين، وبذلك فإن:

$$E_o = (d/\varepsilon) (F/a).x = g . P . x$$

حيث $g = d/\varepsilon$ يُعرَّف بأنه حساسية الجهد بالفولت و P هو الضغط المطبق و x هي سماكة البلورة.

القيم النموذجية لـ d هي (٢,٣) كولومب لكل نيوتن للكوارتز و١٤٠ كولومب لكل نيوتن لتيتانات الباريوم. ومن أجل مجس كهروضغطي بمساحة ١ سنتيمتر مربع وسماكة ١ ميليمتر وقوة مطبقة ناتجة عن ثقل كتلة (١٠) غرام فإن جهد الخرج هو ٠,٢٣ و ١٤ ميلي فولت لبلورات الكوارتز وتيتانات الباريوم على الترتيب.

ويتلخص مبدأ العمل في أنه عندما تُشوَّه شبكة بلورية غير متناظرة فإنه يحدث إعادة توجيه للشحنة وينتج عن ذلك إزاحة نسبية للشحنات السالبة والموجبة. تحرض الشحنات الداخلية المزاحة شحنات سطحية من قطبية معاكسة على الأطراف المقابلة للبلورة. ويمكن تحديد الشحنة السطحية بقياس الفرق في الجهد بين إلكترودين مربوطين إلى السطحين.

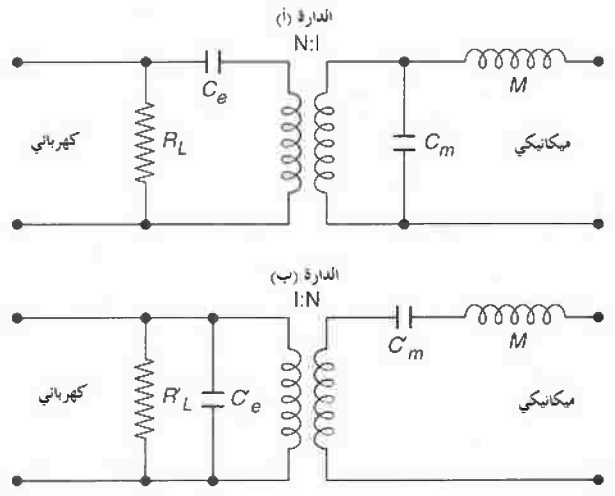
تمتلك المواد الكهروضغطية مقاومة مرتفعة، ولذلك فعندما يُطبَّق تشويه ساكن (ستاتيكي) فإن الشحنة تتسرب عبر مقاومة التسرب. وبذلك فإنه من المهم أن تكون ممانعة الدخل لجهاز قياس الجهد أعلى من تلك التي للحساس الكهروضغطي على وجه الوجوب.

وسعياً وراء توصيف سلوك العناصر الكهروضغطية فقد استخدِمت تقنيات الدارات المكافئة. إن أوجه الشبه أو التقابل بين النظامين الكهربائي والميكانيكي التي استخدمت للهياكل الكهروضغطية هي كما يلي:

الكمية الكهربائية	جهد	تيار	شحنة	سعة	تحريض(محاثة)	ممانعة
الكمية الميكانيكية المقابلة	قوة	سرعة	إزاحة	مطاوعة compliance	كتلة	ممانعة ميكانيكية

يوضح الشكل رقم (٣,٤) دارتين مكافئتين أساسيتين. إذا كانت الثوابت في الدارتين ذات علاقة ببعضها بشكل مناسب فإن الدارتين تكونان متكافئتين عند جميع الترددات. تمثل النهايات الطرفية الميكانيكية نقطة أو وجه نقل الطاقة الميكانيكية إلى أو من العنصر الكهروضغطي. ويمثل رمز التحريض (المحاثة) الكتلة المهتزة الفعالة للعنصر. ويمثل رمز المحولة محولا كهروميكانيكياً مثالياً (جهاز يحول الجهد إلى قوة وبالعكس والتيار إلى سرعة وبالعكس). نسبة التحويل (N:1) في الدارة (أ) هي نسبة دخل الجهد إلى خرج القوة للمحول المثالي وأيضاً هي نسبة دخل السرعة إلى خرج التيار. نسبة التحويل (1:N) في الدارة (ب) لها نفس الدلالة. تمثل رموز السعة في الجانب الكهربائي السعات وفي الجانب الميكانيكي المطاوعة الميكانيكية.

هناك عدد من المواد البلورية المعروفة إلا أن البلورات الكهروضغطية ذات الانتشار الأوسع في الاستخدام هي بلورات الكوارتز والتورمالين وفوسفات الأمونيوم ثنائي الهيدروجين وملح روشيل وكبريت الليثيوم وزيركونات الرصاص وتيتانات الباريوم.



الشكل رقم (٣,٤). دارات مكافئة لعناصر كهروضغطية.

إن الكوارتز هو البلورة الطبيعية الأكثر استقراراً مع استقرارية ميكانيكية وحرارية مرتفعتين وله مقاومة نوعية حجمية أعلى من ١٠٠٠٠ أوم سنتيمتر وضياع كهربائي صغير. أما ملح روشيل فله متانة ميكانيكية منخفضة ومقاومة نوعية حجمية مرتفعة (10^{12} أوم سنتيمتر) ويتأثر بالرطوبة. يتمتع فوسفات الألمنيوم ثنائي الهيدروجين باستقرارية حرارية عالية وبمقاومة نوعية حجمية 10^{12} أوم سنتيمتر وبحساسية عالية. سيراميك تيتانات الباريوم عبارة عن بلورة حديدوكهربائية (فروكهربائية) وله جهد خرج صغير. العلاقة بين خرج الجهد ودخل التمدد خطية فقط في مجال صغير جداً وتتأثر بالرطوبة ولها مجال قياس ١-٢٠٠٠ نيوتن وخطية ضمن $\pm$ ١٪ وهي بسيطة البنية وذات طبيعة صلبة ومتينة في الاستعمال ومفضلة من أجل القياسات الحركية.

تباع المجسات الكهروضغطية التي تصنعها شركة Brush Clevite تحت اسم (PZT) والذي يشير إلى مركب زيركونات الرصاص- تيتانات الرصاص، وهي متاحة بأنواع كثيرة لتطبيقات محددة مثل:

- PZT-2: يُستخدَم لتطبيقات الموجات فوق الصوتية عالية التردد وخطوط التأخير delay lines.
- PZT-4: يُستخدَم للمجسات ذات الإشعاع الصوتي عالي الطاقة من أجل الاستخدام في تطبيقات النوع ذي الانغماس العميق وكعنصر فعال في أنظمة الطاقة الكهربائية.
- PZT-5A: له حساسية عالية واستقرار زمني عالٍ ومقاومة نوعية مرتفعة في درجات الحرارة المرتفعة. يُستخدم غالباً في الهيدروفونات وتطبيقات الآلات.
- PZT-5H: له مقاومة نوعية وثابت عازلية كهربائية أعلى من سابقه PZT-5A إلا أن استقراره الحراري أقل ومجال درجة حرارة تشغيل محدود.
- PZT-8: مادة عالية الطاقة لها ضياعات عزل كهربائي أقل بكثير تحت سواقة كهربائية عالية.

المواد الكهروضغطية متاحة أيضاً كأغشية بوليميرية مثل البولي فينيليدين فلوريد PVDF. هذه الأغشية رقيقة جداً وخفيفة الوزن ومرنة ويمكن تقطيعها بسهولة من أجل ملاءمتها لأطقمة غير مستوية. هذه الأغشية غير ملائمة لتطبيقات رنينية بسبب عامل الجودة الميكانيكية المنخفض، إلا أنها تُستخدم بشكل واسع في التطبيقات الصوتية عريضة الحزمة للميكروفونات ومكبرات الصوت.

تجد المجسات الكهروضغطية تطبيقات عديدة في مجال التجهيزات الطبية. فهي تُستخدم في الماسحات (سكانرز) فوق الصوتية لتصوير وقياس تدفق الدم، كما تُستخدم في كشف أصوات كوروتكوف في قياسات ضغط الدم غير الاجتياحية وفي التخطيط القلبي الصوتي الخارجي والداخلي. إن تفاصيل بنية هذه المجسات والمتطلبات والخصائص المرافقة معطاة في فصول الكتاب ذات العلاقة.

(٣,٤,٧) حساسات إزاحة أخرى Other Displacement Sensors

يمكن كشف الوضعية والحركة باستخدام مجسات بصرية. ويمكن استخدام مطال ووضعية الضوء المرسل والمنعكس كليهما لقياس الإزاحة. كما يمكن استخدام ليف بصري للكشف عن الإزاحة بقياس شدة الضوء المرسل أو فرق الطور بين الحزمة القائسة وحزمة مرجعية.

وبشكل مشابه فإنه يمكن استخدام الإشعاعات فوق الصوتية والميكروية والأشعة السينية والإشعاعات النووية من أجل تحسس الوضعية، وقد تم تغطية ذلك في الفصول ذات العلاقة في أماكن أخرى من الكتاب.

(٣,٥) مبدلات (مجسات) الضغط
Pressure Transducers

إن الضغط معامل (بارامتر) قياس ذو قيمة في المجال الطبي. ولذلك فقد طُوِّر كثير من الأجهزة لتقوم بتحويله إلى إشارة كهربائية قابلة للقياس. إن المبدأ الأساسي وراء جميع مجسات الضغط هذه هو أن الضغط المراد قياسه يُطبَّق على حجاب حاجز diaphragm مرن يتغير شكله بفعل الضغط المطبق عليه، وتُقاس حركة الحجاب هذه على شكل إشارة كهربائية.

وفي أبسط شكل له فإن الحجاب الحاجز عبارة عن صفيحة مسطحة رقيقة ذات شكل دائري مثبتة من طرفها بقوة إلى جدار الوعاء الذي يحويها. مواد الحجاب الحاجز النموذجية هي الفولاذ الذي لا يصدأ والبرونز الفوسفوري ونحاس البيريليوم.

إن الضغط المطلق هو الضغط المنسوب إلى الفراغ، أما ضغط القياس فمنسوب إلى الضغط الجوي. والوحدات الشائع استعمالها للضغط معرَّفة عند درجة حرارة صفر مئوية هي[1]:

---

(١) ملاحظة المترجم: هناك خطأ في نص الكتاب الإنكليزي في بعض هذه الوحدات (الدين/سم^2 والبار) وقد تم هنا تصحيحها.

ضغط (١) ميليمتر زئبق = (١) توريشيلي = ١٢,٩ ميليمتر دم = (١٣,١) ميليمتر سالين = (١٣,٦) ميليمتر ماء = ١٣٣٣,٢٢ دين لكل سنتيمتر مربع = (١٣٣٣) (١٠)$^{-٦}$ بار = (١٣٣,٣٢) باسكال = ٠,١٣٣ كيلو باسكال.

يتوجب على نظام الجس ككل من أجل إعادة إنتاج أمينة لمناسيب الضغط أن يكون له استجابة ترددية متماثلة حتى الهارمونية (التوافقية) العشرين للتردد الأساسي للإشارة على الأقل. وينبغي من أجل تسجيل ضغط الدم (الذي معدله، لنقل، ٧٢ نبضة في الدقيقة أو ١,٢ هرتز) أن يكون للنظام استجابة ترددية خطية حتى ٣٠ هرتز على الأقل.

إن مجسات الضغط الأكثر شيوعاً في الاستعمال والتي تستخدم الحجاب الحاجز هي الأنواع التالية:

- *مقياس الضغط السعوي*: ويشكل فيه الحجاب الحاجز صفيحة من مكثف (سعة).
- *المحولة التفاضلية*: وفيه يكون الحجاب الحاجز مثبتاً إلى نواة محولة تفاضلية.
- *مقياس التمدد (أو الانفعال/الإجهاد)*: وفيه يكون جسر مقياس التمدد مربوطاً إلى الحجاب الحاجز.

يمكن تحويل مجسات الإزاحة بسهولة إلى مجسات ضغط بتثبيت حجاب حاجز إلى العضو المتحرك من المجس بحيث أن الضغط يكون مطبقاً على الحجاب الحاجز. إن مجسات الضغط التالية متاحة تجارياً:

(٣,٥,١) مجس الضغط ذو الـ LVDT LVDT Pressure Transducer

تتكون مجسات الضغط ذات الـ LVDT (المحولة التفاضلية المتغيرة الخطية) من ثلاثة أجزاء: قبة بلاستيكية بملائمين لور- لوك Luer-Lok أنثويين وحجاب حاجز من فولاذ لا يصدأ ومجموعة نواة وجسم بلاستيكي يحتوي مجموعة ملفات المحولة التفاضلية. المجسات متاحة تجارياً في اصطفاف كامل لمجالات الضغط مع الحساسيات المقابلة وحجم الإزاحات وخصائص الاستجابة الترددية. إن مجسات الضغط ذات الـ LVDT متاحة في مجموعتين أساسيتين للحجاب الحاجز والنواة. الأولى من أجل قياسات وريدية وسريرية ذات هدف عام ولها حجاب حاجز بقياس معياري مع سائل داخلي بين القبة والحاجز أقل من (٠,٥) سنتيمتر مكعب. التصميم الثاني بخصائص استجابة أعلى من أجل مناسيب ضغط شرياني، له مساحة حجاب حاجز أصغر وحجم داخلي قدره ٠,١ سنتيمتر مكعب تقريباً. يمكن تعقيم المقياس بغاز أكسيد الإيتيلين أو طرق السائل البارد. وتقدم المقاييس ذات الـ LVDT خطية أفضل من ± ١٪.

تتكون مجسات الضغط الشرياني من محولات تفاضلية صغيرة جداً ذات نوىً بالغة الصغر. إن للمجس النموذجي المتاح تجارياً قطراً خارجياً يبلغ ٣,٢ ميليمتر وطولا قدره ٩ ميليمتر وحركة النواة القابلة للحركة ± ٠,٥ ميليمتر ويعطي خرجاً كهربائياً لكامل المجال قدره ١٢٥ ميلي فولت لكل ميليمتر (٦٢,٥ في كل اتجاه. ولقد صمم Baker et al (1960) مجس ضغط ذا محولة تفاضلية بالغ الصغر يمكن تثبيته مباشرة إلى قلب كلب. وقد كانت أبعاد

المجس ١٢,٥ في ٦,٥ ميليمتر وأعطى متوسط حساسية قدره ٣٨ ميلي فولت لكل ميليمتر زئبق ولكل فولت مطبق على ملفات الدخل. وقد قيس الانحراف الصفري كأقل من ٠,٢ ميليمتر زئبق لكل درجة مئوية.

(٣,٥,٢) مجسات الضغط ذات مقياس التمدد (الانفعال/الإجهاد)

Strain Gauge Pressure Transducers

تستخدم جميع أنظمة مراقبة الضغط المتاحة تجارياً تقريباً مجسات ضغط من نوع مقياس التمدد (الانفعال/الإجهاد) من أجل قياسات الضغط داخل الشريانية وداخل الوريدية. يستند المجس إلى التغيرات في مقاومة السلك الناتجة عن إزاحات ميكانيكية. هناك علاقة خطية بين التشوه والمقاومة الكهربائية لمقياس منتقى بشكل ملائم (سلك، رقاقة) على مدى مجال محدد.

إن المقدار الأهم الذي يصف السلوك الكلي لسلك تحت الإجهاد يحدده "عامل القياس" gauge factor المُعرَّف كما يلي:

$$g = (\Delta R/R)/(\Delta L/L)$$

حيث ΔR هو التزايد في المقاومة العائد إلى الإجهاد و R مقاومة السلك غير مشدود وL طول السلك من دون شد وΔL التزايد في الطول.

وطبقاً لذلك فإن عامل القياس يعطي معلومات عن التغير المتوقع للمقاومة أو إشارة الخرج عند أكبر تطاول مسموح به. يحدد عامل القياس إلى حد بعيد حساسية السلك عندما يُحوَّل إلى مقياس تمدد عملي. ويتغير عامل القياس حسب المادة، ولذلك فإن انتقاء مادة ذات عامل قياس مرتفع أمر يُنصح به، ولكن ينبغي انتقاء السلك المستخدم ذي معامل المقاومة الحراري الأدنى. ويوضح الجدول رقم (٣,٤) عامل القياس لمواد مختلفة إلى جانب عامل المقاومة الحراري.

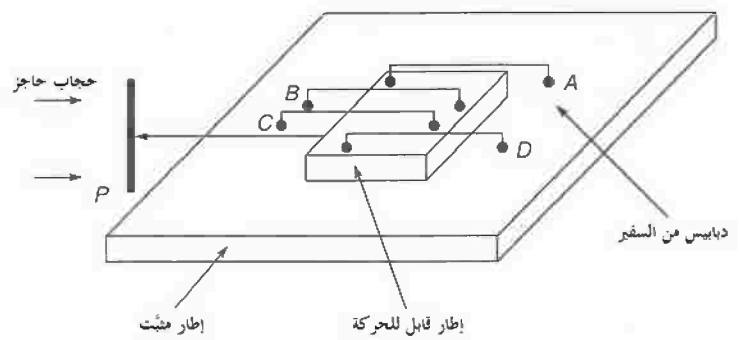
الجدول رقم (٣,٤). معامل القياس لمواد مختلفة.

