

# Veröffentlichung

Im Rahmen des SFB 880. [www.sfb880.tu-braunschweig.de](http://www.sfb880.tu-braunschweig.de)

## **Autoren**

Beutel, Tobias;Holle, Ansgar;Leester-Schädel, Monika;Büttgenbach, Stephanus

## **Titel**

Analysis of a combination of a hot-film and piezo-resistive pressure sensor on a single chip

## **Publisher o. Konferenz**

Mikrosystemtechnik-Kongress, Darmstadt, Germany

## **Jahr**

2011

## **Internet-Link (Doi-Nr.)**

# Untersuchungen zur Kombination von Heißfilmen und piezoresistiver Drucksensorik auf einem Chip

## Analysis of a combination of a hot-film and piezo-resistive pressure sensor on a single chip

Tobias Beutel, Ansgar Holle, Monika Leester-Schädel, Stephanus Büttgenbach,  
TU Braunschweig, Institut für Mikrotechnik, Braunschweig, Germany, t.beutel@tu-braunschweig.de

### Kurzfassung

Am Institut für Mikrotechnik (IMT) wird zurzeit ein kombinierter Strömungssensor entwickelt, um neue Vermessungen von Strömungsprofilen zu ermöglichen. Dieser besteht aus einem Heißfilmsensor, der gemeinsam mit einem Silizium-Drucksensor auf einem Chip untergebracht ist. Der Druck wird mittels piezoresistiver Widerstände ermittelt, die sich auf einer Siliziummembran befinden und auf eine mögliche Temperaturdrift hin untersucht wurden. Die Wandschubspannung wird mithilfe eines Heißfilms ermittelt, dessen Wärmeverteilung auf dem Siliziumchip untersucht wurde. Diverse Möglichkeiten zur thermischen Isolierung des Heißfilms gegenüber den piezoresistiven Widerständen wurden getestet, darunter auch SU-8 gefüllte Grabenstrukturen.

### Abstract

An integrated wall shear stress sensor was developed at the Institute for Microtechnology (IMT) for novel measurement of flow profiles. The sensor consists of a hot film component, which is fabricated on a single chip together with a silicon-based pressure sensor. Pressure measurement is realized by the use of piezoresistors, which are structured on a silicon membrane. They are analyzed to detect a possible temperature drift. The wall shear stress is detected with a hot film, whose heat distribution on the silicon chip was investigated. Several varieties of thermal insulation between the hot film and the piezoresistors were tested, including negative tone epoxy-based photo resist (SU-8) filled cavities.

## 1 Einleitung

Zukünftige Fahrzeuge, ob zu Luft, zu Wasser oder zu Land, werden jedes Potential zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und zur Energieeinsparung nutzen müssen. Bei Luftfahrzeugen bietet insbesondere die aktive Strömungsbeeinflussung viele Möglichkeiten. Über die Sensorik können die Strömungsverhältnisse in der Nähe des Profils zeitnah erfasst werden, um sie adaptiv beeinflussen zu können. Dies führt zu besseren Flugleistungen und einer erhöhten Sicherheit im Luftverkehr, da Strömungsabrisse frühzeitig detektiert werden können.

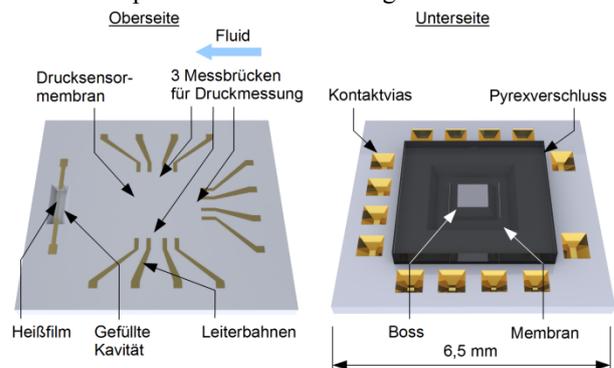
Hierzu wird ein neuartiger mikrotechnischer Strömungssensor entwickelt, der sich mithilfe von Faserverbundherstellungsprozessen in Tragflächenprofile direkt integrieren lässt. Er ist in der Lage, die Wandschubspannung sowie den Druck auf einem Chip zu ermitteln und ist zusätzlich direkt auf die Umgebungsbedingungen während Testflügen oder im Strömungskanal ausgelegt [1].

