

# MEMS- Komponenten für die Gas-Sensorik - Herzstück moderner Sensoren.

Sensoren zur Erfassung von Gaszusammensetzungen werden in mehreren Branchen stark nachgefragt. Decken lässt sich der Bedarf mit nicht-dispersive IR-Sensoren mit MEMS-Komponenten als Herzstück. Sie lassen sich kompakt und in gleichbleibender Qualität in hohen Stückzahlen fertigen.

Die Nachfrage kommt vor allem aus den Bereichen Umweltsensorik, Gebäudeautomation, Medizintechnik und der Industrie. Gassensoren sollen neben industriellen Anwendungen zur Prozess- und Sicherheitstechnik in zunehmenden Maße auch bei der Umweltüberwachung und Belüftungsregelung in Gebäuden zum Einsatz kommen. Je nach Anwendung sind dabei verschiedene Gase und Gasgemische von Interesse. Zusätzlich liegen unterschiedlich harte Anforderungen vor, was zu einem Bedarf an hochspezialisierten Lösungen für den jeweiligen Anwendungsfall führt. Die Grundbausteine dafür sind jedoch, wie dieser Beitrag zeigen wird, in den meisten Fällen die gleichen.

Um die hohen Anforderungen der jeweiligen Branche zu erfüllen und gleichzeitig kompakte und

kostengünstige Sensoren fertigen zu können, eignen sich insbesondere optische, nicht-dispersive Sensoren im Infrarotbereich (NDIR-Sensoren), die in MEMS-Technik (Mikroelektromechanische Systeme) gefertigt werden.

Gasmoleküle mit einem Dipolmoment, wie z.B. die häufig gesuchte Spezies Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe oder Ammoniak, zeigen sehr markante Absorptionsbanden im nahen und mittleren Infrarotbereich (typ. 2 – 15  $\mu\text{m}$ ), wodurch Sensoren auf optischen Grundprinzipien sehr selektive und empfindliche Systeme ermöglichen. Eine gute Übersicht zur Thematik ist in [1] zu finden.

Im Vergleich zu (elektro-) chemischen Wirkmechanismen sind solche

Sensoren zudem sehr flink, weniger stör anfällig für Quereinflüsse und insbesondere langzeitstabil hinsichtlich Signal-Drifteffekten.

Für kompakte und kosteneffiziente Sensorsysteme spielen MEMS-IR-

#### MEMS für NDIR-Sensoren

Nicht-Dispersive Sensoren bieten den Vorteil eines vergleichsweise einfachen Aufbaus. Ein typisches Modul, das mit MEMS-IR-Strahlern und ebenfalls in MEMS-Technik gefertigten Thermopile-Detektoren arbeitet, ist in Bild 1 gezeigt. Anstelle von komplexen optomechanischen Systemen in Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR) Spektrometern oder Systemen mit kostspieligen Beugungsgittern können hier im einfachsten Fall Lichtquelle und Detektor an den gegenüberliegenden Enden einer Gasküvette angebracht und so die durch konzentrationsabhängige Lichtabsorption erzeugte Signaländerung als Messgröße erfasst werden.



Bild 1: Typisches NDIR-Gassensormodul auf Basis von MEMS-IR-Strahlern und Thermopile-Detektoren.

Um verschiedene Gasspezies zu selektieren und eine Selbstreferenzierung zu erreichen, werden verschiedene Bereiche des IR-Spektrums auf verschiedene Messkanäle aufgeteilt.

Lichtquellen und MEMS-Detektoren eine zunehmende Rolle, da diese hohe Stückzahlen bei gleichbleibender Qualität und geringer Baugröße garantieren.

In NDIR-Sensoren erfolgt dies in der Regel durch individuelle Bandpassfilter, die unmittelbar über den einzelnen Kanälen eines Infrarotdetektors platziert werden. Der Referenzkanal wird bezüglich seiner Bandpasscharakteristik auf einen Wellenlängenbereich gelegt, der nicht durch IR aktive Mess- oder Umweltgase beeinflusst wird.