المادة	عامل القياس	عامل المقاومة الحراري (أوم/أوم/درجة مئوية)
كونستانتان	٢	٢×١٠^{-٦}
بلاتين	٦,١	٣×١٠^{-٣}
نيكل	١٢,١	٦×١٠^{-٣}
سيليكون	١٢٠	٦×١٠^{-٣}

يبدو فيما يتعلق باعتبارات الحساسية أن السيليكون نصف الناقل هو الاختيار الواضح ولكنه من الواضح أنه يعتمد على درجة الحرارة بشكل كبير. ومع ذلك فقد تم تطوير تقنيات للتعويض جزئياً عن هذا الأثر الحراري باستخدام ثرمستورات وتجميع لمقاييس من نوع p و n منتقاة بشكل مناسب. ويمكن تصنيع مقاييس التمدد السيليكونية بحيث يكون لها عوامل قياس إما موجبة وإما سالبة وذلك بالإشابة الانتقائية للمادة. بهذه الطريقة، ومن أجل انفعال انضغاطي فقط، فإنه يمكن إنتاج تغيرات مقاومة موجبة وسالبة. ويمكن الحصول على حساسية مزدوجة باستخدام مقياسين من كل نوع مرتبين على شكل دارة جسرية ويمكن جعلها تستجيب لانفعالات من نفس الإشارة في كل من الأذرع الأربعة.

مقاييس التمدد (الانفعال) غير المرتبطة: إن غالبية مجسات الضغط من أجل القياس المباشر لضغط الدم هي من نوع مقياس التمدد السلكي غير المرتبط. تكمن الترتيبة في تركيب أسلاك تمدد لإطارين يمكن أن يتحركا بالنسبة لبعضهما.

الإطار الخارجي مثبت أما الإطار الداخلي الموصَّل إلى الحجاب الحاجز الذي يطبَّق عليه الضغط فهو متحرك. فإذا ما طُبّق ضغط P في الاتجاه الموضح في الشكل رقم (٣,٥) فإنه يؤدي إلى شد السلكين B و C وارتخاء السلكين A و D.

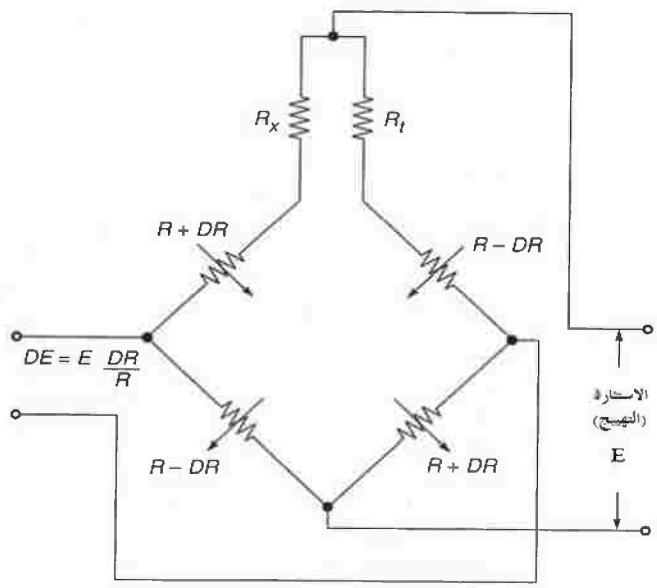


الشكل رقم (٣,٥). مخطط تمثيلي لمجس ضغط ذي مقياس تمدد (انفعال) غير مرتبط.

هذه الأسلاك تشكل جسراً فعالاً بأربعة أذرع. يُركَّب الإطار المتحرك على نوابض تعيده إلى الموضع المركزي المرجعي عندما لا يكون هناك ضغط مطبق على الحجاب الحاجز. ولقد لوحظ أنه حتى بعد استخدام أقصى حذر أثناء التصنيع فإنه من غير الممكن إنتاج إشارة خرج صفرية للمجس عند ضغط صفري. وربما يعود هذا إلى الطبيعة غير المتجانسة للسلك وعدم دقة أبعاد التصنيع والتجميع التي لا يمكن تجنبها. ولذلك توضع

مقاومات إضافية في بيت المقياس لضبطه كهربائياً (الشكل رقم ٣,٦). ويمكن التوصل إلى تصفير الجسر بواسطة المقاومة R_x موصولة على التسلسل. وبشكل مشابه يتم توصيل مقاومة R_1 على التسلسل في ذراع الجسر الأخرى من أجل تعويض انزياح نقطة الصفر الذي يسببه تغيرات درجة الحرارة.

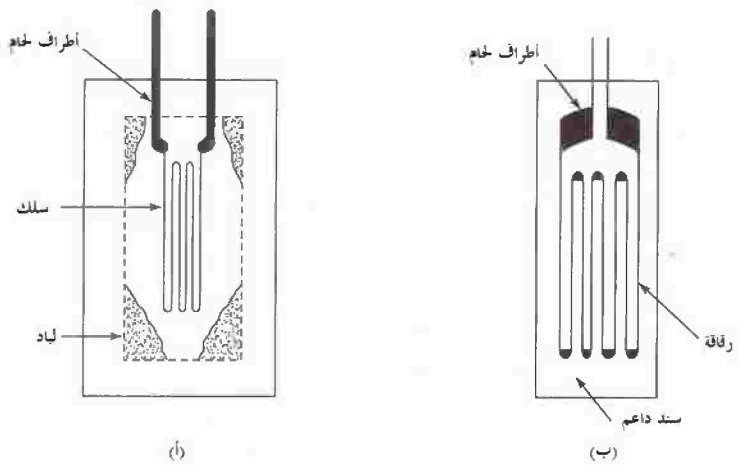
تفضل المجسات ذات مقياس التمدد (الانفعال) غير المرتبط عندما تكون القياسات لضغط منخفض لأن أخطاء البطاء أقل بكثير مما هي الحال لو كانت مقاييس التمدد مربوطة إلى الحجاب الحاجز. ويمكن تصنيع مجسات مقياس التمدد غير المرتبط صغيرة بما فيه الكفاية لتلائم حتى التركيب على رأس قثطار قلبي.



الشكل رقم (٣,٦). مقاومات مركبة في بيت مقياس الضغط لتمكين الضبط الصفري عند شروط الضغط الصفري.

مقاييس التمدد (الانفعال/الإجهاد) المرتبطة: يتألف مقياس التمدد المرتبط من مقاييس حساسة للتمدد مرتبطة بشكل ثابت بواسطة مادة لاصقة إلى الغشاء أو الحجاب الحاجز المراد تسجيل حركته. وتصنع عملياً بأخذ قطعة من سلك رفيع جداً (بقطر ٢٥ ميكرون مثلاً) أو رقاقة مشكَّلة في نمط شبكي (القسمان أ و ب من الشكل رقم ٣,٧) وربطها إلى مادة داعمة. المادة الداعمة المستعملة بشكل شائع هي الورق أو الورق المعالج بالباكليت (راتنج اصطناعي من الفينول والفورمالدهيد) أو مادة مشابهة. ولأغراض قياس الضغط يُثبَّت مقياس تمدد مبني كما ذكر أعلاه إلى حجاب حاجز. إن تشوه الحجاب تحت الضغط يتسبب في تمدد المقياس السلكي. وبما أن التشوه متناسب طرداً مع الضغط فإنه ينشأ عن ذلك علاقة مباشرة بين الضغط والمقاومة.

وباستعمال زوج من المقاييس وتركيبها واحداً فوق الآخر فإن التغيرات في المقياسين الناتجة عن التغيرات في درجة حرارة المحيط يمكن حذفها. وأيضاُ عندما يُطبَّق ضغط عليهما فإن أحد مقياسي التمدد تزيد مقاومته بينما تتناقص مقاومة الآخر.



الشكل رقم (٣,٧). (أ) مجس ضغط نوع مقياس تمدد سلكي مرتبط. (ب) مقياس تمدد رقاقي منمس (محفور) etched.

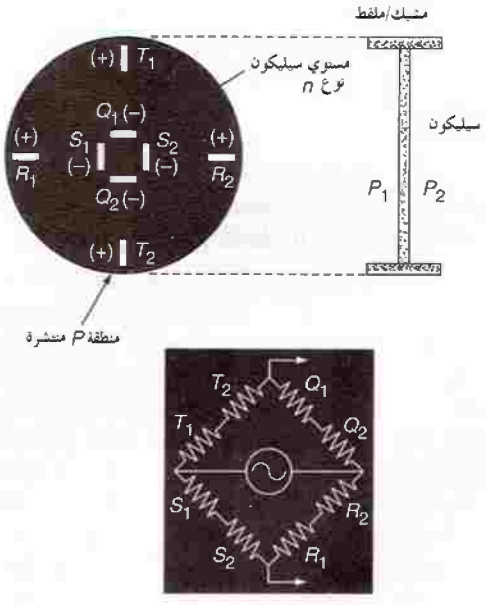
مقاييس التمدد المرتبطة السيليكونية: لقد كان هناك في السنوات الأخيرة ميل متزايد لاستخدام مقاييس مرتبطة مصنوعة من نصف ناقل سيليكوني بدلاً من سلك أو رقاقة، وهذا بسبب عامل القياس المرتفع الذي يملكه والذي ينتج عنه حساسية أكبر وبسبب إمكانية التصنيع الدقائقي.

يوضح القسم (ج) من الشكل رقم (٣,٧) ترتيبة فيها العناصر السيليكونية ذات الإشابة الموجبة لجسر ويتستون منتشرة مباشرة على قاعدة من السيليكون ذي الإشابة السالبة. وبالرغم من أن مقاييس التمدد نصف الناقلة حساسة جداً للتغيرات في درجة الحرارة، إلا أن الاحتواء على ثمانية عناصر تشكل الأذرع الأربعة المقاومة لجسر يزيل هذه المشكلة بتعريض جميع هذه العناصر إلى درجة الحرارة نفسها.

تُستبدل في مقاييس التمدد المرتبطة السيليكونية رقاقة سيليكونية وحيدة بالسلك أو الرقاقة التقليديين، وتكون معالجة لتكون بأبعاد أقل من ١٢,٥ ميكرومتر سماكة و ٠,٢٥ ميليمتر عرضاً. يُركَّب الشريط بعد ذلك على قاعدة من الإيبوكسي ريزين والليف الزجاجي مع أشرطة من النيكل للتوصيلات الكهربائية.

وتُستخدم أسلاك من الذهب للربط بين السيليكون والنيكل. تُغطى كامل المجموعة بالإيبوكسي ريزين لحمايتها من الظروف البيئية. تتغير مقاومة أسلاك التوصيل وسعتها مع درجة الحرارة، ولذلك يجب أن تكون أسلاك التوصيل من مقياس التمدد إلى جسر ويتستون ذات معاوضة حرارية. ويمكن تأمين المعاوضة لتغير درجة الحرارة في الأسلاك باستخدام طريقة الأسلاك الثلاثية. في هذه الطريقة يكون سلكان من الأسلاك في سيقان مجاورة للجسر

الذي يلغي تغيرات مقاومتهما ولا يشوش على توازن الجسر. السلك الثالث يكون على التسلسل مع التغذية بالطاقة وبالتالي مستقل عن توازن الجسر.



الشكل رقم (٣,٧). (ج) مقياس تمدد نوع p منتشر.

تُنظَّم تغذية الجسر بالطاقة ويُعاوض حرارياً. العناصر الضغطية- المقاومة piezo-resistive هي الأذرع الأربعة لجسر ويتستون وتتألف من أربع مناطق ذات إشابة موجبة (بورون) منتشرة إلى الرقاقة السيليكونية نوع n الطرفية. مجال المجس ٠-١٠ ضغط جوي وله خطأ بطاء ± ٠,١٪ من كامل التدريج ومعامل حراري ± ٢-٣ ميلي فولت لكل درجة مئوية. ويعطي هذا المجس خرجاً قدره ± ٠,٧٥ فولت لكل مئة ميليمتر زئبق. ويسمح الخرج المرتفع باستخدام هذا المجس عملياً مع أي مسجل تيار مستمر.

(٣,٦) مبدلات (مجسات) قياس درجة حرارة الجسم
Transducers for Body Temperature Measurement

إن الطريقة الأكثر شعبية لقياس درجة الحرارة هي استخدام ميزان الحرارة ذي الزئبق في الزجاج. إلا أن هذه الموازين بطيئة وصعبة القراءة وعرضة للتلوث. كما أنه لا يمكن الحصول على دقة ذات موثوقية بها خصوصاً على مدى المجال العريض الذي وجد أنه ضروري الآن. إن من المرغوب فيه في كثير من الحالات ذات درجة حرارة الجسم المنخفضة أن تؤخذ عينات من درجة الحرارة بشكل مستمر أو متكرر كما في غرفة العمليات وغرفة الإنعاش بعد العملية ووحدة العناية المركزة وأثناء الإبالة (التبول) القسري ونقل الدم بكميات كبيرة وانخفاض الحرارة العرضي.

إن إمكانية القراءة المستمرة في مقاييس الحرارة الإلكترونية تجعل منها ملائمة لمثل هذه التطبيقات. إن مقاييس الحرارة الإلكترونية مناسبة وذات موثوقية وأكثر دقة عموماً في الممارسة من أجل التطبيقات الطبية من مقاييس الحرارة ذات الزئبق في الزجاج. وتستخدم مقاييس الحرارة الإلكترونية غالباً مسابر تتضمن ثرمستوراً أو حساساً ذا مزدوجة حرارية والتي لها خصائص استجابة سريعة. المسابر قابلة لإعادة الاستعمال عموماً وأغطيتها تستعمل لمرة واحدة.

يمكن استخدام مسابر ذات ثرمستورات صغيرة من أجل قياسات مريئية (في المريء) وشرجية وجلدية وتحت جلدية وداخل العضلات والأوردة وفي القثاطر القلبية. وتُستخدم المزدوجات الحرارية عادة لقياس درجة حرارة سطح الجلد، إلا أن هناك أيضاً مسابر شرجية متاحة ذات مزدوجات حرارية. تُستخدم مقاييس الحرارة ذات المقاومة عادة لقياس درجة حرارة الجسم ودرجة الحرارة الشرجية. ويقيس مقياس الحرارة ذو المقاومة والثرمستور درجة الحرارة المطلقة بينما تقيس المزدوجات الحرارية درجة الحرارة النسبية عموماً.

(٣,٦,١) المزدوجات الحرارية Thermocouples

عند وصل سلكين من مادتين مختلفتين مع بعضهما عند طرفيهما ليشكلا اتصالين يُحافظ عليهما عند درجتي حرارة مختلفتين فإن قوة محركة كهربائية emf حرارية تتولد مسببة سريان تيار في الدارة. تسمى هذه الترتيبة بالمزدوجة الحرارية. يشار إلى الوصلة عند درجة الحرارة الأكبر بالوصلة الساخنة أو وصلة القياس وإلى تلك التي عند درجة الحرارة الأصغر بالوصلة الباردة أو المرجعية. يُحافظ على الوصلة الباردة عادة عند درجة الصفر المئوية.

إن القوة المحركة الكهربائية الحرارية وبالتالي التيار الناتج متناسبان طرداً مع الفرق في درجة الحرارة الموجود بين الوصلتين وذلك على مدى مجال محدود لدرجة الحرارة. ولذلك فهناك قاعدة لقياس درجة الحرارة، فبغمس وصلة في أو على سطح الوسط المراد قياس درجة حرارته وبالمحافظة على الوصلة الثانية عند درجة حرارة ثابتة أخفض (الصفر عادة) يتم إنتاج قوة محركة كهربائية متناسبة طرداً مع الفرق في درجة الحرارة بين الوصلتين. ويحافَظ على الوصلة المرجعية عادة عند درجة الصفر المئوية داخل قارورة مفرغة من الهواء تحتوي على ثلج ذائب.

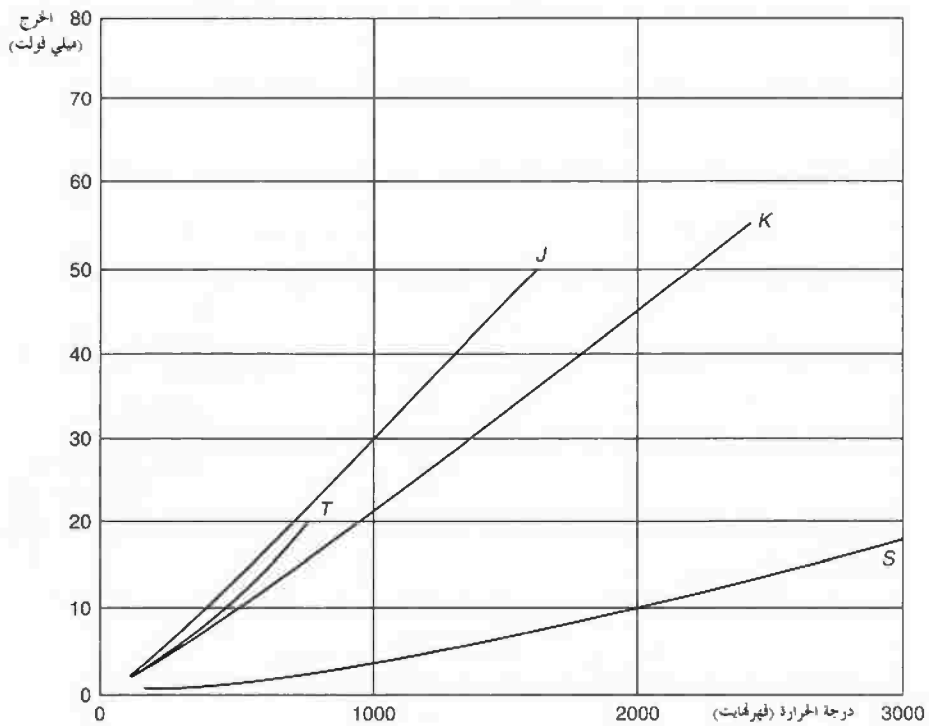
تتغير كمية التغير في الجهد لكل درجة من تغير درجة الحرارة للوصلة مع تغير أنواع المواد المصنوع منها هذه الوصلة، ويعطي الجدول رقم (٣,٥) الحساسيات الجهدية لمزدوجات حرارية مصنوعة من معادن مختلفة.

الجدول رقم (٣,٥). القوة المحركة الكهربائية الحرارية لأنواع مختلفة من المزدوجات الحرارية.