Der Drucksensor basiert auf der erfolgreich eingeführten und optimierten Technologie der hochauflösenden, dreidimensionalen Mikrokraftsensoren. Diese werden als Taster in der dimensionellen Messtechnik sowie in der Fertigungsmesstechnik oder für Reibkraftmessungen eingesetzt [2, 3].

Die Grundstruktur des Drucksensors besteht aus einer Silizium-Bossmembran (siehe **Abbildung 1**). Der Druck eines Mediums, der auf die Membranoberseite wirkt, soll über die Membranverformung piezoresistiv erfasst werden. Die auf der Membran befindlichen piezoresistiven Widerstände sind in einer Wheatstone-Brücke verschaltet. Eine besondere Anforderung an den gesamten Sensor be-

steht darin, dass seine Oberseite vollkommen eben und frei von herausragenden Strukturen sein soll.

Der ebenfalls auf dem Chip vorhandene Wandschubspannungssensor basiert auf einem Oberflächenheißfilm und somit auf der indirekten Messung des Wärmetransfers in die Umgebung. Die Umgebung besteht im Normalfall aus dem Substrat, auf dem der Heißfilm aufgebracht ist, einer Wand oder einem umströmten Körper sowie einem Fluid. Dies bedeutet, dass auch die anderen auf dem Chip befindlichen Systeme von dem Heißfilm beeinflusst werden können. Daher wird im Folgenden untersucht, ob sich eine Temperaturveränderung auf die Brückenspannung des Drucksensors im unbelasteten Zustand auswirkt. Weiterhin wird die Wärmeausbreitung um den Heißfilm bei direkter Aufbringung auf das Siliziumsubstrat charakterisiert, um Designvorgaben für die Kombination beider Sensoren erstellen zu können. Abschließend wird ein Isolationskonzept für den Heißfilm vorgestellt.



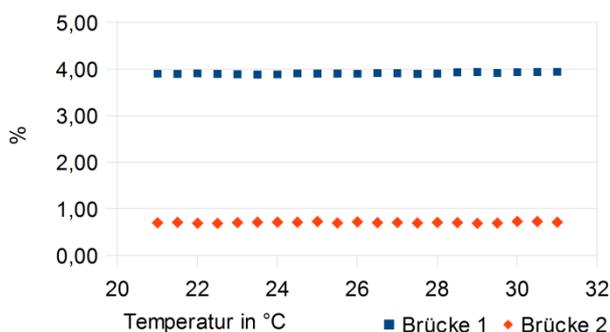
**Bild 1** Grafische Darstellung des mikrotechnischen Strömungssensors

## 2 Temperaturdrift

Erreicht der Wärmestrom des Heißfilms den Drucksensor und erwärmt diesen ungleichmäßig, dehnt sich die Membran des Drucksensors lokal unterschiedlich aus und es werden zusätzliche Spannungen im Material hervorgerufen. Falls diese in Bereichen auftreten, in denen die piezoresistiven Widerstände liegen, werden die Messwerte des Drucksensors beeinflusst. Weiterhin wird eine Temperaturveränderung den Temperaturbeiwert des k-Faktors der piezoresistiven Widerstände beeinflussen. Ist hierbei die Temperaturveränderung und somit die Widerstandsveränderung über alle Widerstände einer Wheatstonesche Messbrücke nicht gleichmäßig, so beeinflusst dies direkt die Brückenspannung und folglich auch die Messergebnisse.

Da ein kombinierter Druck-/Heißfilm-Sensor noch in der Entwicklung ist, werden die vorläufigen Test zunächst an Einzelmodulen durchgeführt. Anhand eines Prototypen des Drucksensors wird getestet, ob es eine Temperaturdrift der Offsetspannung (Brückenspannung bei  $p=0$ ) der Wheatstone-Brücke gibt. Über einen Konstanter wird die Versorgungsspannung der Brücke angelegt. Die Temperatur wird über einen Konvektionsofen eingestellt und die Brückenspannung durch ein Digitalmultimeter ermittelt. Die Messwerte werden hierbei über einen General Purpose Interface Bus (GPIB) direkt von einem PC ausgelesen und es wird jeweils aus 10 Messwerten ein Mittelwert gebildet.

