

# Herstellung eines piezoresistiven Drucksensors aus Siliziumcarbid mittels reaktiven Ionenätzen

Piotr Mackowiak<sup>1</sup>, Kolja Erbacher<sup>1</sup>, Manuel Bäuscher<sup>1</sup>, Katrin Höppner<sup>1</sup>, Michael Schiffer<sup>1</sup>, Ha-Duong Ngo<sup>1</sup>, Martin Schneider-Ramelow<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer IZM, Berlin, Deutschland, piotr.mackowiak@izm.fraunhofer.de

<sup>2</sup>Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

## Kurzfassung

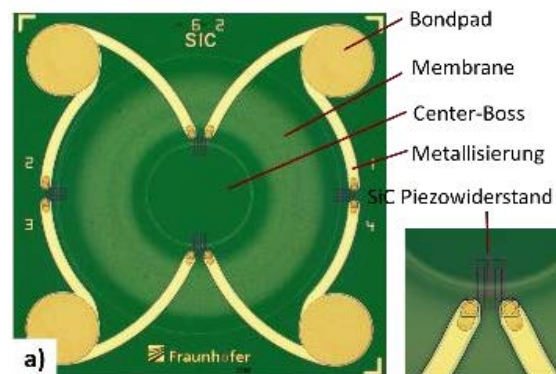
In diesem Paper wird die Herstellung eines piezoresistiven Drucksensors aus Siliziumcarbid (SiC) beschrieben. Der Sensor verfügt über eine für hohe Temperaturen geeignete Metallisierung auf Goldbasis und wurde auf einem 100 mm 4H-SiC-Wafer mit einer doppelten Epitaxieschicht hergestellt. Dabei werden aus der oberen Epitaxieschicht mittels reaktiven Ionenätzen (RIE) die Piezowiderstände strukturiert. Die untere Epitaxieschicht ist der oberen entgegengesetzt dotiert und bildet somit eine Isolationsschicht durch einen pn-Übergang. Die Membran wurde mit einem angepassten RIE Prozess hergestellt, mithilfe dessen Ätzraten von bis zu 4 µm/min erreicht wurden.

## 1 Einleitung

Mikrosensoren aus Silizium (MEMS) sind bereits seit vielen Jahren in einer Vielzahl von Anwendungen etabliert und sind ausgereift. Die Eigenschaften von Silizium ermöglichen es Sensoren einer großen Bandbreite herzustellen. Insbesondere die mechanische Strukturierbarkeit von Silizium mittels anisotropen Ätzens ermöglicht sichere und kosteneffiziente Bearbeitung von Silizium. Auch die weiteren Bearbeitungsschritte sind über die Zeit optimiert worden, was die Sensoren effizienter machte und zu ihrem Erfolg beitrug. Sensoren aus Silizium haben jedoch aufgrund der Eigenschaften von Silizium physikalische Einschränkungen, die technologisch nur sehr eingeschränkt überwunden werden können. So ist aufgrund der geringen Durchbruchfeldstärke und des geringen Bandabstandes ein Einsatz bei Temperaturen bis ca. 180°C möglich. Überschreitet man diese Temperatur, können Leckströme beobachtet werden, welche die Sensitivität des Sensors einbrechen lassen.

Gegenüber Silizium hat Siliziumcarbid eine Vielzahl von physikalischen Eigenschaften die überlegen sind und damit den Einsatz in rauen Umgebungen ermöglicht. Dabei versteht man unter rauen Bedingungen, Einsatzgebiete hohe Temperaturen, hoher Druck, extreme Erschütterungen, starke elektrische Felder oder Umgebungen mit chemisch aggressiven Medien, wie sie bei der Prozesskontrolle, der Öl- und Gasförderung, in der Luft- und Raumfahrtindustrie auftreten.

Siliziumcarbid hat sich als das Material, dass für mechanische Messgrößen gegenüber anderen Wide Bandgap Materialien wie Zinkoxid (ZnO), Aluminiumnitrid (AlN) oder Galliumnitrid (GaN) die größte Beachtung gefunden [3-7], da es aufgrund der niedrigen dielektrischen Konstante geringem Leckstrom, aufgrund der hohen Durchbruchfeldstärke, der hohen thermischen Leitfähigkeit und der chemischen Inertheit günstige Eigenschaften in sich vereint. Die überlegenen Eigenschaften von SiC und seine Stabilität bei hohen Temperaturen bieten neue Möglichkeiten für die Entwicklung von MEMS-Bauteilen für solche anspruchsvollen Anwendungen.