Üblich sind  $\sim 4 \mu\text{m}$ . Ein entscheidender Vorteil miniaturisierter MEMS-IR-Komponenten liegt in den niedrigen Zeitkonstanten, die hohe Messfrequenzen im Sensorsystem erlauben. Dies bedingt sich durch die geringe Masse der aktiven Membran-Empfängerfläche der MEMS-Chips. Kombiniert mit einer hohen Detektivität der IR-Detektoren und Strahlungsintensität der IR-Emitter können so Anwendungsfelder erschlossen werden, die schnelle, präzise und verlässliche Messungen erfordern, gleichzeitig aber bei potenziell hohem Bedarf kostenkritisch sind.

Als Beispiele sind medizinische Anwendungen im mobilen Point-of-Care sowie der Atemgas- und Anästhesiegasanalyse zu nennen, insbesondere in stark wachsenden Märkten wie dem asiatischen Raum. Im Bereich der Kapnographie sind für die Überwachung bei der Wiederbelebung von Patienten Abtastraten größer 20 Hz und bei der Beatmungsregelung und dem Lungenfunktionstest Abtastraten

zwischen 40 Hz und 100 Hz notwendig [2]. Bei Applikationen mit niedrigen Messzyklen kann die interne hohe Messfrequenz genutzt werden, um das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) durch spezielle Mittelwertbildungen zu optimieren und so hochauflösende Systeme darstellen zu können.

Die Küvettenlänge der NDIR-Gassensoren wird durch die physikalisch notwendige Absorptionslänge der spezifischen Messaufgabe bestimmt. Wie bei allen anderen IR-Fotometerarten definiert sich diese Länge physikalisch durch das Lambert-Beer-Gesetz (Formel 1). Das Lambert-Beer'sche Gesetz oder Bouguer-Lambert-Beer'sche Gesetz beschreibt die Abschwächung der Intensität einer Strahlung in Bezug zu deren Anfangsintensität  $I_{\lambda,0}$  bei dem Durchgang durch ein Medium mit einer absorbierenden Substanz in Abhängigkeit von der Konzentration  $c$  der absorbierenden Substanz und der Schichtdicke  $d$ . Das Gesetz bildet die Grundlage der modernen Photometrie als analytische Methode.

Es ist ein Spezialfall der Strahlungstransport-Gleichung ohne Emissionsterm:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} \cdot e^{-\epsilon_{\lambda} \cdot d \cdot c}$$

Hierbei sind  $I_{\lambda,0}$  und  $I_{\lambda}$  sind die Intensitäten des einfallenden Lichts und des transmittierten Lichts und  $\epsilon_{\lambda}$  ist der Extinktionskoeffizient bei der Wellenlänge  $\lambda$ . Der Extinktionskoeffizient weist für IR-aktive Gase eine jeweils spektral charakteristische Spezifik auf und kann wie ein Fingerabdruck zur Identifikation des Gases betrachtet werden. Er ist über entsprechende Datenbanken wie HITRAN zugänglich. Die typischen Küvettenlängen liegen bei  $L = 1$  mm für

hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (100 Vol.-%) und bis zu  $L = 250$  mm für sehr präzise Messungen von Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) unterhalb von 50 ppm [3]. In der Praxis wird auf Grund der loga-rithmisch wirkenden Absorptionsfunktion in Bezug auf die Gaskonzentration, die Küvetten- bzw. Absorptionslänge so ausgeführt, dass im Messbereichsendwert der jeweils zu messenden Gaskonzentration eine ca. 20 %ige Signalabschwächung vorliegt. Für die Messung geringer Gaskonzentrationen und schwach absorbierender Gase wird häufig ein gefalteter Strahlengang eingesetzt, um so die Baugröße des Messsystems handhabbar zu gestalten. Ein Beispiel ist die sogenannte White Messzelle, die mit ihrem vielfach reflektierenden Strahlengang Absorptionslängen von mehreren Metern erlaubt. Ein Beispiel hierzu ist in der Veröffentlichung des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik (IPM) zu finden [4].

### Schaltung einer NDIR-Gasmesszelle

Die in Bild 2 dargestellte Schaltung zeigt den Kernbereich der analogen Emitteransteuerung und Detektorsignalverarbeitung einer NDIR-Gasmesszelle.