النوع	المزدوجة الحرارية	ا ىال المفيد (درجة مئوية)	الحساسية عند (٢٠) درجة مئوية (ميلي فولت/درجة مئوية)
T	نحاس - كونستانتان	-١٥٠إلى +٣٥٠	٤٥
J	حديد - كونستانتان	-١٥٠إلى +١٠٠٠	٥٢
K	كروميل- ألوميل	-٢٠٠إلى +١٢٠٠	٤٠
S	بلاتين- بلاتين ٩٠٪ روديوم ١٠٪	صفر إلى +١٥٠٠	٦ر٤

يوضح الشكل رقم (٣,٨) العلاقة بين القوة المحركة الكهربائية ودرجة الحرارة لكل من المزدوجات الحرارية شائعة الاستعمال. تنبثق من هذا الرسم حقيقتان هامتان: الأولى هي أن الحساسية لكل منحنٍ (الميل) مختلفة، والثانية هي أنه ليس لأي من المنحنيات معدل تغير خطي بالكامل لخرج القوة المحركة الكهربائية لكل درجة فهرنهايت. وهذا يشير إلى أن لكل نوع من المزدوجات الحرارية استجابة لدرجة الحرارة فريدة غير خطية.

وبما أن غالبية أجهزة التسجيل والإظهار خطية فإن هناك حاجة لجعل خرج المزدوجة الحرارية خطياً بحيث إن الخرج المُظهَر يصبح مرتبطاً مع درجة الحرارة الفعلية. لا تعتمد حساسية المزدوجة الحرارية على مقاس الوصلة أو الأسلاك التي تشكلها حيث أن لكمونات التماس الناشئة علاقة بالفرق في تابع العمل للمعدنين.



الشكل رقم (٣,٨). القوة المحركة الكهربائية كتابع لدرجة الحرارة لأنواع رئيسية من المزدوجات الحرارية (بموافقة Gould Inc.).

يفضل عادة من أجل التطبيقات الطبية خليط النحاس–الكونستانتان. ويبلغ خرج مثل هذه المزدوجة الحرارية ١,٥ ميلي فولت مع كون الوصلة المرجعية عند درجة الصفر مئوية والوصلة الأخرى عند ٣٧,٥ درجة مئوية. وهناك نوعان من أجهزة القياس يمكن استخدامهما مع المزدوجات الحرارية لقياس فروق كمون من هذه المرتبة. يُستخدم في إحداها حركات ملف (وشيعة) متحرك كمقياس ميلي فولت لقياس القوة المحركة الكهربائية للمزدوجة الحرارية، وهي معايرة مباشرة بوحدات درجة الحرارة. يفضل عادة في أجهزة المزدوجة الحرارية السريرية المقاييس

الغلفانية العاكسة أو ذات البقعة الضوئية لقياس وإظهار درجة الحرارة. وإذا ما كانت جهود المزدوجة الحرارية صغيرة (أقل من ميلي فولت واحد) فيمكن قياسها بسهولة بمقسم جهد تيار مستمر دقيق له خلية كادميوم- زئبق نوع ويستون Weston كمرجع. ويمكن أيضاً قراءتها مباشرة من على مقياس جهد رقمي أو باستخدام مضخم تيار مستمر يتم جعله مستقراً بالتقطيع chopper stabilized متبوعاً بمقياس لوحة من النوع التماثلي أو الرقمي.

لقد قاد التجريب الكثير بدارات المزدوجات الحرارية إلى صياغة القوانين التجريبية التالية الأساسية من أجل القياس الدقيق لدرجة الحرارة بوسائل كهروحرارية :

١- المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية الكهروحرارية المولّدة في دارة معطاة محتوية على أي عدد من المعادن المتجانسة غير المتشابهة هو تابع فقط لدرجات حرارة الوصلات.

٢- إذا ما تمت المحافظة على جميع الوصلات ما عدا واحدة في مثل تلك الدارة عند درجة حرارة مرجعية نوعاً ما فإن القوة المحركة الكهربائية المولّدة تعتمد فقط على درجة حرارة هذه الوصلة ويمكن استخدامها كمقياس لدرجة الحرارة.

وبهذا فمن الواضح أنه يمكن تحديد درجة حرارة الوصلة إذا كانت الوصلة المرجعية عند درجة حرارة مختلفة ولكن معروفة. وهذا ذو جدوى في استخدام وصلات مرجعية ذات تحكم فرني ومستثارة كهربائياً.

يمكن فقط تحديد درجة حرارة الوصلة القائسة عن طريق القوة المحركة الكهربائية الحرارية إذا كانت درجة الحرارة المطلقة للوصلة المرجعية معروفة. ويمكن عمل ذلك بإحدى الطرق التالية :

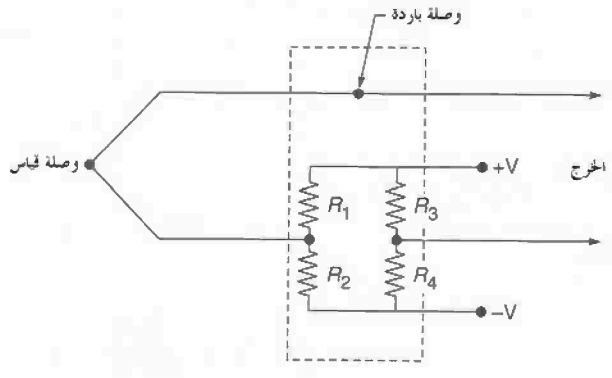
١- قياس درجة الحرارة المرجعية بمقياس حرارة معياري ذي قراءة مباشرة.

٢- احتواء الوصلة المرجعية في حمام مائي ذي درجة حرارة معروفة جيداً كحمام ثلجي مبني بعناية يعطي دقة قدرها ٠,٠٥ درجة مئوية وتكرارية إنتاج قدرها ٠,٠٠١ درجة مئوية.

هناك طريقة أبسط وهي استخدام معاوض درجة حرارة مرجعية يولد قوة محركة كهربائية تعاوض بدقة التغيرات في درجة حرارة الوصلة المرجعية. ويوضح الشكل رقم (٣,٩) جسراً حساساً حرارياً مصمماً ليولد قوة محركة كهربائية تتغير مع درجة حرارة الغلاف (عادة المحيط الخارجي) بحيث أن التغيرات في الوصلة الباردة تُجعل صفراً.

وفي هذه الدارة فإن R_2 مكوِّن حساس لدرجة الحرارة مربوط حرارياً إلى الوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية. يلائم منحني المقاومة- درجة الحرارة لـ R_2 منحني القوة المحركة الكهربائية-درجة الحرارة لمادة المزدوجة الحرارية. يساوي تغير الجهد عبر R_2 الجهد الحراري للوصلة الباردة ويعاكسه في الإشارة على مدى مجال محدود من درجة حرارة المحيط. وإذا ما عانت درجة حرارة الغلاف تغيرات كبيرة فإن هذا النظام يعطي أخطاء. إلا أنه، ومن أجل تغيرات معتدلة ±٥ درجات مئوية، فإنه يجعل الحصول على استقرارية فعالة لدرجة الحرارة المرجعية قدرها ± ٠,٢ درجة مئوية ممكناً. هذا النوع من محاكاة درجة الحرارة المرجعية مناسب للكبت الصفري لدرجة حرارة كبيرة.

وبتحديد درجة الحرارة المرجعية لـ أو بالقرب من درجة الحرارة المراد تسجيلها فإنه يمكن تسجيل تغيرات صغيرة في درجة الحرارة.



الشكل رقم (٣,٩). معاوض وصلة مرجعية من النوع الجسري.

يمكن استخدام حساسات درجة حرارة دقيقة وسهلة المعايرة وذات دارة تكاملية (سلسلة LM 135 من شركة National Semiconductors) بسهولة في دارات معاوضة الوصلة الباردة، وهي ملائمة في دارات معاوضة على مدى مجال لدرجة الحرارة يمتد من −٥٥ إلى +١٥٠ درجة مئوية.

إن الحجم الصغير والاستجابة السريعة جداً للمزدوجات الحرارية تجعل منها مناسبة للقياسات العابرة لدرجة الحرارة داخل الخلية ولقياس درجة الحرارة من داخل الجسم في أماكن مثل المريء والشرج ... الخ. ويمكن إدخالها في قثاطر وإبر تحت جلدية. وهناك إبر خاصة متاحة تجارياً تمكّن من زرع مزدوجة حرارية تحت الجلد وتُسحب الإبرة لترك المزدوجة الحرارية في مكانها. وقد شرح Mekjavic et al (1984) بنية وتقييم مسبار بمزدوجة حرارية لقياس درجة حرارة المريء.

وقد طور Cain and Welch (1974a) مسابر بمزدوجة حرارية بالغة الصغر من غشاء رقيق من النحاس−نيكل من أجل القياسات الساكنة والحركية لدرجة الحرارة في النسيج البيولوجي. هذه المسابر التي تستخدم مادة قاعدية من الكوارتز تبدي أزمنة استجابة أقل من ميلي ثانية مع خصائص حرارية مشابهة للنسج. القوة المحركة الكهربائية الكهروحرارية التي قدرها ٢١ ميكروفولت لكل درجة مئوية تعتمد خطياً على درجة الحرارة على مدى المجال الذي يواجَه عادة في القياسات الحيوية.

وقد صُنّعت رؤوس مسابر بأقطار ١٠ و ٣٠ ميكرومتر. هذه الحجوم الصغيرة تجعل من الممكن قياس مناسيب (بروفايلات) درجة حرارة شبكية العين. وقد غُرزت هذه المسابر تجريبياً عبر صُلبة العين sclera وأُبقيت على

تماس مع النسيج الحيوي لفترات من ٤ إلى ٦ ساعات. إن خطيتها وقوتها المحركة الكهربائية الحرارية وزمن استجابتها تجعل من الممكن تسجيل الاستجابة لتشعيع ليزري من أجل ارتفاعات في درجة الحرارة من ١ إلى ٤٥ درجة مئوية ومن ١ ميلي ثانية إلى ١٠ ثانية (Cain and Welch, 1974b).

(٣,٦,٢) مقياس الحرارة ذو المقاومة الكهربائية Electrical Resistance Thermometer

إن اعتماد مقاومة معادن معينة على درجة الحرارة يجعلها مناسبة لبناء مجسات درجة حرارة. وعلى الرغم من أنه يمكن استخدام غالبية المعادن، إلا أن الاختيار مع ذلك يعتمد على الخطية والحساسية للعلاقة بين المقاومة ودرجة الحرارة. وتعطى مقاومة R_t معدن ناقل عند أي درجة حرارة t بالمعادلة التالية:

$$R_t = R_o (1+ \alpha t)$$

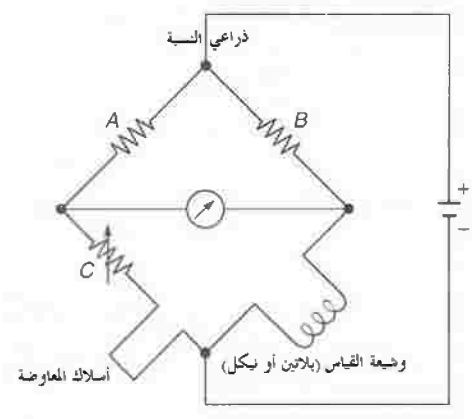
حيث R_o هي المقاومة عند درجة حرارة صفر مئوية و α معامل درجة الحرارة للمقاومة النوعية. فإذا كانت R_o و α معروفتين فإن قياس R_t يجب أن يعطي مباشرة قيمة درجة الحرارة. إن التزايد في المقاومة على مدى المجال ٠-١٠٠ درجة مئوية خطي للمواد شائعة الاستعمال في قياس الحرارة بالمقاومة.

وعادة يُستخدم البلاتين أو النيكل في قياس الحرارة بالمقاومة لأنهما يمكن الحصول عليهما في شكل نقي وهما مستقران بالمقارنة. لقد استخدمت مقاييس حرارة مبنية من ملف (وشيعة) من هذين المعدنين لقياس درجة حرارة الجلد والمريء والشرج. يبلغ معامل درجة الحرارة للمقاومة النوعية للبلاتين ٠,٠٠٤ أوم لكل أوم درجة مئوية. وعموماً يجري قياس المقاومة باستخدام جسر ويتستون Wheatstone الذي يجب أن تكون فيه جميع الأسلاك من الكونستانتان للإبقاء على تغيرات درجة حرارتها ذاتها في الحد الأدنى. ويجب أن تكون مقاومات المقارنة أيضاً مستقرة. ويمكن تشغيل الجسر إما بتيار مستمر أو بتيار متناوب، إلا أنه ومن أجل إهمال أية تغيرات كهروكيميائية أو استقطاب في الدارة فإنه يُنصح باستخدام جسر تيار متناوب.

يوضح الشكل رقم (٣,١٠) دارة جسرية بسيطة مستخدمة في قياس الحرارة بالمقاومة. A و B مقاومتان ثابتتان، أما C فمقاومة متغيرة مصنوعة من الكونستانتان الذي يتمتع بمعامل درجة حرارة للمقاومة النوعية منخفض جداً. الوشيعة القائسة وأسلاك توصيلاتها موجودة في ذراع من الدارة الجسرية مع زوج كاذب dummy من الأسلاك موصلة في الذراع المقابلة. وبهذه الطريقة فإن التغيرات في مقاومة الأسلاك الموصلة للوشيعة مع درجة الحرارة الخارجية تُحذف بواسطة التغيرات المقابلة في الأسلاك الكاذبة أو المعاوضة.

إن دارة ويتستون الجسرية البسيطة أداة غير خطية أصلاً إذا ما شُغّلت بعيداً عن نقطة توازنها الصفري. ولذلك فإن من المهم فهم درجة عدم الخطية الواجب مواجهتها. إن الحساسات البلاتينية المقاومة خطية ضمن ±

١٠٪ بين (-٢٠٠) و (+٦٠٠) درجة مئوية. وللتوصل إلى خطية أفضل يصف Foster (1974) دارة تستفيد من مضخم غير خطي. تُضاف تغذية راجعة موجبة حول مضخم الدخل جاعلة ربحه الفعال يتزايد بتزايد مقاومة الحساس مع درجة الحرارة. إن الخطية التي تم التوصل إليها دقيقة نموذجياً ضمن ± ٠,٥ درجة مئوية في الحالة الأسوأ على مدى المجال المحدد. إن ما يميز الطريقة التماثلية للخطية هو أنه ليس هناك انقطاعات في إظهار درجة الحرارة عندما تتغير. وإنها مشكلة أحياناً عندما تُستخدم شبكات معاوضة بطريقة القطعة أو ذاكرات قراءة فقط ROM من أجل الخطية.



الشكل رقم (٣,١٠). ترتيبة دارة لمقياس حرارة بمقاومة معدنية.

إن مقاييس الحرارة ذات المقاومة ملائمة بشكل خاص من أجل القراءة عن بعد ويمكن تصنيعها من مواد خاملة كالبلاتين، وهي مستقرة جداً ولا تبدي أي بطاء تقريباً مع امتدادات كبيرة لدرجة الحرارة. إلا أن حجم الوشائع المستخدمة في الوقت الحاضر هو بحيث أن مسابر قياس الحرارة بالمقاومة في المجال الطبي أفضل ما تكون ملائمة للاستخدام كمسبر شرجي فقط.

(٣,٦,٣) الثرمستورات Thermistors

الثرمستورات عبارة عن أكسيدات معادن معينة مثل المنغنيز والكوبالت والنيكل والتي لها معامل درجة حرارة للمقاومة النوعية سلبي، بمعنى أن الثرمستور يبدي هبوطاً في المقاومة بتزايد درجة الحرارة. وتعطى العلاقة بين مقاومة ثرمستور ودرجة الحرارة بالمعادلى التالية:

$$R = A \cdot e^{(B/T)}$$

حيث R هي مقاومة الثرمستور بالأوم و T درجة الحرارة المطلقة و A و B ثابتان.

تتمتع الثرمستورات عندما تُستخدم لقياس درجة الحرارة بميزات كثيرة في مقابل المزدوجات الحرارية ومقاييس الحرارة ذات المقاومة. ويمكن تلخيص هذه الميزات في ما يلي :

- تبدي حساسية عالية بشكل معتبر (حوالي ٤٪ تغير في المقاومة لكل درجة مئوية).
- بما أن الثرمستورات بحد ذاتها ذات مقاومة عالية فإن مقاومات أسلاك التوصيل ذات تأثير صغير وبالتالي ليس هناك ضرورة لأسلاك المعاوضة.
- يمكن جعل الثابت الزمني صغيراً تماماً بتخفيض كتلة الثرمستور بسهولة. ولذلك يمكن إجراء القياسات بسرعة أكبر.
- يمكن الحصول عليها بأشكال مختلفة مما يجعاها مناسبة لجميع أنواع التطبيقات.
- صغيرة في حجمها فهي بحجم رأس دبوس تقريباً ولذلك يمكن تثبيتها على قثطار أو إبر تحت جلدية.
- بما أنها متاحة في مجال واسع فيما يتعلق بقيم المقاومة فإن ذلك يجعل ملاءمتها في الدارات أسهل.

إن التغير الكبير في المقاومة مع درجة الحرارة يعني أن دارة جسرية بسيطة بالمقارنة تكفي. إن العلاقة غير الخطية بين المقاومة ودرجة الحرارة متأصلة في الثرمستورات ، إلا أنه يمكن بالانتقاء المناسب لقيم مقاومة الجسر (الجسر بحد ذاته ترتيبة غير خطية) الحصول على معايرة خطية تقريباً للأداة المؤشرة على مدى مجال محدود.