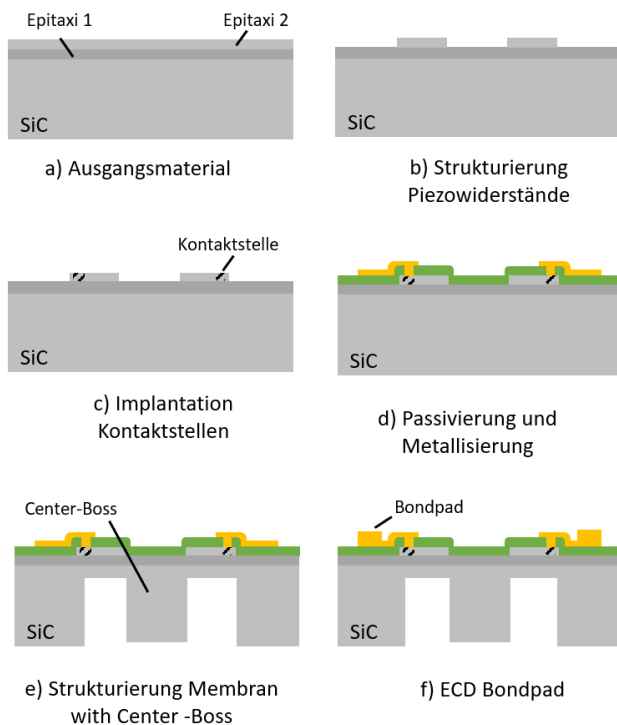


**Abbildung 1:** Draufsicht auf den SiC Sensor mit den zu einer Wheatstonebrücke verschalteten Piezowiderständen (a) und die Schrägbildaufnahme der RIE strukturierten Waferrückseite.

Im Folgenden wird die Herstellung eines piezoresistiven Drucksensors aus 4H Bulk SiC beschrieben.

### 1.1 Herstellung des Drucksensors

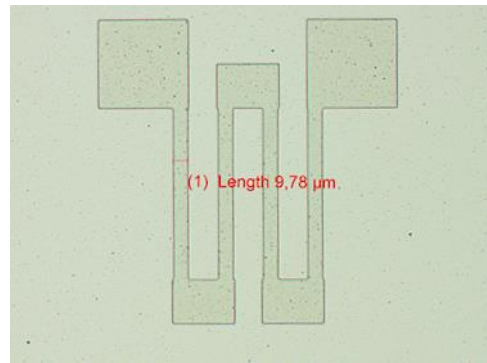
Für die Herstellung der 4H-SiC-Drucksensoren wurden Wafer mit zwei epitaktisch aufgewachsenen SiC-Schichten verwendet. Beim Wachstumsprozesses können die epitaktischen Schichten in ihrer Dicke und Dotierungskonzentration sehr gut definiert werden, was für die gezielte Auswahl des Schichtwiderstandes in der sensitiven Schicht entscheidend ist, da dieser die Eigenschaften wie z.B. die Empfindlichkeit entscheidend beeinflusst. Während die oberste Epitaxieschicht zur Herstellung der Piezosensoren verwendet wurde, dient die darunter liegende Schicht als Sperrschicht, da sie im Vergleich zur ersten Epitaxieschicht entgegengesetzt dotiert ist. Der SiC-Wafer ist n-leitend und hat eine Dicke von 350 µm. Die erste Epitaxieschicht ist vom p-Typ mit einer Dotierungskonzentration von  $3 \times 10^{17}$  at/cm<sup>3</sup> und einer Dicke von 12 µm. Die zweite Epitaxieschicht, die später die Piezowiderstände bildet, hat eine Dicke von 1,3 µm und eine Dotierungskonzentration von  $1 \times 10^{18}$  at/cm<sup>3</sup>. Die Sensorabmessungen betragen 3,1 mm



**Abbildung 2:** Schematischer Prozessablauf der Herstellung des SiC-Drucksensors.

x 3,1 mm, die Membran ist 2,4 mm groß und hat eine 800 µm breite Mittelstruktur (Center Boss).

Aufgrund der chemischen Inertheit von SiC ist die Strukturierung eine der größten Herausforderungen bei der Herstellung der Bauelemente. Der vorgestellte Drucksensor wurde während des Herstellungsprozesses zweimal trocken geätzt. Die erste Ätzung wurde von der Vorderseite durchgeführt, um die erste obere EPI-Schicht zu strukturieren und die doppelt gefalteten Piezowiderstände zu bilden (vgl. Abbildung 2b und 3). Diese Schicht ist nur 1,3 µm dick und erfordert daher einen sehr kontrollierten und gleichmäßigen Ätzprozess. Eine Lackmaske konnte nicht verwendet werden, da sie dem Ätzen von SiC nicht standhält. Daher wurde Aluminium auf die Waferoberfläche gesputtert und mittels Standardlithografie und nasschemischem Ätzen in einer Phosphorsäurelösung strukturiert. Das strukturierte Aluminium wurde als Hartmaske für das anschließende reaktive Ionenätzen der Piezowiderstände verwendet. Da potentielle n-SiC Rückstände der oberen Epitaxieschicht Kurzschlüsse zwischen den Piezowiderständen verursachen würden, musste sichergestellt werden, dass die obere Epitaxieschicht sicher durchätzt wird. Daher wurden fast 20 % der Dicke der ersten 1,3 µm dicken Epitaxieschicht in die zweite Epitaxieschicht, die 12 µm dick ist, überätzt. Die Entfernung der Hartmaske erfolgte wiederum in einer phosphathaltigen Säure. Die erreichte Ätztiefe betrug 1,62 µm in der Mitte und 1,63 µm am Rand des Wafers, was einer Ätztiefenschwankung von unter 1% bzw. ca. 10 nm über den gesamten 4" Wafer entspricht. Die erreichte Ätzrate betrug 750 nm/min. Abbildung 3 zeigt den strukturierten Piezowiderstand.