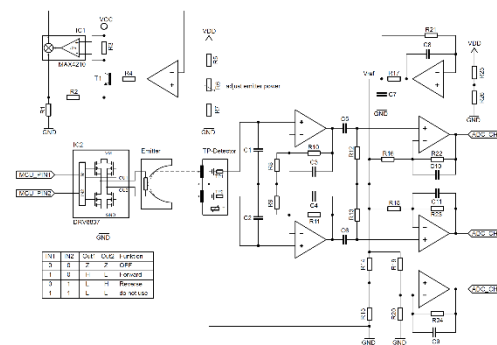


Bild2 Schematische Grundschiung Gassensor mit Thermopiles.

Die Schaltung ist für eine Single-Supply-Stromversorgung von 3,3 V ausgelegt.

IC1 erzeugt eine Referenzspannung aus der halben Betriebsspannung. Die Referenzspannung wird als virtueller Gnd für die Verstärkerschaltung der Thermopilesignale und als Versorgungsspannung für den Brückenverstärker genutzt.

Das Anheben des Bezugspegels mit der Referenzspannung ist erforderlich, weil die Ausgangsspannungen der Thermopiledetektoren mit einigen 100  $\mu\text{V}$  nahe der unteren Versorgungsspannung der Operationsverstärker liegen und somit außerhalb des zulässigen Eingangsspannungsbereiches.

Aufgrund der erforderlichen hohen Gesamtverstärkung wird jeder Detektorkanal zweistufig verstärkt. Bei beiden Verstärkern handelt es sich um rauscharme nichtinvertierende Verstärkerstufen. Die zur Verbesserung des SNR eingeschränkte Bandbreite des Verstärkers, welche sich nach der Modulationsfrequenz des Emitters richtet, kann über das RC-Rückkoppelnetzwerk eingestellt werden. Die beiden Verstärkerstufen sind durch einen RC-Hochpassfilter gekoppelt um Offsetspannungen des thermisch modulierten Messsignals zu entfernen.

Der integrierte Temperatursensor im Detektorgehäuse dient zur softwareseitigen Kompensation der Gaskonzentration. IC6 bildet mit dem dazugehörigen Widerstandnetzwerk R15 bis R19 einen Brückenverstärker. Mit diesem kann das Temperatursignal auf den Anwendungs-Temperaturbereich skaliert werden. Bei dem IC18 handelt es sich um einen Leistungsmonitor vom Typ MAX4210 der zusammen mit dem Regler IC17 und T1 die Leistung des Infrarotemitters

auf einen konstanten Wert regelt. Dazu wird der Emitterstrom über den Shunt-Widerstand R24 gemessen und mit der Emitterspannung multipliziert. Aufgrund des zulässigen

Eingangsspannungsbereiches des MAX4210 muss die Emitterspannung über den Spannungsteiler R25, R26 reduziert werden. Der Leistungswert kann über das Potentiometer R21 eingestellt werden. Bei IC19 handelt es sich um einen Vollbrückentreiber. Über die beiden Steuereingänge IN1 und IN2 kann die Stromrichtung durch den Emitter gesteuert und elektrisch moduliert werden.

Ein stromkommutierender Betrieb des Emitters erhöht die Lebensdauer durch Vermeidung von Elektromigrationseffekten. Diese schaltungstechnischen Maßnahmen sind vorteilhaft, um Alterungseffekte des Emitters zu reduzieren und somit die Langzeitstabilität des Messsystems zu optimieren.

Die Steuerung des Analogteils und die digitale Signalkonditionierung erfolgt mit einem entsprechenden Mikrocontroller. Dieser übernimmt über hinterlegte spezifische Software- und Kalibrierfunktionen die Berechnung der Gaskonzentration sowie notwendige Signal-Kompensationen bezüglich thermischer Effekte, die z.B. durch die Thermopiles und die IR-Filter hervorgerufen werden.

Einflüsse des zu messenden Gasdruckes auf die Absorptionseigenschaften werden ebenfalls über den Mikrocontroller kompensiert.

### MEMS-IR-Strahler

Klassische Glühwendeln erreichen durch die konstruktionsbedingte relativ große thermische Masse nur typische

Modulationsfrequenzen im Bereich weniger Hertz.