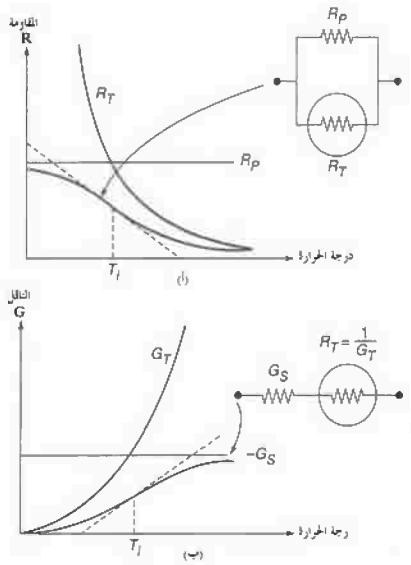
هناك تراجع في استخدم الثرمستورات عند تصنيع مؤشرات درجة حرارة متعددة القنوات ، وهذا عائد إلى حقيقة أن من غير الممكن تصنيع دُفعة منها بنفس الخصائص. التسامح العادي للمقاومة ±٢٪ ولكن النزول إلى ±١٪ متاح بتكاليف أعلى. وهكذا فإن إعادة معايرة الأداة مطلوبة كلما توجب استبدال مسبار معين.

تُستخدم مقاربتان لجعل الثرمستورات خطية على مدى مجال درجة حرارة محدد (Sapoff, 1982). ويوضح الشكل رقم (٣,١١) بقسميه هاتين التقنيتين وهما :

١- إذا كان الثرمستور مغذى بتيار ثابت ويُستخدم الجهد عبر الثرمستور ليشير إلى درجة الحرارة فيمكن التوصل إلى الخطية بوصل مقاومة منتقاة R_p على التفرع مع الثرمستور. إن الهدف من ذلك هو جعل نقطة الانعطاف (أو الانقلاب ، وهي النقطة التي يعكس فيها منحنٍ إشارة مشتقه الثاني) للمجموعة المتوازية تتطابق مع منتصف تدريج درجة الحرارة (القسم (أ) من الشكل رقم ٣,١١).

٢- تُستخدم الترتيبة التسلسلية إذا استخدم التيار المار عبر الثرمستور مع فرق جهد مطبق ثابت ليشير إلى درجة الحرارة (القسم (ب) من الشكل رقم ٣,١١).

يبلغ أقصى انحراف عن الخطية باستخدام هذه التقنية ٠,٠٣ درجة مئوية لكل ١٠ درجات مئوية. إلا أنه ربما تجدر الملاحظة بأنه ينشأ عن الخطية المحسنة التي يتم الحصول عليها تناقص في معامل درجة الحرارة الفعال للترتيبة. فمثلا معامل درجة الحرارة لثرمستور هي ٣,٣٪ درجة مئوية عندما يُجعل خطياً على أفضل وجه بمقاومة تسلسلية. ويحتاج الأمر إلى ترتيبات دارة أكثر تعقيداً للتوصل إلى خطية أفضل على مدى مجال أوسع لدرجة الحرارة.



الشكل رقم (٣,١١). مقاربتان لجعل الثرمستور خطياً ـال قصير وخصائصهما: (أ) ترتيبة لثرمستور ومقاومة على الت ـ وازي. (ب) ترتيبـ ـة لثرمستور ومقاومة على التسلسل.

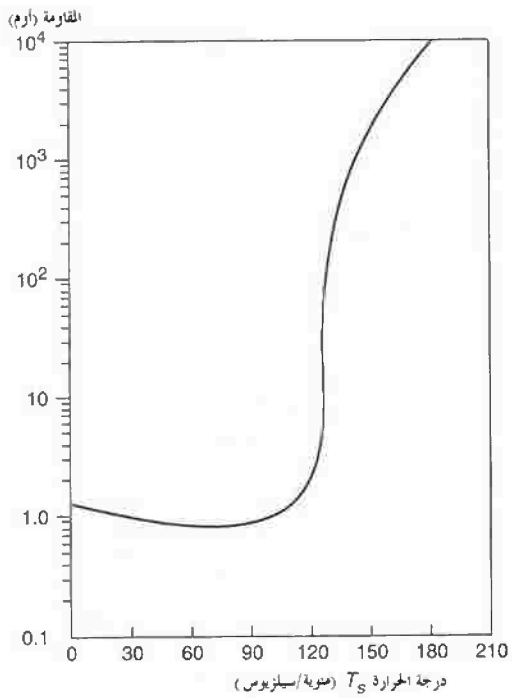
لقد قدم Cronwell (1965) مراجعة للتقنيات المستخدمة لجعل الثرمستورات خطية، وأُعطيت الثرمستورات التي تقدم تغيراً خطياً في المقاومة بتغير درجة الحرارة اسم "لينيستورات Linistors".

تؤمن دارة مضخم عملياتي مصممة من قبل Stockert and Nave (1974) علاقة خطية بين جهد الخرج ودرجة الحرارة من (١٠) إلى (٥٠) درجة مئوية باستخدام ثرمستور غير خطي كمجس درجة حرارة. وقد ناقشت الورقة الطريقة لحساب قيم الدارة. واقترح Allen (1978) استخدام معالج صغري كـ "طاولة بحث" عن قيم المقاومة- درجة الحرارة لثرمستور باستخدام الاستقراء (الاستكمال) البيني interpolation بين القيم لتحديد درجة الحرارة.

تُصنع الثرمستورات بتنويعة واسعة لأشكال ملائمة للاستخدام في التطبيقات الطبية. فهي متاحة كرقائق للتطبيق على سطح الجلد وكقضبان يمكن استخدامها للإدخال الشرجي أو الفموي والإدخالات المشابهة وككريات دقيقة هي من الصغر بحيث يمكن تركيبها على رأس إبرة تحت جلدية للإدخال داخل الأنسجة. تتمتع هذه الثرمستورات الدقيقة بثوابت زمنية حرارية صغيرة عندما تكون مركبة بشكل صحيح. إن الثابت الزمني هو المقياس المعياري لزمن الاستجابة للمسبار الثرمستوري، وهو الزمن اللازم للمسبار ليصل إلى ٦٣٪ من درجة حرارة مطبقة حديثاً. وعموماً يتم الحصول على الثوابت الزمنية بنقل المسبار من حمام مائي جيد التحريك عند درجة (٢٠) مئوية إلى حمام مشابه عند (٤٣) درجة مئوية. وبشكل تقريبي يلزم مقدار خمسة ثوابت زمنية لمسبار ليصل إلى ٩٩٪ من التغير الكلي.

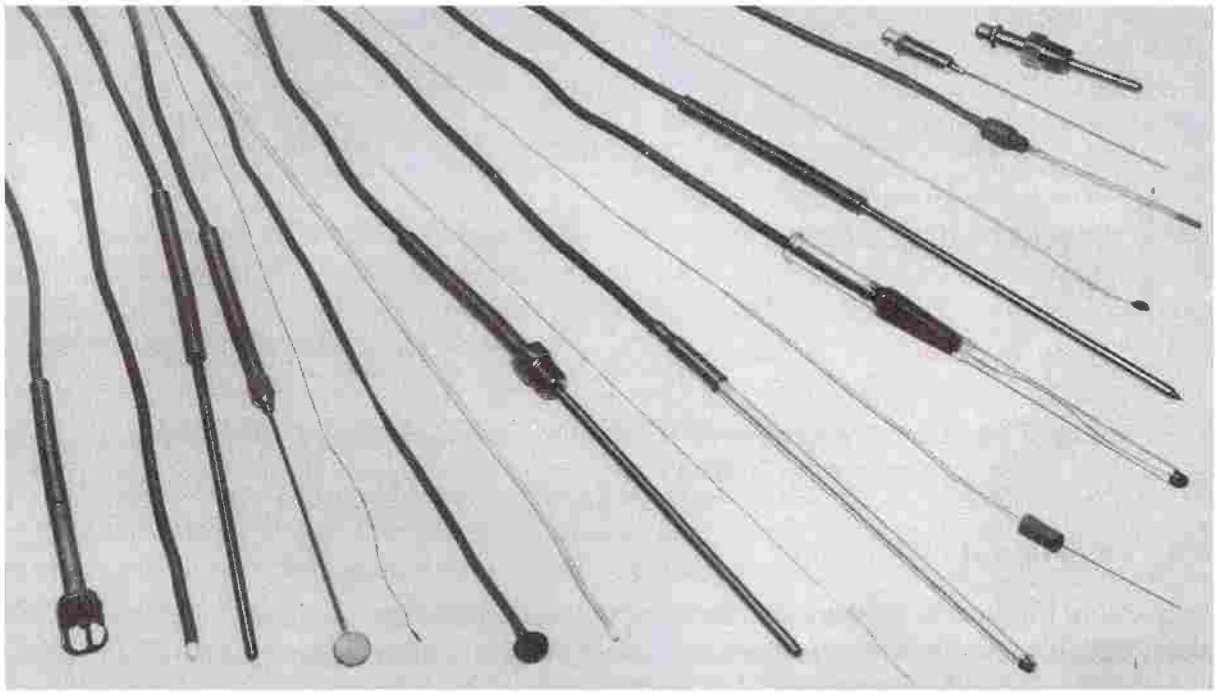
تسمى الثرمستورات المتمتعة بمعامل حراري موجب للمقاومة بالـ "بوزيستورات" (PTC) وهي تبدي تغيراً كبيراً بشكل واضح في المقاومة بتزايد درجة الحرارة. وتصنع البوزيستورات من سيراميك تيتانات الباريوم.

تتميز البوزيستورات كما قلنا بتغير كبير جداً في المقاومة من اجل تغير صغير في درجة الحرارة. ويوضح الشكل رقم (٣,١٢) شكلاً عاماً لمنحني تغير المقاومة مع درجة الحرارة لبوزيستور (Krelner, 1977). ويشار إلى درجة الحرارة التي تبدأ عندها المقاومة بالتزايد بسرعة بأنها درجة حرارة التبديل، ويمكن تغيير هذه النقطة من ما قبل الصفر إلى ما بعد (١٢٠) درجة مئوية. وهكذا فإن للبوزيستورات مقاومة ثابتة تقريباً عند درجات حرارة تحت درجة حرارة التبديل، لكنها تظهر تزايداً سريعاً في المقاومة عند درجات حرارة فوق هذه الدرجة.



الشكل رقم (٣,١٢). التبدل المفاجئ للبوزيستور عندما يسخن إلى درجة حرارة التبديل حيث تتغير المقاومة بأربع مراتب عشرية (بموافقة .ة (Keystone Carbon Co.

تتألف المسابر الثرمستورية لقياس درجة حرارة الجسم من كريات (خرزات) ثرمستورية مختوم عليها في رأس أنبوب زجاجي. تحمى الخرزة بهذا البيت الزجاجي كما أنه يحافَظ على الاستجابة السريعة أيضاً. إن المسابر المناسبة للتطبيقات الشرجية والمريئية تحتوي عادة على خرزة ثرمستور مركبة داخل غمد من الفولاذ الذي لا يصدأ. ويوضح الشكل رقم (٣,١٣) تنويعات من المسابر مناسبة لتطبيقات مختلفة في المجال الطبي.



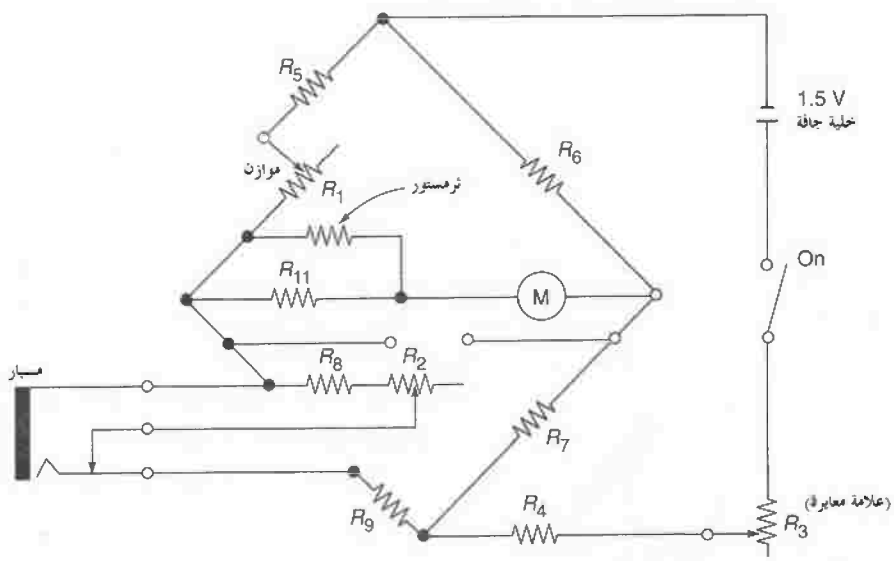
الشكل رقم (٣,١٣). أشكال مختلفة من المسابر الثرمستورية (بموافقة Yellow Spring Instr. Co.).

ينبغي تعقيم المسابر باستخدام محلول كيميائي مثل كحول ٧٠٪ أو محلول داكين Dakin (هيبو كلورايت الصوديوم في دارئ حيادي). مواد التنظيف زيفيران Zephiran و هيموسول Haemo-sol مناسبة أيضاً. لا ينبغي غلي المسابر أو تعقيمها بالبخار إلا حيثما يذكر ذلك على وجه التخصيص.

تُعرف الأدوات التي تعطي قراءة مباشرة لدرجة الحرارة عند موضع الثرمستور بمقاييس الحرارة عن بعد بسبب مقدرتها على استخدام أسلاك بعيدة مئات الأقدام من دون انخفاض واضح في الدقة. الإشارة المستمرة مناسبة أيضاً للتسجيل من دون تضخيم.

ويوضح الشكل رقم (٣,١٤) مخطط دارة نموذجية لقياس الحرارة عن بعد. تعمل الأداة بخلية جافة ١,٥ فولت لها عمر تشغيل قدره ألف ساعة. إن إضافة ثرمستور ثانٍ في الذراع المقابل من الجسر يمكن أن يضاعف حساسية الدارة وأن يسمح باستخدام مقياس ذي حساسية أدنى.

غالباً ما يكون من الضروري من أجل تطبيقات خاصة مثل الدراسات الحمية أن يكون لدينا نظام متعدد القنوات ينبغي له أن يمسح ٣ أو ٧ أو ١١ مسباراً على التتابع مع ٢٠ ثانية أو ١ دقيقة أو ٥ دقيقة قراءة لكل مسبار وأن يسجل القراءات المقيسة على المسجل. يمكن استخدام مبدل دوار بمحرك من أجل ذلك. خرج المسجل في هذه الأدوات هو من صفر إلى ١٠٠ ميلي فولت مع خرج صفري عند درجة الحرارة الأكثر علواً.



الشكل رقم (٣,١٤). مخطط دارة لقياس الحرارة عن بعد (بموافقة Yellow Spring Instr. Co.)

(٣,٦,٤) قياس الحرارة الإشعاعي Radiation Thermometry

إن أي مادة موضوعة فوق درجة حرارة الصفر المطلق تبعث إشعاعاً كهرومغناطيسياً من سطحها. ويعتمد مطال وتردد الإشعاع المنبعث على درجة حرارة الجسم. كلما كان الجسم أبرد كان تردد الموجات الكهرومغناطيسية أخفض وكانت الطاقة المنبعثة أقل. يمكن تحديد درجة حرارة الجسم من الطاقة المنبعثة. تقيس مقاييس الحرارة تحت الحمراء (Ring, 1988) مطال الطاقة تحت الحمراء (تدفق) في مجال طيفي واسع وبشكل خاص من ٤ إلى ١٤ ميكرومتر.

ليس هناك أي تماس للمقاييس مع الجسم المقيس. الكاشفات المستخدمة لقياس الإشعاع تحت الأحمر عبارة عن أعمدة حرارية (أزواج مزدوجات حرارية مربوطة تسلسلياً) وحساسات كهروحرارية pyroelectric وخلايا غولاي Golay وخلايا توصيل ضوئي وخلايا فوتوفولتائية (فولتاضوئية) photovoltaic.

يمكن تركيب جميع هذه الأجهزة في بيوت مصممة خصيصاً لذلك من أجل قياس درجة الحرارة السطحية من دون تماس مباشر مع الجسم. ويلخص الجدول رقم (٣,٦) مواصفات بارزة لأنواع مختلفة من أجهزة قياس درجة الحرارة.

هناك ماسحات تحت حمراء تمسك باليد متاحة حالياً لمراقبة نمط تغيرات درجة الحرارة خصوصاً من أجل قياسات درجة حرارة غشاء الطبل. هذا القياس مبني على تطوير نوع جديد من الحساسات يدعى "الحساس الكهروحراري" أو الكهرو- التهابي pyroelectric.

الجدول رقم (٣,٦). مقارنة التقنيات الكهربائية لاستشعار درجة الحرارة.

