



# Abschlussbericht

(Kurzfassung)

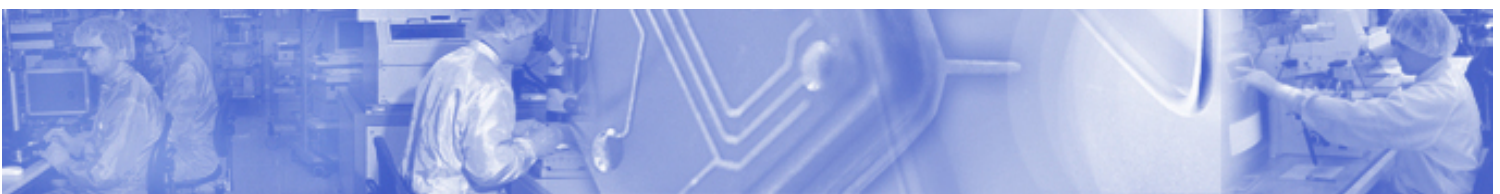
Integration von thermischen Sensoren und  
Kühlelementen auf einer Silizium-N-Membran

AiF-Vorhaben-Nr: 15051 BG

Projektlaufzeit: 01.12.2006 – 31.05.2009

Verfasser: Hartmut Glosch

Der vollständige Bericht kann von Interessenten angefordert werden.



## Forschungsziel

Ziel des Projektes war die technologische Integration von Membrankühlung, Membranheizung und Temperaturmessung auf einem Chip, um neue Einsatzgebiete für die thermischen Sensoren zu erschließen. Neu bedeutet in diesem Falle sowohl technisch neuartige Anwendung als auch Anwendungen bei denen die Preisvorgabe nur durch die monolithische Integration der Elemente auf einem Chip einzuhalten ist. Folgende Technologien müssen kombiniert werden:

1. Thermische Sensortechnologie des HSG-IMIT
  - Sensorstruktur auf SiN-Membran
  - Heizstrukturen aus Poly-Si
  - Thermopile aus Poly-Si und Alu als Temperatursensoren
  - Funktionsweise: Detektion des Antwortsignals des Thermopile auf einen Heizimpuls (Bsp.: Flowsensor, Taupunktsensor, Messung von Gaseigenschaften, ..)
2. Thermische Sensortechnologie des IPHT Jena
  - Sensorstruktur auf SiN-Membran
  - Thermopile aus BiSb-BiSbTe als Temperatursensoren
  - Funktion: passiver Sensor, der die Erwärmung der Membran z.Bsp. durch IR-Strahlung misst

In der vorgeschlagenen Kombination der beiden Technologien wird die Technologie des IPHT allerdings nicht als Sensor sondern zu Membrankühlung eingesetzt. Dies ist möglich, da die Thermopiles sowohl als Sensoren (Seebeckeffekt – Spannungserzeugung durch Temperaturdifferenzen an den Kontaktstellen) als auch als Aktoren (Peltiereffekt – Temperatur-Differenzen an den Kontaktstellen durch Stromfluss) benutzt werden können, allerdings nur wenn die thermoelektrische Effektivität der verwendeten Materialpaarung groß genug ist. Mit der am HSG-IMIT verwendeten Paarung aus Poly-Si und Alu lassen sich aufgrund der geringen thermoelektrischen Effektivität keine brauchbaren Temperaturdifferenz erzielen, sehr wohl aber mit der am IPHT in Jena eingesetzten Materialpaarung BiSb-BiSbTe. Demonstriert werden sollte die Technologieintegration an einem Taupunktsensor.

Vorteile des neuartigen integrierten Taupunktsensors gegenüber einer hybriden Lösung:

- Verringerung der Kühlleistung um Faktor 30, da ausschließlich die Membran gekühlt wird (Temperaturdifferenz von 20°C kann durch ca. 3 mW elektrischer Leistung erzielt werden)
- Beschleunigung der Signalaufnahme, da die thermische Kapazität der Kühlung extrem verkleinert wird (anstatt externes Peltierelement nur noch die Kühlstrukturen auf der Membran)
- Hermetische Kapselung des Systems durch verwendete Standardtechnologien zum Schutz des Sensors.