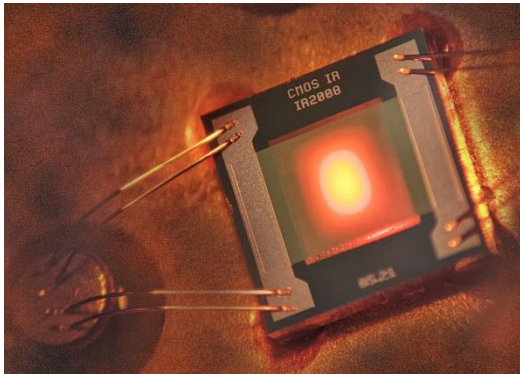


Bild 3. MEMS-IR-Strahler der Marke CMOS IR im Betrieb.

Eine weitere Limitierung stellt die fragile Mechanik einer freihängenden Wendel dar, die bei mechanischem Schock und über die Lebensdauer zu Deformierung neigt, was Änderungen der optischen Konfiguration und der resultierenden Abbildung im System verursacht und damit eine Neukalibrierung des Sensors erforderlich macht.

Höhere Messfrequenzen und gleichzeitig eine stabilere Position der emittierenden Fläche können mit MEMS-IR-Strahlern (Bild 3) erreicht werden. Ein Beispiel ist in [5] beschrieben. Auf Grundlage moderner Silizium-Technologien wird eine umlaufend aufgespannte, nur etwa ein Mikrometer dicke Heizmembran erzeugt. Das Silizium dient hier im Wesentlichen nur als Träger und wird im Bereich der aktiven Gebiete gegen Ende der Herstellungsprozesse vollständig entfernt.

Die aktive Heizmembran enthält ein von dielektrischen Schichten umschlossenes Hochtemperatur-Metallsystem, das bezüglich Prozesskompatibilität, thermo-mechanischer Spannungen und optischer Emissivität optimiert werden

muss. Das grundlegende Wirkprinzip ist dabei – wie auch bei klassischen Glühwendeln – die thermische Emission eines elektrisch betriebenen Widerstands. Mit MEMS-IR Strahlern können so langzeitstabile Temperaturen über 850 °C erzeugt werden, die je nach Größe des Bauteils zu optischen Leistungen zwischen einigen 10 mW bis 100 mW führen. Das spektrale Verhalten entspricht dabei in erster Näherung einem Schwarzkörper nach Planck.

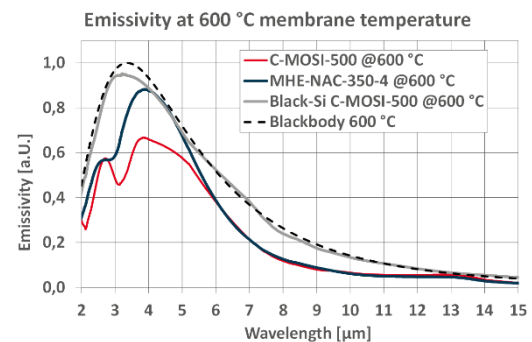


Bild 4. Typische Spektralverteilung des emittierten Lichts verschiedener MEMS-Emitter-Typen im Vergleich zum Schwarzkörperspektrum.

Die spektrale Charakteristik wird jedoch durch den konkreten Schichtaufbau, die beteiligten Materialien und gegebenenfalls zusätzliche laterale Strukturierungen beeinflusst und weist praktisch einen gegenüber dem idealen Planck-spektrum diskontinuierlichen Wellenlängenverlauf auf (Bild 4). Einige Anwendungen, wie z.B. die Messungen von Alkohol um 9 µm, erfordern zusätzliche Maßnahmen, um die Emission in diesem Bereich gezielt anzuheben. Hier kommen zusätzliche, mikrostrukturierte und funktionalisierte Schichten zum Einsatz.

Die erreichbare Dynamik wird durch die Wärmekapazität und den Wärmetransport der aktiven Heizmembran dominiert. Kleinere Strahler erreichen dabei im Allgemeinen auch



höhere Modulationsraten. Frequenzen über 100 Hz wurden bereits demonstriert. Im gleichen Zuge sinkt jedoch auch die erreichbare optische Leistung.

Je nach Anwendung muss so also der optimale Strahler gefunden bzw. entwickelt werden.