	ذو المقاومة RTD	ثرمستور	مزدوجة حرارية	إشعاعي
الدقة	(٠,٠١-٠,١) درجة فهرنهايت	(٠,٠١-١) درجة فهرنهايت	(١-١٠) درجة فهرنهايت	٠,٢ درجة فهرنهايت
الاستقرار	أقل من ٠,١٪ انزياح في خمس سنوات	(٠,٢) درجة فهرنهايت انزياح في السنة	(١) درجة فهرنهايت انزياح في السنة	مثل المزدوجة الحرارية
الحساسية	(٠,١-١٠) أوم لكل درجة فهرنهايت	(٥٠-٥٠٠) أوم لكل درجة فهرنهايت	(٥٠-٥٠٠) ميكرو فولت لكل درجة فهرنهايت	مثل المزدوجة الحرارية
الملامح	الأكثر دقة على مدى مجال واسع والأكثر استقراراً	الحساسية الأكبر	الأكثر اقتصادية والأكبرمجالاً	الأسرع استجابة والأسهل للاستعمال، لا تلوثات

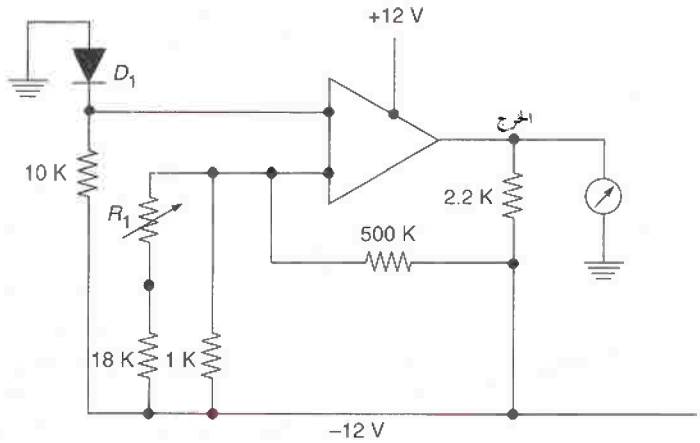
يطور الحساس الكهروحراري شحنة كهربائية هي تابع لتدرج gradient درجة حرارته. يحتوي الحساس على رقاقة كريستالية معالجة مسبقاً لتوجيه كريستالاتها المستقطبة. إن تغير درجة الحرارة من ضوء تحت أحمر يضرب الكريستال يغير توجه الكريستال ويؤدي إلى نشوء شحنة كهربائية. تحدث الشحنة تياراً يمكن قياسه بدقة وربطه بعلاقة بدرجة حرارة غشاء الطبل.

تتمتع مقاييس الحرارة تحت الحمراء بميزات واضحة مقابل مقياسي الحرارة الزجاجي والثرمستوري المستخدمين فموياً أو شرجياً أو إبطياً. وهي تلغي الاعتماد على النقل وتقيس بدلاً من ذلك إشعاع الجسم الطبيعي. وهي تستخدم موقع قياس مثالياً وهو غشاء الطبل في الأذن التابع لدرجة حرارة قلب الجسم. غشاء الطبل موقع جاف غير مخاطي يخفف إلى الحد الأدنى مخاطر التلوث التصالبي. أما سيئة مقاييس الحرارة تحت الحمراء فهي ارتفاع كلفتها مقارنة مع أنواع أخرى من مقاييس الحرارة.

(٣,٦,٥) الديود السيليكوني Silicon Diode

من المعروف أن هبوط الجهد عبر ديود سيليكوني منحاز أمامياً يتغير بمعدل ٢ ميلي فولت لكل درجة مئوية. هذا يوحي بأنه يمكن استخدام الديود السيليكوني كحساس درجة حرارة. وصف Griffths and Hill (1969) التقنية ومخطط الدارة لقياس درجة الحرارة باستخدام ديود سيليكوني.

إن الدارة في الشكل رقم (٣,١٥) مصممة لمراقبة درجة حرارة الجسم في المجال ٣٤-٤٠ درجة مئوية بدقة ٢,٥٪. الديود الحساس لدرجة الحرارة D_1 مربوط إلى الدخل غير العاكس لمضخم عملياتي. يبلغ ربح المضخم ٥٠٠. ومع كون D_1 موضوعاً في حمام مائي عند درجة حرارة ٣٧ مئوية فإن R_1 مضبوطة لتعطي جهد خرج مضخم مساوٍ للصفر. وباستخدام مقياس صفر مركزي فإن سلم التدريجات يمكن أن يعايَر إلى (±٣) درجة مئوية.



الشكل رقم (٣,١٥). استخدام ديود سيليكوني كحساس درجة حرارة (معاد رسمه حسب Griffths and Hill(1969))

إن السيئة في استخدام ديود كحساس درجة حرارة هو ضرورة وجود مصدر معايرة مستقر. وقد شرح Soderquist and Simmons (1979) استخدام زوج ترانزستوري ملاءم يتمتع بعلاقة جهد قاعدة- باعث تفاضلي قابلة للتنبؤ بها ويمكن استغلالها كحساس درجة حرارة. إن من المفيد أن يكون الحساس الديودي أو الترانزستوري مصنعاً على رقاقة مع إلكترونيات سطح اتصال بتكنولوجيا الدارة التكاملية. لقد طُوِّر العديد من حساسات درجة حرارة تكاملية وبعضها متاح تجارياً.

إن AD599 عبارة عن مجس درجة حرارة بدارة تكاملية مصنع من قبل شركة Analog Devices. ينتج المجس خرجاً متناسباً طرداً مع درجة الحرارة المطلقة. ومن أجل جهود تغذية بين (+٤) و(+٣٠) فولت فإنها تعمل كمنظمات تيار ثابت عالي الممانعة تمرر ١ ميكرو أمبير لكل درجة كلفن. ويستخدم المجس الخاصة الأساسية للترانزستور السيليكوني المصنوع هو منه لتحقيق خصائصه للتناسب الطردي مع درجة الحرارة.

(٣,٦,٦) قياس الحرارة الكيميائي Chemical Thermometry

إن الكريستالات السائلة الشائعة الاستعمال في شاشات الإظهار الرقمية مكوّنة من مواد لها خواص ميكانيكية مشابهة للسوائل ولكنها تملك الخواص البصرية للكريستالات الوحيدة. تبدي هذه الكريستالات تغيرات جديرة بالملاحظة في خواصها البصرية عندما يتم تغيير درجة الحرارة.

يُستخدم التغير في لون الكريستال ذي العلاقة بدرجة الحرارة لقياس درجة الحرارة السطحية. يمكن تثبيت غشاء من الكريستال السائل محاط (مُكَبسَل) ببيت بلاستيكي إلى سطح الجسم. بعض الأنظمة تستخدم صفائح مرنة من الكريستال بحيث يمكن الحصول على تماس أفضل مع سطح الجسم. تُستعمل هذه المقاييس لمرة واحدة وهناك احتمال أقل للتلوث التصالبي.

لم ينل الاستعمال السريري لقياس درجة الحرارة بالكريستال السائل شعبية بسبب دقة التمييز الحراري المنخفضة ± ٠,٥ ٪ وزمن الاستجابة البطيء (أطول من ٦٠ ثانية). يضاف إلى ذلك أن قياس الحرارة بالتلامس قد يغير درجة حرارة الجلد المقيس بسبب الضغط المفرط على سطح الجلد.

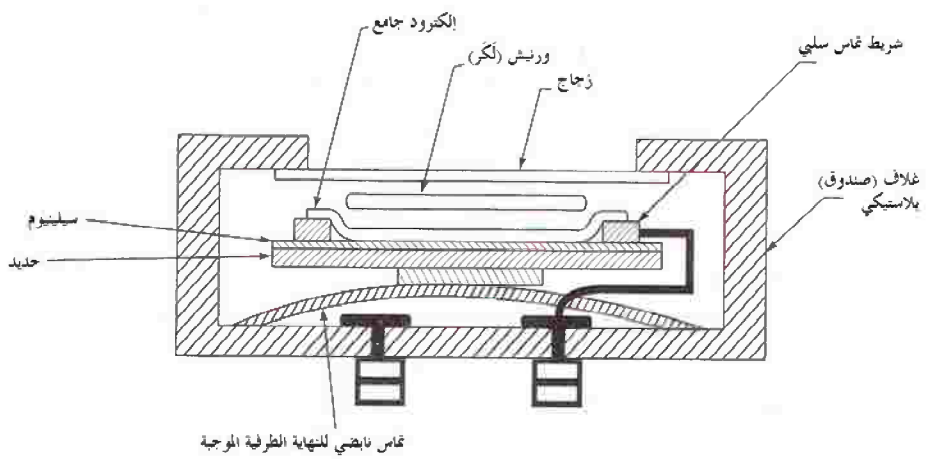
(٣,٧) المبدلات (ا سات) الكهروضوئية
Photoelectric Transducers

المجسات الكهروضوئية مبنية على مبدأ تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. ويتم ذلك بجعل الإشعاع يسقط على عنصر حساس للضوء وقياس التيار الكهربائي المتولد بهذه الطريقة بواسطة مقياس غلفاني حساس إما مباشرة أو بعد تضخيم مناسب. هناك نوعان من الخلايا الكهروضوئية: الخلايا الفوتوفولتائية (الفولتاضوئية) والخلايا الباعثة للضوء.

(٣,٧,١) الخلايا الفولتاضوئية أو ذات الطبقة الحاجزة Photovoltaic or Barrier Layer Cells

تتكون هذه الخلايا عادة من مادة نصف ناقلة هي عموماً سيلينيوم مرسَّب على قاعدة معدنية قد تكون حديدية وتقوم مقام أحد الإلكترودات. تغطى المادة نصف الناقلة بطبقة رقيقة من الفضة أو الذهب المرسَّب بالترسيب المهبطي في الفراغ، وتعمل هذه الطبقة كإلكترود جامع. ويوضح الشكل رقم (٣,١٦) بنية الخلية ذات الطبقة الحاجزة. وعندما تسقط طاقة مشعة على السطح نصف الناقل فإنها تهيج (تستثير) الإلكترونات في سطح التماس بين الفضة والسيلينيوم. وبهذا يتم إطلاق الإلكترونات وتجميعها عند الإلكترود الجامع.

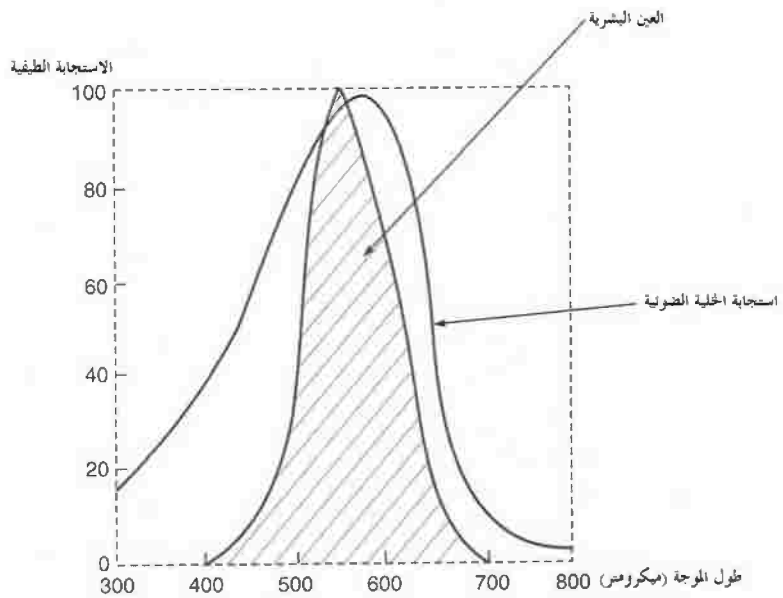
تكون الخلية مغلفة ببيت من مادة عازلة ومغطاة بصفيحة من الزجاج. الإلكترودان موصلان إلى نهايتين طرفيتين توصلان الخلية بأجزاء أخرى من الدارة الكهربائية.



الشكل رقم (٣,١٦). بنية خلية ذات طبقة حاجزة.

إن الخلايا الفولتاضوئية متينة جداً في بنيتها ولا تحتاج إلى تغذية كهربائية خارجية، كما أنها تنتج تياراً ضوئياً أقوى أحياناً من العناصر الحساسة للضوء. إن التيارات الضوئية النموذجية التي تنتجها هذه الخلايا تبلغ ١٢٠ ميكروأمبير لكل لومن. وعند درجة حرارة ثابتة فإن التيارات الضوئية التي تنشأ في الخلية تبدي علاقة خطية عادة مع شدة الضوء الساقط. تتمتع خلايا السيلينيوم الضوئية بمقاومة داخلية منخفضة جداً، ولذلك فإن من الصعب تضخيم التيار الذي تنتجه هذه الخلايا بواسطة مضخمات تيار مستمر. تقاس التيارات مباشرة عادة بوصل النهايات الطرفية للخلية إلى مقياس غلفاني (غلفانومتر) شديد الحساسية.

إن خلايا السيلينيوم حساسة لكامل مجال أطوال موجات الطيف تقريباً، إلا أن حساسيتها أكبر ضمن الطيف المرئي وأعلى ما تكون في المناطق بالقرب من أطوال موجة الضوء الأصفر. ويوضح الشكل رقم (٢,١٧) الاستجابة الطيفية لخلية السيلينيوم الضوئية وللعين الإنسانية.



الشكل رقم (٣,١٧). الاستجابة الطيفية لعين إنسانية ولخلية سيلينيوم ضوئية.

تتمتع خلايا السيلينيوم بمعامل درجة حرارة مرتفع ولذلك فإن من الضروري السماح للأداة بالتسخين قبل البدء بالقراءات، كما أن هذه الخلايا تبدي آثار إرهاق. وعند تسليط الضوء على خلية فإن التيار الضوئي يرتفع إلى قيمة فوق قيمة التوازن بعدة نقاط مئوية لتهبط بعدها تدريجياً. وينبغي توخي الحذر عند ربط أشعة الضوء إلى الممر البصري وذلك لحجب جميع الضوء الخارجي وللتأكد من أن الضوء من المصدر هو فقط الذي يصل إلى الخلية.

لا تناسب خلايا السيلينيوم عمليات في أدوات حيث تتغير مستويات الإضاءة بسرعة ؛ لأن هذه الخلايا تفشل في الاستجابة بشكل آني لهذه التغيرات. ولذلك فإن هذه الخلايا غير مناسبة حيث تُستعمل مقطعات ميكانيكية لتقطيع الضوء (١٥-٦٠) مرة في الثانية.

(٣,٧,٢) الخلايا الباعثة للضوء Photoemissive Cells

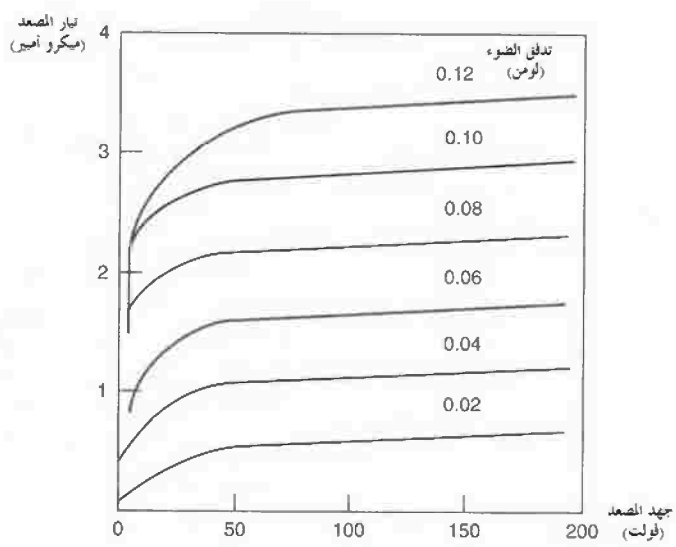
وهي ثلاثة أنواع: الخلايا الضوئية ذات الفراغ العالي وتلك المملوءة بغاز وأنابيب المضاعف الضوئي. تختلف جميع هذه الأنواع عن خلايا السيلينيوم في أنها تتطلب تغذية خارجية بالطاقة لتأمين فرق كافٍ في الكمون بين الإلكترودات لتسهيل سريان الإلكترونات المولَّدة عند سطح المهبط الحساس للضوء، كما أنه تُستخدم دارات تضخيم أيضاً لتضخيم هذا التيار.

الخلايا الباعثة للضوء ذات الفراغ العالي: تتألف الخلية الضوئية ذات الفراغ من إلكترودين (أو قطبين): المهبط (وهو عبارة عن طبقة حساسة للضوء من السيزيوم المعدني المرسَّب على قاعدة من أكسيد الفضة)، والمصعد (الذي هو عبارة عن إما سلك ممركز محورياً أو سلك مستطيل يحيط بالمهبط). إن بنية المصعد هي بحيث لا يسقط أي ظل على المهبط. الإلكترودان مختومان ضمن غلاف زجاجي مفرَّغ.

عندما تسقط حزمة ضوء على سطح المهبط تتحرر منه إلكترونات يتم سحبها باتجاه المصعد الذي يُحافَظ على كمون موجب له. وهذا يؤدي إلى تيار ضوئي يمكن قياسه في الدارة الخارجية. تعتمد الاستجابة الطيفية لأنبوب باعث للضوء على طبيعة المادة المغلفة للمهبط ويمكن تغييرها باستخدام معادن مختلفة أو بتغيير طريقة تحضير سطح المهبط. إن خلايا السيزيوم- أكسيد الفضة حساسة لأطوال الموجات تحت الحمراء الدنيا.

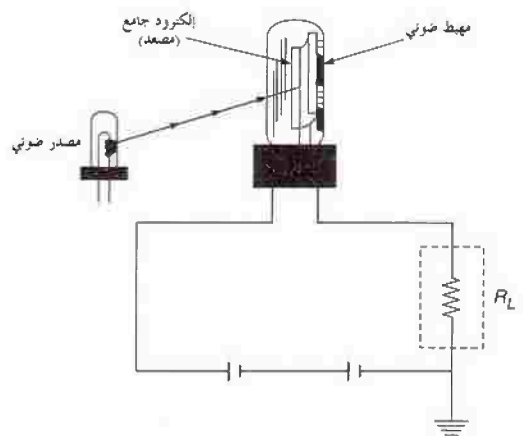
وبشكل مشابه فإن خلايا البوتاسيوم- أكسيد الفضة وخلايا السيزيوم- الأنتيمون تتمتع بحساسية قصوى في مناطق الضوء المرئي وفوق البنفسجي. وتعتمد الاستجابة الطيفية أيضاً جزئياً على شفافية الوسط الذي يجب أن يجتازه الضوء الواصل إلى المهبط بالنسبة لأطوال الموجات المختلفة. فمثلاً حساسية الخلية في المنطقة فوق البنفسجية محدودة بشفافية جدار الغلاف. ومن أجل هذه المنطقة فإن استخدام مادة الكوارتز يمكن تجنبه باستخدام مادة فلورسنتية مثل ساليسيلات الصوديوم التي إذا طُبقت على خارج الخلية الضوئية فإنها تحول الإشعاعات فوق البنفسجية إلى مرئية.