## Zusammenfassung

### Auslegung und Effektivität der Kühlstrukturen

Ausgehend von vorliegenden Ergebnissen am IPHT im Bereich der Infrarotsensorik wurden zunächst Simulationen zur Auslegung und Effektivität der benötigten Kühlerstrukturen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es mit der am IPHT zur Verfügung stehenden Dünnschichttechnologie zur Herstellung von BiSb/BiSbTe-Thermopiles möglich ist, Kühlstrukturen zu erstellen die eine partielle Abkühlung der Sensormembrane um bis zu 56°C ermöglichen. Aber auch mit der weniger effektiven Paarung BiSb/Sb können 15°C erreicht werden. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde ein Testlayout entwickelt und hergestellt um verschiedene Parameter wie Kühlstruktur und Membrangröße mit der Simulation abzustimmen.

#### 1. Paarung BiSb/Sb

Die Simulationsergebnisse konnten trotz erhöhter Kontaktwiderstände gut nachgewiesen werden (Abkühlung der Membran um bis zu 10°C). Durch Prozessbesserungen können bis zu 15°C erreicht werden.

## 2. Paarung BiSb/BiSbTe

Die Ergebnisse der effektiveren Paarung BiSb/BiSbTe waren leider negativ. Es traten eine Reihe nicht erwarteter technologischer Probleme auf:

- Mikrorissbildung bei dickere Schichten (ab ca. 3  $\mu\text{m}$ )
- Hoher Kontaktwiderstand der die gute Kühlleistung durch Joul'sche Wärme wieder zunichte macht
- Unsichere Kontakte (zeitliche Veränderung)

Aufgrund der guten Ergebnisse der Paarung BiSb/Sb und der technologischen Probleme bei der Verwendung der Paarung BiSb/BiSbTe wurde entschieden im weiteren Projektverlauf die sichere Lösung weiterzuverfolgen.

### Technologieabstimmung

Aus den vorangegangenen Einzelschritten wurde ein Gesamtprozess entworfen. Dabei musste besonders das Temperaturbudget der Einzelprozesse abgestimmt und angepasst werden. Die Festigkeit der bisher verwendeten SiN-Membran war für den Gesamtaufbau zu gering. Durch Prozessverbesserungen konnte die Festigkeit deutlich gesteigert werden. Die SiN-Membran hält jetzt Druckstöße bis 5 bar problemlos aus.

### Layout und Technologiedurchlauf

Um den Sensor als Taupunktsensor einsetzen zu können, muss die Absoluttemperatur gemessen werden können. Hierzu wird üblicherweise eine auf dem Sensorrahmen implantierte Diode verwendet. Da weder das HSG-IMIT noch das IPHT über die Prozesse zur Herstellung einer Diode verfügen, wurde diese am CIS in Erfurt hergestellt. Für den Gesamtablauf Diode – thermischer Sensor – integrierter Kühler wurde am HSG-IMIT ein Layout mit 16 Masken entworfen. Im Projekt wurden in zwei Durchläufen insgesamt 24 Wafer prozessiert.

Abb. 1 zeigt einen Mustersensor mit integrierter Temperaturdiode. Gut zu erkennen ist die „dicke“ Zuleitung zu den Kühlstrukturen auf der Membran um den Widerstand der Leitungen zu den Kühlstrukturen so gering wie möglich halten um dadurch unnötige Produktion Joul'scher Wärme zu verhindern. Abb. 2 zeigt den Detailausschnitt der Sensormembran. Unter der schwarzen Kühlschicht ist sehr gut die zentrische Anordnung der Thermopilestruktur zu erkennen.