### MEMS-IR-Detektoren

Auf den ersten Blick ähnelt die Architektur aktueller MEMS-Thermopiles denen der IR-Strahler. Auch hier wird das aktive Gebiet in Form eines Membransystems in einem Siliziumrahmen aufgespannt. Das Detektionsprinzip basiert dabei auf Thermospannung, die sich zwischen warmen und kalten Seiten eines oder mehrerer Materialien ausbildet und durch den Seebeck-Effekt beschrieben werden kann.

Eine gute Übersicht zu MEMS-Thermopiles kann in [6] gefunden werden. Bei der Wahl der Materialien müssen neben möglichst hohen Seebeck-Koeffizienten eine Reihe anderer Anforderungen berücksichtigt werden. Dazu zählen beispielsweise die während der weiteren Herstellungsschritte und im späteren Einsatz vorliegenden Temperaturen sowie die Kompatibilität und Reinheitsanforderungen der Halbleiterfertigungslinie. Ein häufig gewähltes Materialsystem ist aufgrund seiner hohen Kompatibilität polykristallines Silizium.

Je nach Dotierung lassen sich hier Seebeck-Koeffizienten mit unterschiedlichen Vorzeichen einstellen, weshalb für höhere Ausgangsspannungen meist abwechselnde Dotierungen mit invertierten heiß- und kalt-Enden in Reihe verschaltet werden. Der

spannungsverursachende thermische Unterschied entsteht durch die in den aktiven Gebieten absorbierte Infrarotstrahlung (warm-Ende) und den thermisch gut angekoppelten Silizium-Trägerrahmen (kalt-Ende).

Zur Kompensation von Temperaturänderungen der Umgebung dient ein zusätzlicher Temperatursensor im Bereich des Si-Rahmens oder Sockels. Ein Beispiel für einen Thermopile-Detektor mit Temperatursensor ist in Bild 6 gezeigt.

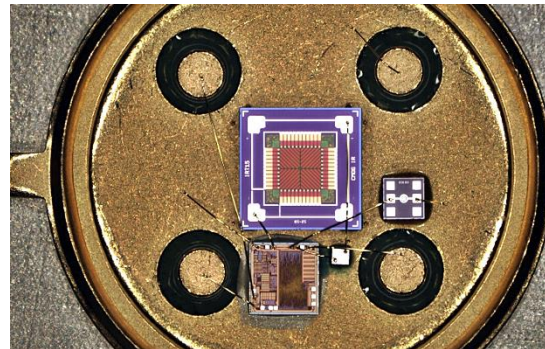


Bild 5. Thermopile-Detektor mit Steuerschaltkreis und Referenztemperatursensor.

Die erreichbare Dynamik geht auch hier mit der Wärmekapazität und dem Wärmetransport vom warm-Ende zum kalt-Ende einher und lässt sich über den Schichtaufbau und die Größe der Membran steuern. Das Absorptionsverhalten kann durch Anpassung des Schichtstapels sowie durch zusätzliche funktionale Beschichtungen spektral breitbandig oder anwendungsspezifisch verbessert werden.

Das Selektieren von einzelnen, gasspezifischen Absorptionsbanden geschieht durch zusätzliche optische Filter, die als Fenstermaterial des späteren Packages eingesetzt werden. Meist handelt es sich dabei um dielektrische Schichten auf Silizium. Dabei ist es wie in Bild 7 möglich, mehrere individuell gefilterte Kanäle in

einer Sensorbaugruppe zu platzieren und so mehrere Gase bzw. Referenzkanäle zu erfassen.

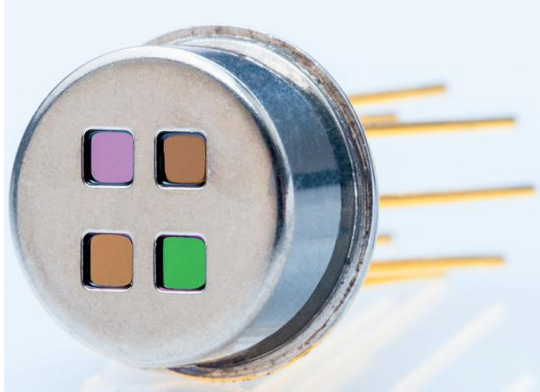


Bild 6. Gehautes 4-Kanal-Thermopile mit individuellen optischen Filtern im TO-Package.