يوضح الشكل رقم (٣,١٨) خواص العلاقة بين التيار والجهد لأنبوب باعث للضوء ذي فراغ عند مستويات مختلفة لتدفق الضوء. وترينا هذه المنحنيات أنه بتزايد الجهد فإنه يتم الوصول إلى نقطة حيث يتم سحب جميع الإلكترونات الضوئية إلى المصعد حال تحررها مما ينشأ عنه تيار إشباع ضوئي. إن من غير المرغوب فيه أن تُطبق جهود مرتفعة جداً لأنه ينتج عنها تيار معتم زائد من دون أي ربح في الاستجابة.



الشكل رقم (٣,١٨). خواص العلاقة بين التيار والجهد لأنبوب باعث للضوء ذي فراغ عند مستويات تدفق ضوء مختلفة.

يوضح الشكل رقم (٣,١٩) ترتيبة دارة نموذجية تُستخدم عادة مع أنابيب باعثة للضوء. وتُستخدم قيم كبيرة لمقاومة حمل الأنبوب الضوئي من أجل زيادة الحساسية إلى الحد العملي. وقد استُخدمت مقاومات حمل تبلغ عشرة آلاف ميغا أوم. إلا أن هذا يضع حداً تقريباً، حيث إن مواصلة زيادة الحساسية يحرض مشاكل على شكل ضجيج وعدم خطية واستجابة بطيئة. وإنه لأمر أساسي جداً عند هذه القيم المرتفعة لمقاومات الحمل أن يتم حجب الدارة عن الرطوبة والآثار الكهروستاتيكية. ولذلك فإنه يتم استخدام نوع خاص من أنابيب القياس الكهربائي محجبة بعناية ومع دخل بغطاء شبكي في المرحلة الأولى للمضخم.

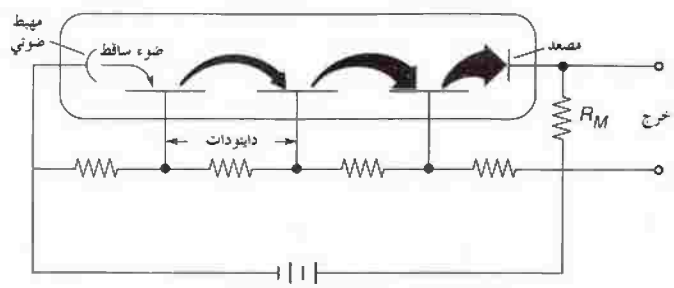


الشكل رقم (٣,١٩). ترتيبة دارة نموذجية تستخدم مع أنابيب باعثة للضوء.

خلايا باعثة للضوء مملوءة بغاز: يحتوي هذا النوع من الخلايا على كميات صغيرة من غاز خامل مثل الأرغون الذي يمكن تأيين جزيئاته عندما تمتلك الإلكترونات الموجودة في الخلية طاقة كافية. إن وجود كميات صغيرة من هذا الغاز تمنع ظاهرة تيار الإشباع عند تطبيق فروق كمون مرتفعة بين المهبط والمصعد. وبسبب التصادم المتكرر للإلكترونات في الأنابيب المملوءة بالغاز فإن التيار الكهروضوئي الناتج أكبر حتى عند كمونات منخفضة.

أنابيب المضاعف الضوئي: تُستخدم أنابيب المضاعف الضوئي ككاشفات عندما يكون مطلوباً كشف شدات ضوء منخفضة جداً. هذا الأنبوب مكون من مهبط حساس للضوء له مراحل تتابعية متعددة من التضخيم الإلكتروني من أجل الحصول على تضخيم كبير للتيار الضوئي الأولي وذلك ضمن غلاف الأنبوب الضوئي نفسه. تُجذب الإلكترونات المتولدة عند المهبط الضوئي بواسطة الإلكترود الأول (ويدعى الدينود Dynode) الذي يعطي إلكترونات ثانوية. ويمكن أن يكون هناك ٩-١٦ دينود (الشكل رقم ٣,٢٠).

يتكون الدينود من صفيحة من مادة مغطاة بمادة لها قوة جذب صغيرة للإلكترونات الهاربة. كل إلكترون مرتطم يطرد إلكتروناً ثانوياً من الدينود. تُسرَّع هذه الإلكترونات تحت تأثير الكمون الموجب إلى الدينود الثاني وهكذا. تتكرر هذه العملية في الدينودات التالية المُشغلة عند جهود تتزايد في خطوات من ٥٠-١٠٠ فولت. أخيراً تُجمع هذه الإلكترونات عند الإلكترود الجامع.



الشكل رقم (٣,٢٠). مبدأ الأنبوب ذي المضاعف الضوئي.

يمكن تغيير حساسية الأنبوب ذي المضاعف الضوئي بتنظيم جهد مرحلة التضخيم الأولي. وتكون الاستجابة خطية بسبب فرق الكمون الصغير نسبياً. إن خرج الأنبوب ذي المضاعف الضوئي محدود بتيار مصعد من بضعة ميلي أمبيرات. وبالتالي يمكن فقط قياس شدات طاقة مشعة منخفضة من دون التسبب بأي أثر تسخيني معتبر على سطح الإلكترود.

وتستطيع هذه الأنابيب قياس شدات ضوء أضعف بحوالي ١٠^٧ من المرات من تلك التي يمكن قياسها بأنبوب ضوئي عادي، ولهذا السبب ينبغي تحجيبها بعناية من الضوء المتناثر. إن الأنبوب سريع في استجابته إلى حد استخدامه في عدادات الوميض. حيث تُواجَه نبضات ضوء ذات فترة استمرار بقصر النانو ثانية. يتطلب تشغيل المضاعف الضوئي تغذية بالطاقة بتيار مستمر يجب أن تكون ذات استقرارية أفضل بمرتبة واحدة على الأقل في المطال من الدقة المرغوب فيها للقياس. فمثلاً من أجل الحصول على دقة ١٪ يجب أن لا يتجاوز تذبذب الجهد المستقر ٠,١٪.

يمكن للإرهاق والإشباع أن يحدثا عند مستويات إضاءة عالية. هذه الأجهزة حساسة للتداخل الكهرومغناطيسي وهي مكلفة أكثر من الحساسات الكهروضوئية الأخرى. إن المضاعفات الضوئية ليست منتظمة الحساسية على مدى كامل الطيف، وفي التطبيق العملي يقوم المصنعون بتضمين الوحدات الأكثر ملاءمة لمجال التردد الذي صممت الأداة لأجله.

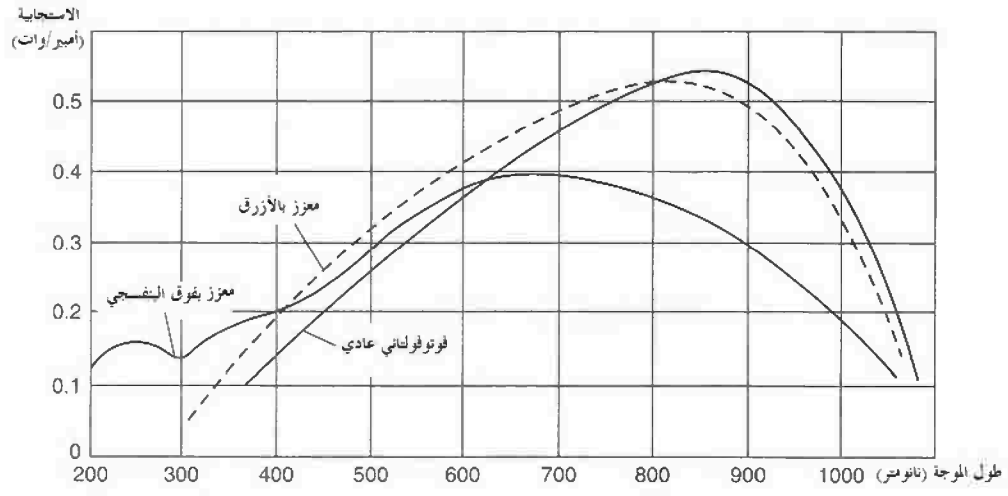
وفي حالة مقاييس الضوء الطيفية فإن المضاعفات الضوئية المورّدة تغطي عادة المجال ١٨٥-٦٥٠ نانو متر. ومن أجل القياسات عند أطوال موجات طويلة تُعرض أنابيب خاصة حساسة للضوء الأحمر تغطي مجالاً طيفياً من ١٨٥-٨٥٠ نانو متر، إلا أنها أقل حساسية بشكل ملحوظ عند أطوال موجة تحت ٤٥٠ نانو متر من المضاعفات الضوئية القياسية.

يمكن أن تتخرب الأنابيب ذات المضاعف الضوئي إذا ما سُحب تيار زائد من المصعد النهائي. ولما كان التحميل الزائد العرضي يمكن أن يحدث بسهولة في المختبر وبما أن تبديل الأنابيب مكلف فإن مما يُنصح به أن يتم تبني بعض وسائل الحماية من التحميل الزائد.

(٣,٧,٣) الكاشفات الديودية السيليكونية Silicon Diode Detectors

يمكن أن نستبدل بالمضاعف الضوئي المكلف وكبير الحجم والذي يتطلب مصدراً مستقراً للجهد العالي كاشفاً ديودياً سيليكونياً (ديود ضوئي مثل H.P. 5082-4220) هذا الديود قابل للاستعمال ضمن المجال الطيفي ٠,٤-١ ميكرومتر في عدد من الأجهزة (مقاييس الضوء الطيفية، مقاييس الضوء اللهبية). يمكن تغذية الديود الضوئي من مصدر جهد منخفض.

تتمتع هذه الكاشفات عندما تكون متكاملة مع مضخم عملياتي بخواص أداء تُقارن مع تلك التي للمضاعف الضوئي على مدى مجال طول موجة مشابه. يوضح الشكل رقم (٣,٢١) الاستجابة الطيفية للكاشفات الديودية السيليكونية. هذه الأجهزة متينة ميكانيكياً وتستهلك طاقة أقل بكثير كونها ذات حالة صلبة. إن خرج التيار المعتم ومستويات الضجيج هي بحيث يمكن استخدام هذه الأجهزة على مدى مجال حركي أكبر بكثير.



الشكل رقم (٣,٢١). الاستجابة الطيفية لكاشفات ديودية سيليكونية.

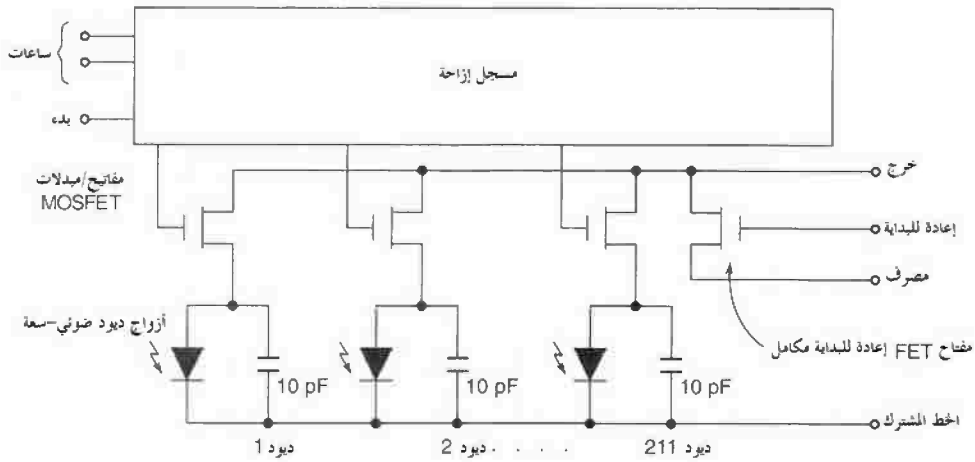
(٣,٧,٤) المصفوفات الديودية Diode Arrays

وهي عبارة عن مجموعات من عناصر كاشفة أحادية على شكل خطي أو مصفوفي يمكن تركيبها في مقياس ضوء طيفي بحيث أن كامل الطيف يكون مركزاً على مصفوصة من حجم مناسب. ولا تستلزم هذه الترتيبة أية آلية لانتقاء طول الموجة، والخرج فيها متاح بشكل آني. إلا أن دقة التمييز في المصفوفات الديودية محدودة بالحجم الفيزيائي لعناصر الكاشف الأحادية والذي هو في الوقت الحاضر حوالي ٢ نانو متر.

تتألف الكواشف المصفوفية الديودية المستخدمة في مقياس الضوء الطيفي (Hewlett Packard, Model 8450A) من دارتين سيليكونيتين تكامليتين يحتوي كل منهما على ٢١١ ديود حساس للضوء و ٢١١ سعة تخزين. إن المصفوفة الديودية الضوئية عبارة عن دارة تكاملية من نوع PMOS (نصف ناقل من أكسيد معدن بقناة إيجابية) بطول يتجاوز ١,٢٥ سنتيمتر. كل ديود حساس للضوء في المصفوفة ذو أبعاد ٠,٠٥ في ٠,٥ ميليمتر ويتمتع باستجابة طيفية تمتد إلى ما وراء المجال ٢٠٠-٨٠٠ نانو متر.

يوضح الشكل رقم (٣,٢٢) مخططاً صندوقياً وظيفياً لرقاقة مصفوفية ديودية. هناك على التوازي مع كل ديود من الديودات الـ ٢١١ مكثفة للتخزين سعة ١٠ بيكوفاراد. هذه الأزواج من الديودات والسعات مربوطة تتابعياً إلى خط إشارة خرج مشترك من خلال مفاتيح MOSFET فردية. وعندما يكون مفتاح الـ FET مغلقاً فإن المضخم الأولي المربوط إلى خط الإشارة هذا يُقحِم كموناً قدره -٥ فولت على زوج الديود- السعة. وعندما يفتح مفتاح الـ FET ثانية فإن التيار الضوئي يتسبب في أن تفرغ السعة شحنتها باتجاه الكمون صفر. يتم إنجاز الاستقراء التسلسلي للمصفوفة الديودية بواسطة مسجل إزاحة رقمي مصمم داخل رقاقة مصفوفة الديودات الضوئية.

ونموذجياً تبدي المصفوفات الديودية تيار تسرب أقل من ٠,١ بيكو أمبير. ويتزايد هذا الخطأ بشكل أسي مع درجة الحرارة، إلا أنه، ولأن قيمة التسرب الابتدائي بهذا الانخفاض، فإنه لا حاجة لتبريد المصفوفة عند درجات حرارة مرتفعة للمحيط.



الشكل رقم (٣,٢٢). مخطط وظيفي لمصفوفة ديودية ضوئية.

(٣,٨) الحساسات الليفية البصرية
Optical Fibre Sensors

لقد كان تطور الألياف البصرية وراء عدد من المجسات التي تجد تطبيقات في المجال الطبي. إن قدرة هذه الألياف على نقل الضوء لمسافات طويلة بضياعات طاقة منخفضة وتفاعل الضوء مع نظام مقيس يوفران القاعدة لهذه الأجهزة الحاسّة. هذه الحساسات خاملة كهربائياً وبالتالي منيعة ضد الاضطرابات الكهرومغناطسية، وهي مرنة هندسياً ومقاومة للتآكل، كما أنها يمكن أن تُستَدَق (تُصنع بأبعاد دقيقة بالغة الصغر)، وهي الأكثر ملاءمة لتطبيقات القياس عن بعد.

لقد طُوِّر عدد كبير من الحساسات الليفية البصرية من أجل تطبيقات حيوية طبية (Martin et al, 1989). وقد قادت قدرة الألياف البصرية على تحسس الأصناف الكيميائية إلى تطوير عدد من الحساسات الليفية البصرية الكيميائية. كما تم أيضاً عمل أجهزة منها لقياس المعاملات الفيزيائية كدرجة الحرارة والضغط والإزاحة.

غير أن الاستخدام الأكثر مباشرة للألياف البصرية في الطب هو من أجل الوصول إلى مناطق ما كان يمكن الوصول إليها لولاها، سواء من أجل تصوير هذه المناطق كما في التنظير الداخلي أو كنظام توصيل للضوء في الجراحة الليزرية. تتضمن التغطية التالية الحساسات الليفية البصرية المستخدمة بشكل سائد من أجل قياسات فيزيولوجية (Walt, 1992).

تعتمد المجسات البصرية على ألياف زجاجية أو بلاستيكية بأقطار ١٠٠-٢٥٠ ميكرومتر كما في أنظمة الاتصالات بالألياف البصرية. لقد كان لليف البصري الأول خواص نقل ضعيفة. ولكن تم خلال عقد من الزمن تخفيض الضياعات من ألف ديسيبل لكل كيلومتر في عام ١٩٦٦م إلى أقل من ديسيبل واحد لكل كيلومتر في عام ١٩٧٦م. إن مثل هذه التحسينات في التصنيع وفي الفهم النظري لنقل الضوء في حزمة بصرية قادت إلى هذا الاستخدام المنتشر لهذه الألياف البصرية في تطبيقات مختلفة بما فيها تلك الطبية السريرية.

