



Doctoral Thesis

Hochempfindlicher Wärmeflussensor

Author(s):

Meyer, Vital Manuel

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001889765> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 12266

HOCHEMPFINDLICHER WÄRMEFLUSSSENSOR

Abhandlung
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
Vital Manuel Meyer
Dipl. Natw. ETH
geboren am 4. September 1965
aus Basel-Stadt

Angenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. B. Keller, Referent
Prof. Dr. H. Melchior, Koreferent

ZUSAMMENFASSUNG

Wärmeflüsse spielen eine zentrale Rolle, wenn es darum geht, thermische Prozesse, seien diese stationärer oder instationärer Art, zu verstehen.

Wärmeflüsse können, wenn die entsprechenden thermischen Widerstände bekannt sind, aus Temperaturmessungen an verschiedenen Orten indirekt bestimmt werden. In vielen Messsituationen sind die relevanten Wärmewiderstände jedoch nicht bekannt. In diesen Fällen ist es angebracht, die Wärmeflüsse direkt zu messen.

Mit einem Wärmeflussensor werden Wärmeflüsse direkt gemessen. Dies geschieht durch eine in den Sensor integrierte Temperaturdifferenzmessung. Der Wärmewiderstand des Sensors geht zusammen mit der Empfindlichkeit der Temperaturdifferenzmessung in die Kalibrationskonstante des Sensors ein.

In folgenden Gebieten der Bauphysik sind Wärmeflussmessungen von Interesse:

- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen;
- Untersuchung thermischer Schwachstellen in Gebäuden;
- thermische Komfortanalysen;
- Untersuchung von Wärmeaustauschprozessen an Oberflächen;
- Steuerung von Heiz- und Kühlsystemen.

Die Wärmeflussmessung in solchen Umgebungen verlangt hochempfindliche Sensoren, da die Wärmeflüsse oft sehr klein sind (Größenordnung: 1 W/m^2). Konventionelle Wärmeflussensoren erreichen genügende Empfindlichkeit nur unter Inkaufnahme relativ grosser dickenbedingter thermischer Eigenwiderstände der Sensoren (1-5 mm Kunststoff) oder grossflächiger Sensoren (bis 100 cm^2). Die geringe Empfindlichkeit der Sensoren ist auf eine sehr geringe Empfindlichkeitsdichte von weniger als 0.01 V/W der Sensoren zurückzuführen. Ausserdem stören konventionelle Wärmeflussensoren durch ihren dickenbedingten thermischen Widerstand den Wärmefluss, was häufig zu Messfehlern führt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, einen Wärmeflussensor zu entwickeln,

- dessen Empfindlichkeitsdichte um mindestens eine Grössenordnung grösser ist als die Empfindlichkeitsdichte der heute verfügbaren Sensoren;
- dessen dickenbedingter thermischer Widerstand kleiner als $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ (entsprechend einer physischen Dicke von 1 mm Kunststoff) ist;
- dessen Fläche kleiner als 10 cm^2 ist;
- der es erlaubt, bei der Messung an einer Oberfläche den konvektiven und den radiativen Anteil des Wärmeflusses getrennt zu erfassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Prototypen entwickelt. Mit dem dritten Prototypen konnten alle Zielsetzungen erfüllt werden

Die vorgestellten Wärmeflussensoren basieren auf dem thermoelektrischen Effekt. Es sind die ersten Wärmeflussensoren, welche die Möglichkeiten der photolithographischen Strukturierung und der mikromechanischen Formgebung, wie sie aus der Mikroelektronik und der Mikrosensorik bekannt sind ausschöpfen.

Die Wärmeflussmessung basiert auf einer Temperaturdifferenzmessung in einer Messebene, die senkrecht zur Wärmeflussrichtung angeordnet ist. Durch eine wärmeflussverzerrende Anordnung von Materialien mit stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten in der nahen Umgebung der Messebene wird in der Messebene eine Temperaturdifferenz induziert. Um ein grösseres Ausgangssignal zu erhalten, werden mehrere Thermoelemente zu einer Thermoelementenkette in Serie geschaltet.