Der bei typischen Anwendungsszenarien erreichbare Temperaturunterschied beträgt nur wenige Kelvin oder weniger, die je nach Material der Thermoelemente zu einigen nV bis wenigen  $\mu$ V Thermospannungen führen.

Um die Empfindlichkeit zu steigern und die Signale in einen komfortableren Messbereich zu verschieben, werden viele Thermoelemente auf dem Chip in Reihe geschaltet.

So entstehen Spannungen von einigen mV/K. In diesem Fall wird von sogenannten Thermopiles oder auch Thermosäulen gesprochen. Mit steigender Anzahl an Thermosäulen pro Fläche steigt jedoch auch der elektrische Widerstand und das damit verbundene Nyquist-Rauschen der Ausgangsspannung.

Als bereinigtes Qualitätskriterium für die Bewertung der Empfindlichkeit wird darum meist die Noise equivalent power (NEP) oder die spezifische Detektivität  $D^*$  verwendet, wobei natürlich auch andere

Systemanforderungen wie beispielsweise der Eingangsbereich der eingesetzten Verstärkerschaltkreise berücksichtigt werden muss.

## Stand der Technik und Ausblick

Die Realisierung eines robusten und anwendungsspezifischen NDIR-Gassensors erfordert eine sorgfältige Auswahl aufeinander abgestimmter Komponenten. Dabei müssen alle Anforderungen vereint berücksichtigt werden. Um die Grenzen des technisch Möglichen bezüglich Nachweisgrenze oder Geschwindigkeit weiter zu verschieben, bedarf es neue, auf diese Aufgabe spezialisierte Komponenten wie optimierte Strahler mit hoher Dynamik oder Thermopiles mit optimierter spektraler Empfindlichkeit.

Um die Akzeptanz weiter zu erhöhen und die Anwendungsfelder auszudehnen, wird neben der Verbesserung der Einzelkomponenten auch eine höhere Integrationsdichte verfolgt. Ein möglicher Ansatz ist es dabei, IR-Strahler, Messküvette, Detektoren und eine erste Stufe der Signalverarbeitung innerhalb eines gemeinsamen Packages zu platzieren und so im Nutzen herstellen zu können. Für besonders harsche Umgebungen kommen hierfür nur hochtemperaturstabile Materialien, wie Keramiken infrage. Im Rahmen des Verbundprojekts HIPS-VP3 (BMBF, Förderkennzeichen 03WKDG03A) werden hierfür aktuell neuartige Silizium-Keramikverbünde (SiCer) entwickelt.

# Autoren



**Steffen Biermann**

Entwicklungsleiter Micro-Hybrid Electronic GmbH und seit 2017 gemeinsam mit Prof. T. Ortlepp Geschäftsführer der CMOS IR GmbH;

[www.microhybrid.com](http://www.microhybrid.com)  
[www.cmosir.com](http://www.cmosir.com)



**Prof. Dr. Thomas Ortlepp**

Geschäftsführer CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH;

[www.cismst.de](http://www.cismst.de)  
[www.cmosir.com](http://www.cmosir.com)



**Dr. Jörg Martin Schädel**

Leiter Geschäftsfeld MOEMS, CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

[www.cismst.de](http://www.cismst.de)

## Quellenangaben/Literatur

[1] Hodgkinson, J.; Tatam, R.P.: Optical gas sensing: a review. Measurement Science and Technology, Volume 24, Number 1, 2013.

[2] Quelle: Trabold, B.: Anwendung und Einsatz von CO<sub>2</sub>-Messtechnik in der Medizin, Präsentation auf MOEMS Workshop, CiS Forschungsinstitut 2019.

[3] Quelle: Wiegand, G.: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Springer, 2016.

[4] Eberhardt, A. et al.: Advanced white cell design for investigation of ethylene using a nondispersive infrared photometer. <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-461624.html>.

[5] Ji, X. et al.: A MEMS IR thermal source for NDIR gas sensors. 8. International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings, 2006, pp. 620-622.

[6] Graf, A. et al.: Review of micromachined thermopiles for infrared detection. Measurement Science and Technology, Volume 18, Number 7, 2007.