(٣,٨,١) ميزات الحساسات الليفية البصرية Advantages of Optical Fibre Sensors

- غير كهربائية وبالتالي خالية من التداخلات المترافقة عادة مع الحساسات المبنية على أساس إلكتروني.
- منيعة ضد التشويش الراديوي / الهاتفي cross-talk.
- هناك درجة عالية من المرونة الميكانيكية المقترنة بالليف البصري، وهذه مع حجمه الصغير تسمح بالوصول إلى مناطق من الجسم لايمكن الوصول إليها لولاه.
- مناسبة لتطبيقات القياس عن بعد حيث يمكن لمعظم التجهيزات أن تكون على مسافة معقولة من المريض.
- ليس لهذه الحساسات أي توصيل كهربائي بجسم المريض مما يضمن سلامة المريض.
- يمكن قياس أكثر من صنف واحد من الأصناف الكيميائية بحساس واحد باستخدام أكثر من طول واحد لموجة كشف المسبار مما يوفر ميزات اقتصادية أساسية.
- آمنة بحد ذاتها والطاقة البصرية ذات العلاقة منخفضة وبحدود بضعة ميلي وات عموماً.
- قادرة على مراقبة عينة في بيئتها الديناميكية بغض النظر عن المسافة وصعوبة الوصول والبيئة المعادية.
- التكاليف منخفضة بما يكفي لصنع حساسات للاستعمال مرة واحدة من أجل تطبيقات كثيرة.

(٣,٨,٢) أنواع الحساسات الليفية البصرية Types of Optical Fibre Sensors

تصنف الحساسات الليفية البصرية عموماً في ثلاثة أصناف هي :

- حساسات قياس الضوء photometric sensors
- الحساسات الفيزيائية physical sensors
- الحساسات الكيميائية. chemical sensors

حساسات قياس الضوء : يمكن إجراء أنواع عديدة من القياسات باستخدام الليف البصري كجهاز للمراقبة عالية التموضع للشدة الطيفية في الدم أو النسيج. إن الضوء المنبعث من طرف ليف سوف يُبعثَر أو يؤلَّق رجوعاً fluoresced back داخل الليف مما يسمح بقياس الضوء الراجع كمؤشر للامتصاص البصري أو التألق للكتلة عند رأس الليف. يتم تحسس التغيرات في الضوء الراجع باستخدام كاشف ضوئي. مثل هذه الحساسات تراقب التغيرات إما في مطال أو في تردد الضوء المنعكس.

قياسات المطال : إن حساس قياس الضوء الأوسع انتشاراً في فئة قياس المطال هو مقياس التأكسج (الأوكسيميتر). يقيس هذا الجهاز تشبع الدم بالأكسجين بناء على حقيقة أن لخضاب الدم وخضاب الدم المؤكسج طيفي امتصاص مختلفين. يعطي الفصل العاشر من الكتاب تفاصيل هذا النوع من الحساسات. يسمح استخدام القثاطر الليفية البصرية بالمراقبة داخل الشريانية للتشبع بالأكسجين.

إن قياس تدفق الدم المبني على قياس الكثافة الصباغية ذو علاقة لصيقة بقياس التأكسج. تُحقن مادة ملونة (عادة أخضر الإندوسيانين) في الدم ويراقَب تركيزها بواسطة امتصاصها عند طول موجة مناسبة. يمكن استخدام التغير الزمني لتركيز المادة الملونة بعد ذلك لحساب الخرج القلبي بتقنيات التخفيف. ويعطي الفصل الثاني عشر من الكتاب تفاصيل هذه الأجهزة.

يمكن لمراقبة مطال الضوء المنعكس أو المنقول عند طول موجة محدد أن يعطي معلومات مفيدة فيما يتعلق بالحالة الاستقلابية (الأيضية) للنسيج الموجود تحت الفحص. التقنية غير اجتياحية والألياف البصرية تلعب دوراً هاماً كتقنية تمكّن من فحص مناطق صغيرة جداً من نسيج ما بحيث يمكن متابعة الاستقلاب على مستوى محدد الموضع. تستند الطريقة إلى قياس التألق fluorometry وتعتمد على المراقبة المباشرة لإضاءة النسيج باستخدام موجه (دليل) الضوء الليفي البصري لربط الأداة بالنسيج.

قياسات التردد : الفئة الثانية من حساسات قياس الضوء التي تستخدم موجة ضوء ليفي بصري تستند إلى تغيرات التردد في الإشارة. إن المثال الأكثر شيوعاً هو قياس السرعة الليزري الدوبلري. يُرسَل في هذه الطريقة ضوء ليزري (عادة هيليوم/نيون) بواسطة ليف إلى سطح الجلد. تبعثر كريات الدم الحمراء المتحركة الضوء وتنتج انزياحاً دوبلرياً في التردد بسبب حركتها. وعندما يُمزج الضوءان مزاح وغير مزاح التردد فإنه يتم الحصول على طيف من ترددات النبض. وباستخدام عدد من تقنيات المعالجة المختلفة على طيف تردد النبض فإنه يمكن الحصول على معلومات عن تدفق الدم. إن تفاصيل هذه التقنيات موجودة في الفصل الحادي عشر من الكتاب.

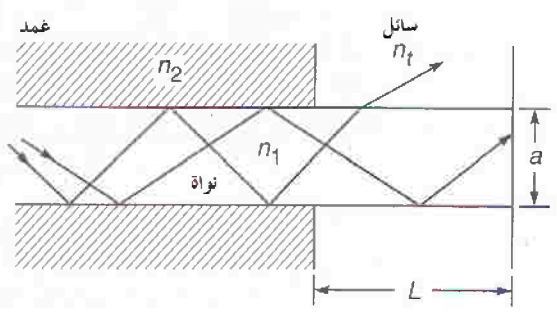
الحساسات الفيزيائية : إن درجة الحرارة والضغط هما المعاملان الفيزيائيان الأكثر أهمية اللذان يمكن قياسهما بشكل مفيد باستخدام الألياف البصرية. تستند هذه الحساسات إلى تثبيت مجس ضوئي عند نهاية ليف بصري.

حساسات درجة الحرارة : يعاني إنتاج سخونة (درجات حرارة مرتفعة في المجال ٤٢-٤٥ درجة مئوية أو أعلى) من أجل معالجة السرطان بطاقة كهرومغناطيسية، إما في مجال التردد الراديوي أو مجال تردد الموجات الميكروية، من مشاكل صعبة في قياس درجة الحرارة. تحتوي حساسات درجة الحرارة التقليدية كالثرمستورات والمزدوجات الحرارية على مكونات معدنية وأسلاك توصيل تشوش على الحقول الكهرومغناطيسية المؤثرة ويمكن أن تتسبب حتى في بقع تسخين ممركزة وقراءات درجة الحرارة يمكن أن تكون خاطئة بسبب التداخل. يتم التغلب على هذه المشكلة باستخدام حساسات درجة حرارة تعتمد على الألياف البصرية. وتستخدم هذه الأجهزة تغيرات محرَّضة

خارجياً في خواص النقل للألياف البصرية وتقدم ميزات نموذجية للألياف البصرية كالمرونة والأبعاد الصغيرة والمناعة ضد التداخل الكهرومغناطيسي.

يتكون أحد أبسط أنواع حساسات درجة الحرارة من طبقة من الكريستال السائل عند نهاية ألياف بصرية تعطي تغيراً في تبعثر الضوء مع تغير درجة الحرارة عند طول موجة محدد. ويوضح الشكل رقم (٣,٢٣) ترتيبة ممر أشعة لحساس درجة حرارة يستخدم ليفا بنواة من السيليكا وغمد من السيليكون مع جزء طرفي من دون غمد مغمس في سائل يحل محل الغمد. يتسبب ارتفاع درجة الحرارة في خفض قرينة الانكسار لمقطع الليف المغمس بالسائل. لذلك فإن الضوء المنتقل من الليف المغمد بالسيليكون إلى الليف المغمس بالسائل يعاني من توهين يتناقص بتزايد درجة الحرارة.

يُربط ضوء من ديود باعث للضوء LED بطول موجة ٨٦٠ نانومتر إلى الليف. يُرسل الضوء المنعكس رجوعاً على طول نفس الألياف، ويتم كشف ومعالجة تعديل مطال الضوء المحرَّض بالغمد الحساس للحرارة المطبق على النهاية البعيدة لليف. وقد قام Scheggi et al (1984) ببناء مسبار درجة حرارة دقائقي للاستخدام الطبي بقطر خارجي ٠,٨ ميليمتر وداخلي ٠,٥ ميليمتر، وقد كانت الحساسية التي تم الحصول عليها (±٠,١) درجة مئوية في المجال ٢٠-٥٠ درجة مئوية.

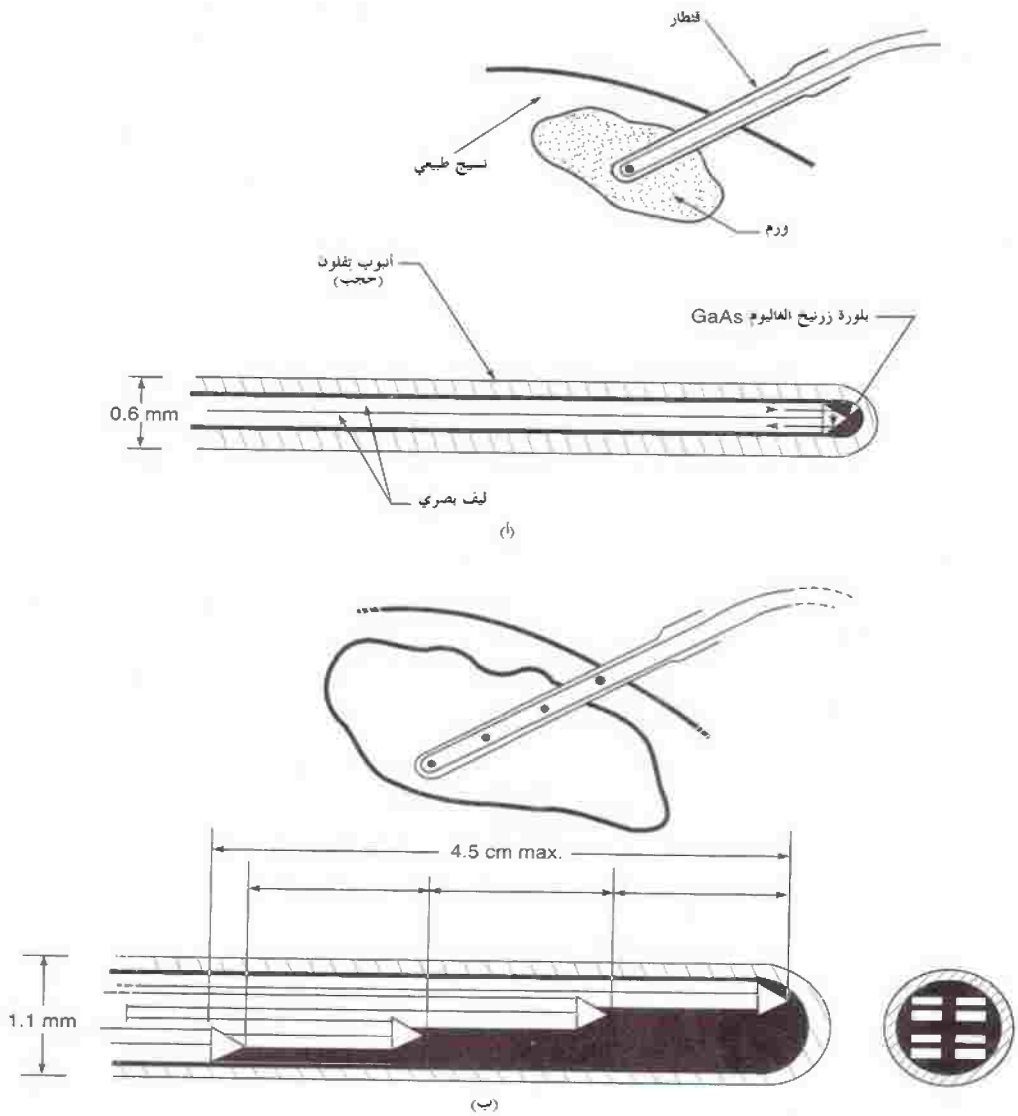


الشكل رقم (٣,٢٣). مبدأ حساس درجة حرارة يعتمد على تغير قرينة الانكسار بتغير درجة الحرارة، ويوضح المخطط شكل م. ر الأش. عة البصرية.

قام Christensen (1977) باقتراح وتطوير نوع آخر من حساسات درجة الحرارة يستند إلى اعتماد امتصاص حافة الحزمة لضوء تحت أحمر في كريستالة (بلورة) زرنيخ الغاليوم على درجة الحرارة. إن تغير طاقة فجوة الحزمة مع درجة الحرارة (انزياح طول موجة حراري) يعطي تغيراً قابلاً للقياس في فعالية نقل الضوء تحت الأحمر عبر الكريستالة.

يُبعث الضوء في نظام قياس درجة حرارة مبني على أساس هذا المبدأ (القسم (أ) من الشكل رقم ٣,٢٤) من ديود باعث للضوء LED ويُنقل من وإلى الكريستالة عن طريق ألياف بصرية ويُقاس بواسطة كاشف ضوئي.

لا تُستخدم أجزاء معدنية في تصميم مسبار درجة الحرارة مما ينتج عنه شفافية المسبار بالنسبة للحقول الكهرومغناطيسية. هناك مسابر بحساس فردي بقطر خارجي ٠,٦ ميليمتر ومسابر بحساس رباعي نقاط درجة الحرارة بقطر ١,٢ ميليمتر تستند إلى هذه التقنية متاحة تجارياً (القسم (ب) من الشكل رقم ٣,٢٤).



الشكل رقم (٣,٢٤). حساس درجة حرارة يعتمد على تغير طول موجة ضوء تحت أحمر في بلورة زرنيخ غاليوم: (أ) حساس وحيد النقط ـ ة، (ب) حساس متعدد النقاط (بموافقة شركة M/s Chlinitherm).

إن حساسات درجة الحرارة الألقية البصرية fluoroptic (Culshaw, 1982) أجهزة مفيدة أخرى يمكن استخدامها لقياس درجة حراة النسيج. وهي تحتوي على فوسفور أرضي نادر يضاء بضوء أبيض على طول مسافة قصيرة من ليف بصري كبير النواة. يهيج الضوء الفوسفور الذي يبعث عدداً من الخطوط. وباستخدام مرشحات يتم انتقاء خطين من هذه الخطوط عند ٥٤٠ و٦٣٠ نانومتر تكون نسبة شدتيهما تابعاً وحيد القيمة لدرجة حرارة الفوسفور. وبقياس هذه النسبة فإنه يمكن عمل قياس دقيق لدرجة الحرارة. إن القياس مستقل عن شدة ضوء الخرج. وقد أُفيد عن دقة تمييز ٠,١ درجة مئوية على مدى المجال من −٥٠ إلى +٢٥٠ درجة مئوية بهذه التقنية.

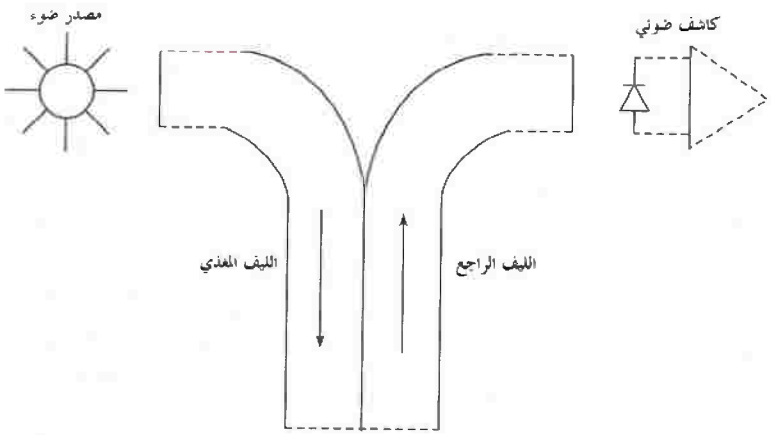
حساسات الضغط : إن قياس الضغط داخل القحفي وداخل القلبي مهمان كلاهما ويمكن إجراؤهما باستخدام حساسات ليفية بصرية. يستند الجهاز المستخدم لقياس الضغط داخل القحفي إلى نظام موازنة ضغط. هنا يوجد ضغط ستاتيكي (ساكن) لمراقبته وحساس يستند إلى انحراف مرآة ظفرية (مثبتة من طرف واحد) مثبتة إلى غشاء. يتسبب انحراف الغشاء بانعكاس الضوء المنبعث من مركز الليف البصري بشكل تفاضلي باتجاه أحد ليفين جامعين للضوء موضوعين على جانب من ليف التحكم. تُستشعر نسبة الضوء المجمع بليفين مختلفين وتُطبَّق تغذية راجعة من ضغط الهواء على داخل المسبار عبر أنبوب ربط هوائي ويوازن الغشاء إلى وضعية الصفر وتؤمَّن قراءة لضغط الموازنة.

لقد طُور حساس مشابه يستند إلى انحراف مرآة لمراقبة الضغط داخل الوعائي. هناك حاجة إلى قياس ضغط ديناميكي (حركي) من أجل الاستخدام داخل الوعائي ، ولذلك ينبغي أن لا تكون الحساسات صغيرة فقط ولكن أيضاً أن تتمتع باستجابة ترددية جيدة لكي تتبع شكل موجة الضغط بشكل أمين.

الحساسات الكيميائية : لقد جذب تطور الحساسات الليفية البصرية للأصناف الكيميائية اهتماماً كبيراً. إن قدرة هذه الألياف على نقل الضوء على مدى مسافات طويلة بضياعات منخفضة والتفاعل التبادلي للضوء مع المقيس يقدمان الأساس لهذه الأجهزة الحساسة.

يوضح الشكل رقم (٣,٢٥) المفهوم الأساسي للحساسات الكيميائية المبنية على أساس الألياف البصرية (Sertz, 1984). يتم تطبيق ضوء من مصدر مناسب على ليف ويوجَّه هذا الضوء إلى منطقة حيث يتفاعل تبادلياً منع نظام القياس أو مع المجس الكيميائي. ينشأ عن التفاعل التبادلي تعديل للشدة الضوئية. يتم تجميع الضوء المعدل بنفس الليف البصري أو بآخر ويقاس بواسطة نظام كشف ضوئي.