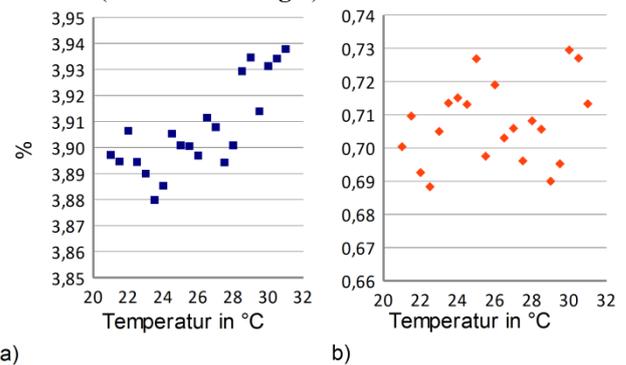
Die ermittelte Brückenspannung ist nicht nur von den Widerständen der Brücke abhängig, sondern auch von der Versorgungsspannung. Da diese eine Abweichung von bis zu 0,0002 V innerhalb der Messwerte hat, wird zur Auswertung nicht ausschließlich die Brückenspannung herangezogen, sondern der Quotient aus Brückenspannung durch Versorgungsspannung (angegeben in %) gebildet. In der folgenden **Abbildung 2** sind die Messwerte gegen die Temperatur aufgetragen.



**Bild 2** Veränderung des Quotienten Brücken-/Versorgungsspannung in Abhängigkeit von der Temperatur

In **Abbildung 2** ist zu erkennen, dass die Brückenspannungen der getesteten Brücken im unbelasteten Zustand konstant sind und bei weniger als 4 % der Versorgungsspannung liegen. Dieser Offset entsteht durch Ferti-

gungstoleranzen während des Diffusionsprozesses. Im Folgenden werden die beiden Beispiel-Brücken einzeln betrachtet (siehe **Abbildung 3**).



**Bild 3** Veränderung des Quotienten Brücken-/Versorgungsspannung in Abhängigkeit von der Temperatur a) Brücke 1 und b) Brücke 2

Sowohl in **Abbildung 3 a** als auch in **3 b** ist deutlich die Streuung der Quotientenwerte in einem Bereich von 0,06 % zu erkennen. In **Abbildung 3 a** ist zudem eine geringe, aber deutlich erkennbare Steigung der Messwerte in Abhängigkeit von der Temperatur auszumachen. Ein Einfluss der Messabweichung der verwendeten Multimeter kann ausgeschlossen werden, da diese sich bei Raumtemperatur mit einer maximalen Fehlergrenze von  $3 \cdot 10^{-6}$  bei den Quotienten auswirkt und somit um einen Faktor von  $10^{-2}$  kleiner ist als die Streuung der Quotientenwerte.

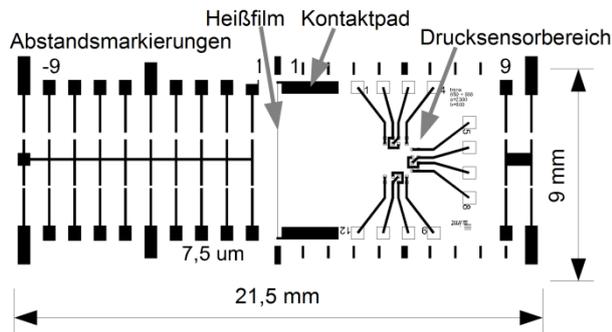
Eine Temperaturabhängigkeit der Offsetspannung wurde auch von [4] in einer Brückenschaltung von piezoresistiven Widerständen festgestellt. Ursachen hierfür können ein Unterschied in den Temperaturkoeffizienten der piezoresistiven Widerstände sowie mechanische Spannungen in der Membranstruktur aufgrund thermischer Ausdehnung sein, wie einleitend beschrieben [4]. Weiterhin kann die Kontaktierung mit Federstiften durch die Temperaturänderung und die daraus folgende Änderung der Federkraft eine zusätzliche mechanische Spannung in die Membranstruktur eingebracht haben. Da sich jede Brücke eines Sensors aufgrund von Herstellungsprozess-einflüssen leicht unterschiedlich verhalten kann, wird dieses Phänomen bei der Kalibrierung der Auswerteelektronik des mikrotechnischen Strömungssensors mit einbezogen werden.