Beim ersten Prototypen werden als thermoelektrische Materialien Wismut und Antimon verwendet. Diese Materialien zeichnen sich durch einen relativ grossen thermoelektrischen Koeffizienten (ca. $100 \mu\text{V/K}$) und einen kleinen spezifischen Widerstand (ca. $1 \mu\Omega\text{m}$) aus. Die wärmeflussverzerrende Struktur wurde durch photolithographisch strukturierte und galvanisch verdickte Goldbahnen erzeugt. Die erreichte Sensorempfindlichkeit liegt bei $20 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$, was einer auf die gesamte Sensorfläche normierten Empfindlichkeitsdichte von 0.016 V/W entspricht.

Der zweite und der dritte Prototyp basieren auf Siliziumtechnologie. Die Thermoelemente bestehen aus Wismut/Antimon (zweiter Prototyp) respektive *p/n*-Polisilizium (dritter Prototyp). Die wärmeflussverzerrende Struktur wurde durch nasschemisches Ätzen in Silizium generiert und besteht aus ruhender Luft und Silizium.

Die Thermoelementenkette liegt auf einer wenigen Mikrometer dicken Membran aus Siliziumoxid/Siliziumnitrid. Die mechanisch empfindliche

Membran wird durch einen Epoxidharz-Verguss geschützt. Eine Aluminiumschicht auf der Oberfläche verhindert eine Abhängigkeit der Wärmeflussverzerrung im Innern des Sensors und damit der Sensorempfindlichkeit von der thermischen Leitfähigkeit der Umgebung.

Die Empfindlichkeit des zweiten Prototypen beträgt $2000 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, entsprechend einer Empfindlichkeitsdichte von $3.2 \text{ V}/\text{W}$, die des dritten Prototypen $120 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ entsprechend einer Empfindlichkeitsdichte von $0.39 \text{ V}/\text{W}$.

Der thermisch Widerstand aller drei Prototypen liegt bei etwa $0.005 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, die Sensordicke bei 1-2 mm.

Die sensitive Struktur des dritten Prototyps wurde in einem industriellen CMOS- Prozess hergestellt, was zu einer sehr hohe Fabrikationsausbeute führte.

Um bei der Messung an einer Oberfläche den konvektiven und den radiativen Anteil des Wärmeflusses getrennt zu erfassen, wurden drei sensitive Zonen, entsprechend drei CMOS-Chips der Fläche 0.25 cm^2 , auf einem quadratischen Keramik-Trägersubstrat der Fläche 12.25 cm^2 angeordnet und mit unterschiedlich absorbierenden (VIS-NIR-IR-Bereich) Oberflächenbeschichtungen versehen.

In einer Messreihe in einem Versuchsraum wurden die Sensoren zur Bestimmung des lokalen konvektiven Wärmeübergangs eingesetzt.

Folgendes wurde erreicht:

- die Empfindlichkeitsdichte konnte gegenüber dem besten konventionellen Wärmeflussensor um einen Faktor 160 (zweiter Prototyp) gesteigert werden;
- der dickenbedingte thermische Widerstand beträgt bei allen Prototypen etwa $0.005 \text{ m}^2\text{W}/\text{K}$ entsprechend dem Epoxidharz-Verguss der Dicke 1 mm;
- die Sensorfläche pro sensitives Element beträgt beim dritten Prototypen etwa 3 cm^2 ;
- die getrennte Erfassung des konvektiven und des radiativen Anteils des Wärmeflusses bei der Messung an einer Oberfläche ist möglich.

ABSTRACT

In the study of thermal processes, in stationary as well as in nonstationary situations, the determination of the heat fluxes is often the ultimate purpose.

Only if the corresponding thermal resistances are known, it is possible to determine heat fluxes indirectly by measuring temperatures at different positions. In many measuring situations however, the relevant thermal resistances are not known and the direct measurement of the heat fluxes is necessary.

With a heat flux sensor, the heat flux is measured directly. Most often the sensitive structure consists of a thermocouple chain embedded in a carrier substrate. The heat flux induces a temperature difference across the carrier substrate. The sensitivity of the thermocouple chain together with the thermal resistance of the carrier substrate determine the sensitivity of the sensor.