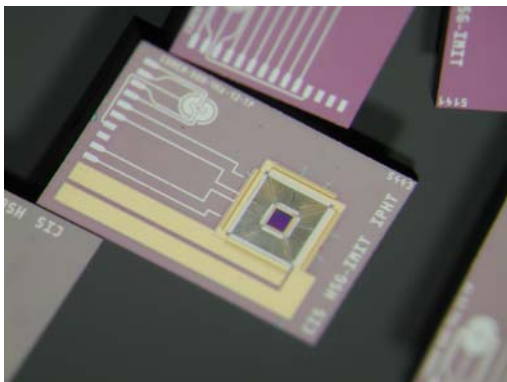


Abb. 1 Mustersensor mit Kühlstrukturen

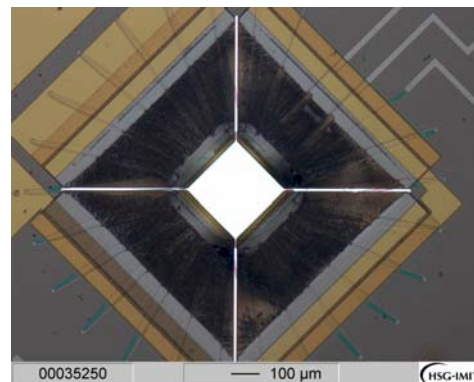


Abb. 2 SiN-Membran mit Kühl- Sensorstrukturen

### Ergebnisse der Mustersensoren

Auch im finalen Durchlauf stellte sich der Kontaktwiderstand als größtes Problem dar.

Da für die Mustersensoren nur die Paarung BiSb-Sb verwendet wurde war klar, dass die maximal erzielbare Temperturdifferenz  $< 10^{\circ}\text{C}$  liegen würde. Für einen Funktionsnachweis war dies aber ausreichend.

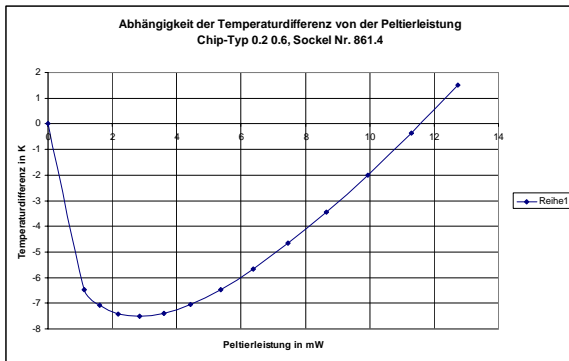


Abb. 3 Verlauf Membrantemperatur

Abb. 3 zeigt exemplarisch den Verlauf einer Temperaturkurve über dem angelegten Peltierstrom. Wie aus der Simulation erwartet, liegt die optimale Peltierleistung im Bereich weniger mW. Die maximal gemessene Temperaturdifferenz lag bei ca. 7,5 °C.

Parallel zur Bestimmung der Temperaturabsenkung auf der Membran wurde die Signalcharakteristik untersucht. Im Unterschied zu dem am HSG-IMIT entwickelten hybriden Taupunktsensor befindet sich die Kühlstruktur direkt auf der Membran. Sie stellt eine zusätzliche parasitäre Wärmekapazität dar, die im schlimmsten Fall das speziell für die thermischen Taupunktsensoren entwickelte thermische

Detektionsverfahren unbrauchbar machen könnte. Für diese Versuche wurde ein externer Kühler verwendet, da die zum Zeitpunkt der Messung zur Verfügung stehenden Muster aufgrund eines zu hohen Kontaktwiderstand nicht voll funktionsfähig waren. Wie erwartet war die Betauung der Membran sehr gleichmäßig (Abb. 4). Grund dafür ist die gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Membran durch die Kühlstrukturen. Trotz der zusätzlichen thermischen Kapazität konnte auf Anrieb die Betauung mit dem bisherigen Detektionsverfahren festgestellt werden (Abb. 5).