## 3 Wärmeverteilung um Heißfilm

Das Substrat des Sensors besteht aus Silizium und hat eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{Si} = 150 \text{ W/mK}$  bei 300 K [5]. Als Heißfilmmaterial wurde für erste Voruntersuchungen am Institut Gold oder Aluminium genutzt.

Um die thermischen Verhältnisse in der Nähe des Heißfilmsensors zu ermitteln, werden Testsysteme entworfen. Diese sind in einem Layout gehalten, welches einem zukünftigen kombinierten Heißfilm- und Drucksensor entsprechen könnte und zusätzlich Abstandsmarkierungen direkt auf dem Sensor enthält. Die Markierungen dienen

zur Unterstützung bei der späteren Auswertung von Bildern mittels einer Thermografiekamera. Das beschriebene Testlayout mit einer Breite von 21,5 mm und einer Länge von 9 mm wird in **Abbildung 4** gezeigt.

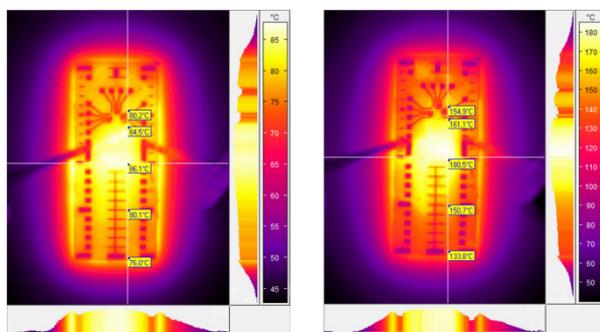


**Bild 4** Layout für thermische Tests des Heißfilmsensors

Gefertigt werden diese Testsysteme aus beidseitig polierten Silizium-Wafern vom Typ 4" N Prime. Auf diese wird eine Goldschicht mit einer Chromhaftschiicht gesputtert und Fotolack maP-1215 aufgeschleudert. Dieser wird belichtet und strukturiert, sodass danach Gold und Chrom mit den entsprechenden Ätzlösungen strukturiert werden können. Vor dem abschließenden Vereinzeln mittels der Wafersäge wird ein Schutzlack aufgebracht. Dieser wird nach dem Sägen mittels Aceton entfernt.

Der Versuchsstand zum Ermitteln der thermischen Umgebung besteht aus den folgenden Elementen. Ein Konstanter wird zur Versorgung des Heißfilms genutzt. Die Kontaktierung erfolgt an den in **Abbildung 4** dargestellten Kontaktpads des Heißfilms mit Hilfe von Kontaktnadeln, die über Manipulatoren justiert werden. Die Temperatureaufnahme erfolgt mit Hilfe einer Thermografiekamera. Als Unterlage wurde anfangs ein Stück Polymethylmethacrylat (Plexiglas) mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{PMMA} = 0,20 \text{ W/mK}$  genutzt, die in guter Näherung der des Tragflächenverbundwerkstoffes entspricht [5]. Die Umgebungstemperatur wird von der Thermokamera automatisch mit ermittelt und betrug während der Messungen zwischen 22 °C und 25 °C.

In **Abbildung 5** sind zwei der aufgenommenen Thermografiebilder dargestellt.



a)

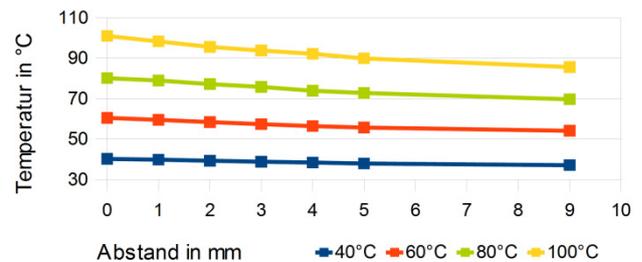
b)

**Bild 5** Thermografiebild des Testlayouts a) bei 86 °C, b) bei 180 °C Heißfilmtemperatur

Da Silizium für elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich (Wellenlängen von 5-15 μm) sehr durchlässig ist, sind auf den Bildern in **Abbildung 5** nicht die Temperaturen des Siliziums, sondern überwiegend die Temperaturen des Untergrundmaterials Plexiglas zu sehen. Dieses hat eine Emissivität von 0,85, was bei der Auswertung auch berücksichtigt wurde. Die Goldstrukturierung und somit die Maßangaben sind aufgrund der geringeren Emissivität von Gold mit 0,02 zu Silizium mit ca. 0,3 gut zu erfassen [6].