إن التحسس البصري للأصناف الكيميائية مبني على أساس التفاعل التبادلي لهذه الكينونات مع الضوء. عندما يصدم ضوء مادة ما فإن أنواعاً مختلفة من التفاعلات التبادلية تحدث بين فوتونات الإشعاع الكهرومغناطيسي وذرات وجزيئات المادة. هذه التفاعلات التبادلية لها علاقة بتبادل الطاقة وقد تقود إلى امتصاص الضوء أو نقله أو انبعاثه أو بعثرته أو انعكاسه. إن الطبيعة الكمية لنقل الطاقة هذا تعطي معلومات حول تركيبة النظام وتشكل الأساس للطريقة المطيافية للتحليل الكيميائي (Narayana Swamy and Sevilla, 1988).



الشكل رقم (٣,٢٥). حساس كيميائي بليف بصري (طبقاً لـ : Narayana Swamy and Sevilla, 1988).

لقد تم تطوير نوعين من الحساسات الليفية البصرية من أجل قياس الأصناف الكيميائية :

● *الحساسات المطيافية (السبكتروسكوبية)* : يكشف هذا النوع من الحساسات ويحلل الأصناف مباشرة من خلال خواصها الطيفية المميزة. إن وظيفة الليف البصري في هذه الحساسات هي توجيه الضوء ونقله من المصدر إلى منطقة أخذ العينة ومن العينة إلى الكاشف. هنا يتفاعل الضوء تبادلياً مع الأصناف الجاري تحسسها.

● *الحساسات الكيميائية* : وفيها تتم مواجهة نظام الجس الكيميائي مع الليف البصري عند نهايته. وفي التشغيل فإن التفاعل التبادلي مع المحلَّل analyte (ما يتم تحليله) يقود إلى تغير في الخواص البصرية للطور المحلولي reagent phase الذي يتم سبره وكشفه من خلال الليف البصري. وقد تكون الخاصة البصرية المقيسة هي الامتصاص أو الانعكاس أو الألق lumiscence. تتمتع هذه الحساسات بتحديدية specificity كبيرة نتيجة لاحتوائها على نظام الجس الكيميائي.

(٣,٩) الحساسات الحيوية
Biosensors

تجمع الحساسات الحيوية بين الانتقائية الحادة لعلم الحياة (البيولوجيا) وقوة علم الإلكترونيات الميكروية والبصرية الحديثين لتقدم أداة تحليلية جديدة بتطبيقات رئيسية في الطب والدراسات البيئية والصناعات الغذائية والمعالجة.

تتكون جميع الحساسات الكيميائية من طبقة تحسس تتفاعل تبادلياً مع مادة كيميائية خاصة ومن عنصر جس يراقب هذه التفاعلات. أما الحساسات الحيوية فهي حساسات كيميائية تكون فيها طبقة التحسس مركبة من جزيئات حيوية كبيرة كالأجسام المضادة والأنزيمات.

ويُستخدم اليوم مصطلح الحساسات الحيوية لوصف تنوع واسع من الأجهزة التحليلية المبنية على أساس الاتحاد بين المكونات الحيوية والفيزيوكيميائية. يمكن للمكوّن الحيوي أن يكون مؤلفاً من أنزيمات أو أجسام مضادة أو خلايا كاملة أو شرائح أنسجة، ويُستخدم للتعرف على والتفاعل التبادلي مع مُحلَّل محدد. أما المكوّن الفيزيوكيميائي والذي يُشار إليه غالباً بالمجس فيقوم بتحويل هذا التفاعل التبادلي إلى إشارة يمكن تضخيمها ولها علاقة مباشرة مع تركيز المحلَّل. ويمكن للمجس أن يستخدم التغير في الخواص الفولتية أو الأمبيرية أو البصرية أو المغناطيسية أو الحرارية أو النقلية.

وتقدَّم الحساسات الحيوية التحديدية والانتقائية للتحاليل ذات الأساس الحيوي مغلَّفة في أجهزة سهلة الاستخدام في الموقع من قبل كادر عادي غير متخصص. فمثلاً تسمح الحساسات الحيوية في الحقل الطبي بإجراء تحاليل سريرية بجانب السرير وفي وحدات العناية المركزة وفي عيادات الأطباء أكثر من إجرائها في مخبرات مركزية. ويمكن بالتالي اتخاذ الإجراءات اللازمة بناء على نتائج الاختبار مباشرة مما يجنبنا التأخيرات المترافقة مع إرسال العينات إلى مختبرات مركزية وانتظار النتائج منها.

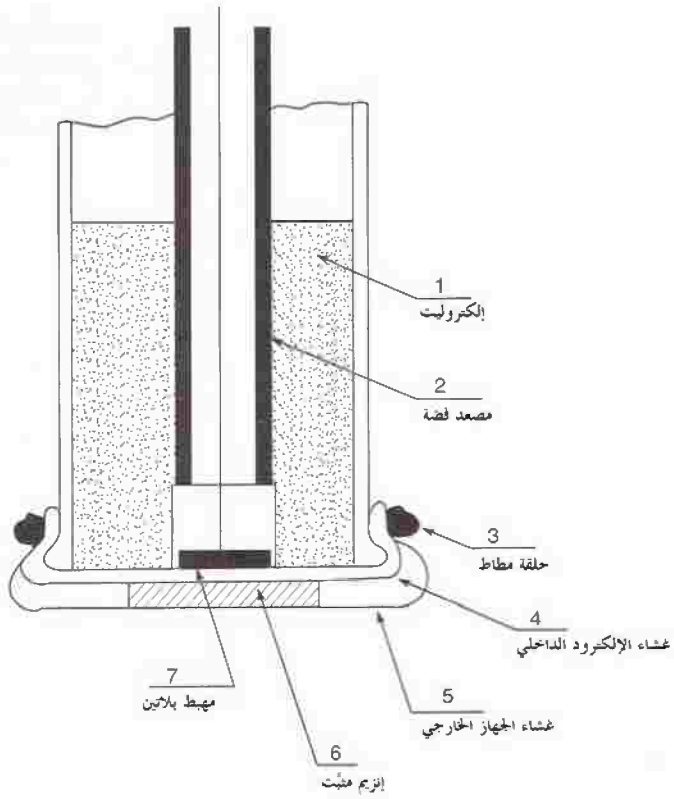
إن المناطق الحرجة في بناء الحساسات الحيوية هي وسائل ربط المكوّن الحيوي مع المجس ونظام التضخيم التالي. لقد كانت غالبية الحساسات الحيوية الأولى تقوم بتثبيت أنزيمات على إلكترودات منتقاة مثل إلكترود كلارك للأكسجين والذي كان يقيس نتائج التفاعل التبادلي (الأكسجين هنا) بين الأنزيم والمحلَّل. إن الحساس الحيوي الأكثر نجاحاً حتى الآن هو مراقب غلوكوز الدم المنزلي المستخدم ممن يعانون من السكر. يعتمد الحساس الحيوي في هذه الأداة على أنزيمات تميز وتنشط تفاعلات الغلوكوز مع توليد أصناف اختزالية نشطة تُكتشَف كهروكيميائياً.

يوضح الشكل رقم (٣,٢٦) بنية هذا النوع من الحساسات. إذا كان الإنزيم المثبَّت هو غلوكوز أُكسيداز (خميرة مؤكسدة للغلوكوز) قابل للانحلال بين الغشائين فإنه يصبح حساس غلوكوز. وهو يعمل على مبدأ أنه في حال وجود غلوكوز فإن الأكسجين يُستهلَك مما يؤدي إلى تغير في الإشارة من إلكترود أكسجين تقليدي.

إن التفاعل الكيميائي للغلوكوز مع الأكسجين يُنشَّط بوجود الغلوكوز أكسيداز، وهذا يسبب تناقصاً في الضغط الجزئي للأكسجين وإنتاجاً لبيروكسيد الهيدروجين بأكسدة الغلوكوز إلى حمض غلوكوني كما في المعادلة التالية:

$$\text{Glucose} + O_2 \xrightarrow{\textit{Glucoseoxidase}} \text{Gluconic acid} + H_2O_2$$

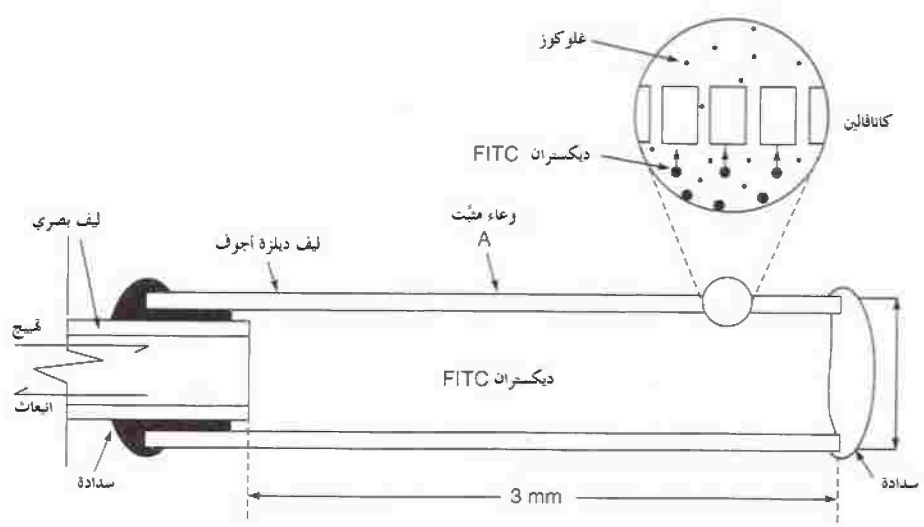
يمكن قياس التغيرات في جميع هذه المكوّنات الكيميائية لتحديد تركيز الغلوكوز.



الشكل رقم (٣,٢٦). تفاصيل بنيوية لحساس يستخدم إنزيم مع إلكترود أكسجين كأداة تحليلية تابعة.

لقد استُخدم غلوكوز أكسيداز محبوس في هلام البولي أكريلاميد لبناء حساس. وبشكل عام فإن الاستجابة الزمنية لهذا النوع من الإلكترودات الحيوية بطيئة وبالتالي فقد تم التركيز في العمل على ربط أقرب للمكوّنات الحيوية للمجس. وتقوم التكنولوجيا الحالية في الحساسات الحيوية بالتخلص من العامل الرابط بالتثبيت المباشر للإنزيم على سطح الإلكترود مما يجعل مكون التمييز الحيوي جزءاً تكاملياً من مجس الإلكترود. إن السيئة الرئيسية لحساسات الغلوكوز الإنزيمية هي عدم استقرارية الإنزيم المثبَّت، ولذلك فإن غالبية حساسات الغلوكوز تعمل بشكل فعال لفترات قصيرة من الزمن فقط.

لقد تم تفحص عدد من المقاربات البديلة لتطوير حساس غلوكوز. إن مبدأً هاماً يمكن استخدامه لهذه الغاية يعتمد على "الحساس الانجذابي التنافسي العكوس المستند إلى الألق". يتألف العنصر المتحسس من أنبوب ديلزة أجوف بطول ٣ ميليمتر مربوط عن بعد إلى مقياس فلورة عن طريق ليف بصري وحيد (الشكل رقم ٣,٢٧). وهو يحتوي على مستقبل كربوهيدراتي (canavalin A) مثبت على سطحه الداخلي ومؤشر مميز بالمادة المتألقة كعامل منافس.



الشكل رقم (٣,٢٧). حساس غلوكوز بصري دقيق الحجم (معاد رسمه طبقاً لـ. Mansouri and Schultz).

ينتشر الغلوكوز المحلَّل في الوسط الخارجي عبر غشاء الديلزة وينافس من أجل ربط مواقع على طبقة الأساس (الكانافالين) مع الدكستران. إن الحساس مرتب بحيث أن طبقة الأساس تكون مثبتة في موضع خارج الممر البصري لنهاية الليف. وهو مربوط إلى الجدار الداخلي لليف الأجوف النفوذ للغلوكوز المثبت إلى نهاية الليف البصري. يقوم الليف الأجوف مقام حاوية وهو غير نفوذ للجزيئات الكبيرة للمؤشر الألقي. إن تزايد تركيز الغلوكوز يزيح الدكستران المميز من الكانافالين مما يجعله حراً في الانتشار إلى داخل كتلة المحلول المضاء. الحقل البصري الممتد من الليف يرى فقط المؤشر غير المرتبط. وفي حالة التوازن فإن مستوى المادة المتألقة الحرة في الليف الأجوف يُقاس كشدة تألق ويُربَط بتركيز الغلوكوز الخارجي.

تُعتبَر الحساسات الحيوية التكنولوجيا الأكثر ملاءمة في مناطق حيث التحليلات المخبرية التقليدية بتكاليفها ومتطلباتها الزمنية المرافقة ليست حلاً مناسباً. إحدى المناطق حيث أخذ العينات وتحليل المختبر غير مناسب بشكل واضح هو كشف تسربات الغازات الخطرة في مكان العمل. يمكن التوصل إلى حماية العاملين في الصناعة الكيميائية بشكل مثالي بأجهزة مراقبة شخصية مبنية على أساس تكنولوجيا الحساسات الحيوية ويمكن ارتداؤها على الثياب وسوف تعطي إنذاراً صوتياً آنياً عن التسرب. ولهذه الغاية فقد طُوّرت حساسات حيوية للكشف عن سيانيد الهيدروجين.

وإلى جانب المجال الطبي فإن للحساسات الحيوية تطبيقات عديدة في صناعة الأغذية والمشروبات. وعلى الرغم من أنه تم تطوير حساسات حيوية عديدة على مدى السنوات القليلة الماضية وأن هناك حالياً حساسات حيوية عديدة شغالة إلا أن هناك مشاكل مختلفة ما زالت تحتاج إلى حل. إن المشكلة الأكثر تعقيداً والتي تنتظر حلاً هي عمرها المحدود الذي يقيد انطلاقتها التجارية ويجعل التحسينات في استقراريتها ضرورية.

(٣,١٠) الحساسات الذكية
Smart Sensors

على الرغم من عدم وجود تعريف من الصناعة مقبول للحساس الذكي حالياً إلا أن من المتفق عليه عموماً أن لهذه الحساسات ربطاً وثيقاً بين العناصر المتحسسة والحاسبة. ولذلك تتضمن خواصها المعاوضة الحرارية والمعايرة والتضخيم ومستوى ما من القدرة على اتخاذ القرار والتشخيص الذاتي والمقدرة على الاختبار والمقدرة على الاتصال التفاعلي مع دارات رقمية خارجية. إن الحساسات الذكية المتوفرة حالياً هي في الحقيقة تجميعات هجينة لحساسات نصف ناقلة زائداً أجهزة نصف ناقلة أخرى. في بعض الحالات يكون الربط بين الحساس وعنصر الحساب عند مستوى الرقاقة على قطعة واحدة من السيليكون فيما يُشار إليه كحساس ذكي تكاملي. وفي حالات أخرى يُطبَّق المصطلح عند مستوى النظام. إن الأدوار المهمة للحساسات الذكية هي :

تهيئة الإشار: يخدم الحساس الذكي في تحويل متغير تماثلي تابع للزمن إلى خرج رقمي. كما أنه يتضمن وظائف مثل التحويل إلى الخطية والمعاوضة الحرارية ومعالجة الإشارة.

تضييق حلقات التغذية الراجعة : يمكن لتأخير الاتصال أن يسبب مشاكل لأنظمة تعتمد على التغذية الراجعة أو التي يجب أن تتفاعل/تتلاءم مع بيئتها المحيطة. إن الحساسات الذكية توفر ميزات واضحة لهذا النوع من التطبيقات بخفضها للمسافة بين الحساس والمعالج.

المراقبة/التشخيص: تتضمن الحساسات الذكية تعرفاً على النمط وتقنيات إحصائية يمكن استخدامها لتخفيض البيانات وتغيير الكشف ومراكمة المعلومات لأغراض المراقبة والتشخيص خصوصاً في القطاع الصحي.

تحول الحساسات الذكية كثيراً من حمل معالجة الإشارة عن كاهل حواسيب الهدف العام، وتقدم تخفيضاً في حجم الرزمة الكلي وتحسن الموثوقية (الاعتمادية). وكلاهما، التخفيض والتحسين، حرجان بالنسبة للتطبيقات الموضعية وإعادة العينة. ويعتمد التوصل إلى حساس ذكي على مكاملة الموارد التقنية الضرورية لتصميم الحساس والدارة وتطوير عملية قابلة للتصنيع واختيار التكنولوجيا المناسبة.

إن حساس الضغط (MPX5050D) المقدم من شركة موتورولا مثال نموذجي لحساس ذكي مع تضخيم ومعايرة ومعاوضة حرارية تكاملية (Frank, 1993). يستخدم الحساس بشكل نموذجي الأثر المقاوم الضغطي في السيليكون ويستخدم تقنيات ثنائية القطب للمعالجة تعتمد على دارة تكاملية لتصنيع الحساس.

يصل الجهاز بواسطة مقاومات غشائية رقيقة موازنة بالليزر على حساس الضغط إلى جهد انحراف ضغط صفري اسمي (مقنن) قدره (٠,٥) فولت وجهد خرج لكامل التدريج قدره ٤,٥ فولت عندما يوصل إلى جهد تغذية (٥) فولت. ولذلك فإن مجال الخرج الديناميكي العائد إلى تأرجح ضغط دخل ٠-٣٧٥ ميليمتر زئبق هو (٤) فولت. إن أداء الجهاز يقارن تفضيلياً بمنتجات مصنعة بمكوّنات مباشرة.