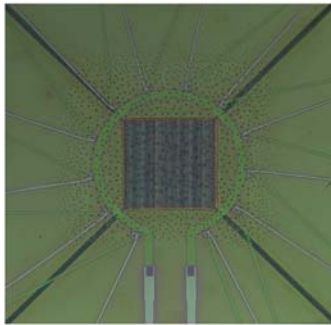


Abb. 4 betaute Membran

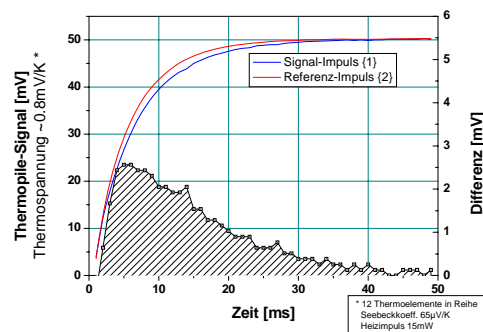


Abb. 5 Signalverlauf

## Ausblick

Prinzipiell konnte nachgewiesen werden, dass die Kombination der beiden beschriebenen Technologien zu einem funktionsfähigen Sensor führt. Allerdings waren die auftretenden Probleme größer als erwartet. Um ein sicher funktionsfähiges System herzustellen bedarf es noch weiterer Prozessentwicklungen, deshalb ist der direkte Einsatz der Technologie in Produktentwicklungen für industrielle Kunden verfrüht.

Können die noch bestehenden Probleme gelöst werden, steckt in der beschriebenen Technologie ein nicht unerhebliches Potential. Die Beispiele ergeben sich zum Teil schon aus der Antragsformulierung, zum anderen Teil gibt es neue Erkenntnisse aus Anforderungen von Kunden an einen Taupunktsensor. Die Taupunktmessung verlangt in vielen Fällen einen Taupunktstand von > 60°C. Diesem Umstand tragen die Taupunktspiegelhersteller Rechnung, indem sie mehrstöckige Peltierelemente einsetzen. Dies führt dann aber zu einem deutlich höheren Energiebedarf. Beim Taupunktspiegel kann das vielleicht noch akzeptiert werden, gerade aber ein mikrotechnischer Taupunktsensor sollte deutlich geringere Verbrauchswerte aufweisen. Versuche mit dem mikrotechnischen Taupunktsensor unter Verwendung eines doppel-stöckigen Peltierelementes zeigen, dass man den Leistungsbereich von 1W elektrisch (1-stufiges Element) auf ca. 5-8 W (2-stufiges Element) aufstocken muss und dies nur um die zusätzliche Wärme des zweiten Peltierkühlers abführen zu können. Die Messungen im laufenden Projekt haben gezeigt, dass für die maximale Membranabkühlung aber nur eine Leistung im mW-Bereich notwendig ist. Diese geringe Zusatzleistung würde selbst der kleinste zur Verfügung stehende Peltierkühler locker verkraften.

## **Durchführende Forschungsstellen**

### **Forschungsstelle 1**

Institut für Mikro- und Informationstechnik  
der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.  
HSG-IMIT  
Wilhelm-Schickard-Straße 10  
78052 Villingen-Schwenningen  
[www.hsg-imit.de](http://www.hsg-imit.de)

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr. Holger Reinecke  
Prof. Dr. Yiannos Manoli  
Prof. Dr. Roland Zengerle

### **Projektleiter:**

H. Glosch

### **Forschungsstelle 2:**

IPHT-Jena  
Albert-Einstein-Str. 9  
07745 Jena

### **Leiter der Forschungsstelle:**

Prof. Dr. Jürgen Popp

### **Projektleiter:**

Dr. Keßler

## **Förderhinweis**

Das Forschungsvorhaben (15051 BG) der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft wurde im Programm zur Förderung der "Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AIF finanziert.