Es ist zu erkennen, dass der Heißfilm die Auflagefläche unter dem Sensor und damit auch den kompletten Siliziumsensor stark erwärmt. Dieses war aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Silizium zu erwarten. Die Maximaltemperatur liegt in **Abbildung 5 a** direkt um den Heißfilm bei 86 °C, in 5 mm Entfernung vom Heißfilm bei 80 °C und am unteren Rand des Sensors in 10 mm Entfernung bei 76 °C. Somit ist eine Temperaturdifferenz von ca. 10 °C auf 10 mm gegeben. In **Abbildung 5 b** sind die entsprechenden Verläufe bei einer Heißfilmtemperatur von 180 °C zu sehen. Hier fällt die Temperatur in 1 mm Entfernung vom Heißfilm auf 134 °C ab. Es ist eine Temperaturdifferenz von 34 °C auf 10 mm gegeben. Die Temperatur auf dem Chip direkt um den Heißfilm liegt sehr nahe an der Heißfilmtemperatur, sodass dieser ohne Markierungen nicht exakt im Bild der Thermokamera auszumachen ist. Bei Betrachtung der Widerstandspositionen des Drucksensors liegt zwischen den Messpunkten unter und über den Widerständen eine Temperaturdifferenz von mehr als 4 °C (**Abbildung 5 a**) bzw. 8 °C (**Abbildung 5 b**) vor. Zu beachten ist die Durchführung der Versuche mit in freier Konvektion befindlicher Luft als Fluid. Die übertragene Wärmemenge vom Siliziumchip an das Fluid wird in einem bewegten Fluid mit höherer Dichte vergrößert werden, sodass sich der Temperaturabfall über den Chip erhöht.

Auf den mit Hilfe der Thermokamera erstellten Bildern sind anhand der Maßmarkierungen Temperaturmesspunkte festgelegt worden. In **Abbildung 6** ist der Temperaturverlauf an dem Silizium-Chip in Abhängigkeit von dem Abstand zum Heißfilm in ausgewählten Temperaturstufen aufgetragen. Der Heißfilm wird hierfür jeweils auf den angegebenen Wert erhitzt und die Temperatur konstant gehalten.

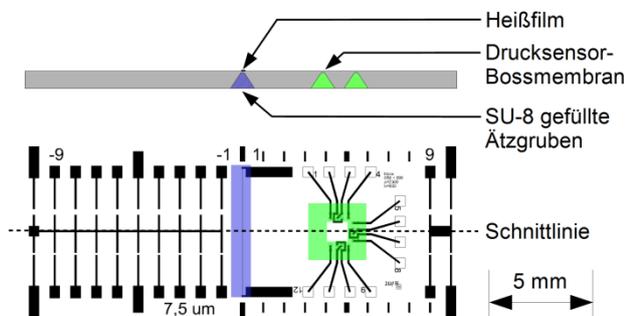


**Bild 6** Substrattemperatur über Abstand bei unterschiedlichen Heißfilmtemperaturen

Die Temperatur fällt aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Silizium über eine Entfernung von 9 mm zum Heißfilm nicht sehr stark ab und liegt somit auch im Außenbereich des Chips noch nahe an der Heißfiltemperatur. Diese Messwerte werden als Referenz für spätere Messungen genommen werden, bei denen die Wirkung einer Isolation des Heißfilms überprüft werden soll.

## 4 Isolation des Heißfilmes

Um den Heißfilm gegenüber dem Substrat zu isolieren und gleichzeitig der Forderung einer möglichst ebenen Oberfläche Rechnung zu tragen, wurde ein neues Isolationskonzept entworfen und getestet. Üblicherweise wird der Heißfilm direkt auf ein Substrat mit geringer Wärmeleitfähigkeit aufgebracht oder es wird zwischen Heißfilm und Substrat eine Zwischenschicht eingeplant. Im folgenden Fall wird der Heißfilm direkt auf einer dünnen Membran des Substrates appliziert, die aus Stabilitätsgründen unterfüllt ist mit einem Polymer (siehe **Abbildung 6**).