There is a demand for heat flux measurements in different branches:

- determination of the thermal conductivity of thermal insulation materials;
- examination of thermal bridges in buildings;
- thermal comfort analysis;
- investigation of thermal transport processes on surfaces;
- control of heating and cooling systems.

Heat flux measurement in a building environment requires highly sensitive sensors. Typical heat fluxes are very small (order of magnitude 1 W/m^2). Conventional heat flux sensors achieve sufficient sensitivity only with the aid of a high thermal resistance (corresponding to 1-5 mm of plastic) or a large sensitive areas (up to 100 cm^2). The poor sensitivity of conventional heat flux sensors results from a poor signal density (signal per active sensor area) of less than 0.01 V/W . Moreover, conventional heat flux sensors disturb the heat fluxes by their thermal resistance which distorts the measurement.

The aim of this work was to develop a heat flux sensor

- with a higher signal density by at least an order of magnitude than conventional heat flux sensors;
- with a thickness induced thermal resistance of less than $5 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (corresponding a physical thickness of 1 mm of plastic);
- with a total area of less than 10 cm^2 ;
- which permits to measure the convective as well as the radiative part of the heat flux.

Three different prototypes have been developed. The third prototype fulfills all requirements.

The presented new heat flux sensors are based on the thermoelectric effect. They are the first heat flux sensors which take full advantage from the opportunities of photolithographic structuring and modern micro-machining technologies known from other types of microsensors.

The thermocouple chain lays in a measuring plane perpendicular to the direction of the heat flux. By a heat flux disturbing structure nearby the measuring plane, composed by zones of highly and poorly thermal conducting materials, a temperature difference are induced in the measuring plane. To achieve a big sensor signal, many themocouples are connected in series to form a thermocouple chain.

The thermocouple chain of the first prototype consists of bismuth and antimony. A bismuth-antimony thermocouple has a relatively big differential thermoelectric coefficient (about $100 \mu\text{V}/\text{K}$) and a low specific resistance (about $1 \mu\Omega\text{m}$). The heat flux disturbing structure was generated by galvanic growth of an evaporated, photolithographically structured gold film. The sensivity of the first prototype is $20 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ which corresponds to a signal density of $0.016 \text{ V}/\text{W}$.

The second and third prototype are based on silicon technology. The thermocouple chain consists bismuth and antimony (second prototype) or *p/n*-polysilicon (third prototype). Polysilicon has a higher differential thermoelectric coefficient ($410 \mu\text{V}/\text{K}$) in comparison to bismuth and antimony, but also a higher specific resistance (about $160 \mu\Omega\text{m}$).

The heat flux disturbing structure was generated by anisotropic wet etching of silicon. The heat flux disturbing structure consists of air and silicon. The thermocouple chain is placed on a 1 to $3 \mu\text{m}$ thick membrane of silicon oxide and silicon nitride. The mechanically fragile membrane is protected by a epoxy-layer of a thickness of about 1 mm. A top aluminum layer prevents the

sensitivity of the sensor from a influence of the thermal conductivity of the surrounding on.

The sensitivity of the second prototype is $2000 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ corresponding to a signal density of $1.6 \text{ V}/\text{W}$. The sensitivity of the third prototype is $120 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ corresponding to a signal density of $0.39 \text{ V}/\text{W}$.

The sensitive structure of the third prototype was produced in an industrial CMOS-process resulting in a very good production yield.

The thermal resistance of all three prototype is about $0.005 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, the sensor thickness between 1 and 2 mm.

In order to discriminate between the convective and the radiative part of the heat flux, three sensitive chips of the third prototype, each of an area of 0.25 mm^2 were mounted on a ceramic-carrier of an area of 12.25 cm^2 and coated with different absorbing (VIS-NIR-IR) surface layers.

In a experiment in a test room, the new sensors were used to determine the local thermal film coefficient.

Summarizing, we have achieved:

- a signal density higher by a factor 160 (second prototype) in comparison with the best conventional heat flux sensors;
- a small thermal resistance corresponding to a 1 mm thick of epoxy-layer;
- a small area sensor of about 3 cm^2 (third prototype);
- a sensor which distinguishes between the convection and the radiation part of the heat flux.