**Bild 6** Wandschubspannungssensor mit SU-8 gefüllten Grabenstrukturen

Die Messungen an den Prototypen mit diesem Isolationskonzept haben ergeben, dass eine Membran von 20 µm Dicke den Wärmestrom vom Heißfilm in das Substrat nicht hinreichend stark reduziert. Daher muss die Membrandicke in noch folgenden Versuchen weiter verringert werden.

## 5 Ergebnisse und Ausblick

Am IMT wird derzeit ein neuartiger mikrotechnischer Strömungssensor entwickelt. Hierbei gilt, es, die bei der Integration von Wandschubspannungssensor und Drucksensor auftretenden möglichen gegenseitigen Beeinflussungen im Vorfeld zu charakterisieren, um weiterführende Erkenntnisse für den Designprozess zu entwickeln. Hierfür wurde zunächst untersucht, ob das Ausgangssignal der Messbrücken des Drucksensors im unbelasteten Zustand der Membran einer Temperaturabhängigkeit unterliegt. Es wurde festgestellt, dass die Ausgangsspannung der Messbrücken über einem Temperaturbereich von 10 K in einem Wertebereich von 0,06 % der Versorgungsspannung variiert. Da sich jede Widerstandsbrücke

aufgrund von geringsten Fertigungsungenauigkeiten unterschiedlich verhält, wird daher bei der Auswerteelektronik auch auf eine Kalibrierung hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit geachtet werden.

Die Charakterisierung der Wärmeausbreitung um den Wandschubspannungssensor hat die Kenntnis des status quo ermöglicht, von dem aus mögliche Isolationsvarianten auf ihre Wirksamkeit untersucht werden können. Zudem liegt zwischen den einzelnen Widerständen der Messbrücken eine Temperaturdifferenz von 4 °C und mehr. Dies kann wie in Abschnitt 2 ermittelt die Ausgangsspannungen und somit die Messgenauigkeit beeinflussen, weshalb eine Kalibrierung der Auswerteelektronik bzgl. der Temperaturabhängigkeit und eine Messung der Temperatur on-chip umso wichtiger ist.

Zudem wurden verschiedene rückseitige Isolationsmethoden getestet. Ziel war es, den Wärmestrom in Richtung der Siliziummembran zu verringern, ohne dabei die Ebenheit der Oberfläche des Sensors zu reduzieren. Diese Tests haben allerdings nicht zu einer starken Reduzierung des Wärmestromes geführt, sodass hier in Zukunft weitere Entwicklungen geplant sind.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 880 „Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge“ im Teilprojekt B2 „Adaptive Systeme für die Strömungserfassung und -beeinflussung“.

## 7 Literatur

- [1] T. Beutel, M. Leester-Schädel, P. Wierach, M. Sinapius and S. Büttgenbach; Novel Pressure Sensor for Aerospace Purposes; Sensors & Transducers Journal (ISSN 1726-5479), Vol.115, Issue 4, April 2010; pp. 11-19, 2010.
- [2] M. Leester-Schädel, T. Beutel and S. Büttgenbach; Entwicklung eines Herstellverfahrens für die rückseitige, elektrische Kontaktierung von mikrotechnischen Membran-Sensorelementen; MST Kongress, 2008.
- [3] Krah, T.; Büttgenbach, S.: Silicon styluses for the Use in Micro Metrology. 6th International Workshop on Micro-factories, 2008.
- [4] Phataralaoaha, A.: Entwicklung piezoresistiver taktile Sensoren für die Charakterisierung von Mikrokomponenten. Dissertation, TU Braunschweig, Shaker Verlag, 2009.
- [5] Hewitt, G. F. (editor): Heat Transfer 1994, Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference, Brighton, United Kingdom, Vol. 6, S. 316, 1994.
- [6] Sopori, B.; Chen, W.; Madjdpour, J.; Ravindra, N.: Calculation of emissivity of Si wafers; Journal of Electronic Materials, Vol. 28, No. 12, pp. 1385-1389, DOI: 10.1007/s11664-999-0126-7, 1999.