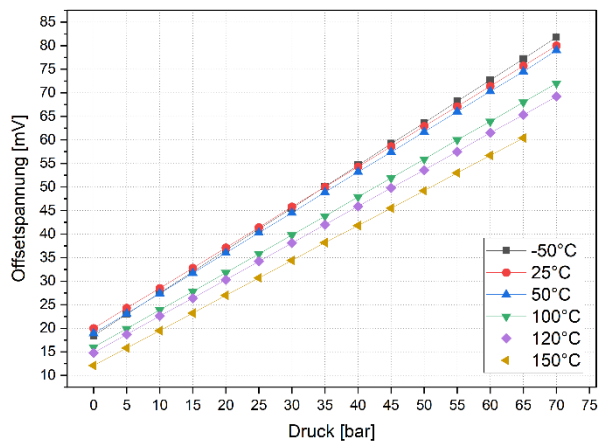


**Abbildung 3:** Strukturierter Piezowiderstand in der ersten Epitaxieschicht nach dem nasschemischen Entfernen der Aluminiumhartmaske.

Für die Maskierung der Kontaktimplantation wird eine Standardlithographie verwendet. Die implantierten Bereiche umfassen die beiden elektrischen Kontakte jedes Piezowiderstands sowie die drei Verbindungsstellen, die die vier Beine der gefalteten Piezowiderstände miteinander verbinden (siehe Abbildung 3). Die Implantation wurde am Fraunhofer IISB, Erlangen, Deutschland, durchgeführt. Nach dem Entfernen der Maske in einer heißen  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  Ätzlösung wurden die Wafer getempert, um die implantierten Dotierstoffe elektrisch zu aktivieren und Gitterschäden zu beseitigen. Das Tempern erfolgte bei einer Temperatur von 1650 °C für 15 Minuten. Anschließend wurde eine 1 µm dicke Siliziumoxidschicht durch PECVD bei 175 °C abgeschieden, um eine Isolationsschicht auf der Oberfläche zu bilden. Diese wurde über dem Kontaktbereich der Piezowiderstände strukturiert, um den ohmschen Kontakt zu bilden. Ein ohmscher  $\text{TiSi}_2$ -Kontakt wurde durch Sputtern einer dünnen Ti/TiWN-Schicht und anschließendes schnelles thermisches Ausglühen hergestellt. Die zweite Plasmaätzung wurde durchgeführt, um die Membran des Sensors zu strukturieren. Die Waferdicke beträgt 350 µm und die gewünschte Membrandicke ist 50 µm. Um SiC 300 µm tief zu ätzen, ist weder eine Oxidmaske-Hartmaske noch eine gesputterte Aluminiumhartmaske geeignet. Die Ätzselektivität einer Oxidhartmaske



**Abbildung 4:** Tief geätzte Membranstrukturen auf der Waferrückseite nach dem Entfernen der Kupferätzmaske



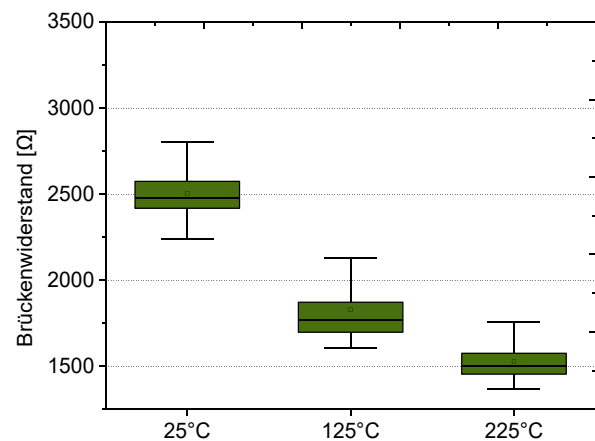
**Abbildung 6:** Offsetspannung für verschiedene Drücke und Temperaturen im Bereich von 50°C bis 150°C.

gegenüber Siliziumcarbid beträgt lediglich 1:2. Metallmasken wie Aluminium, Nickel oder Kupfer weisen eine höhere Selektivität von bis zu 1:30 und mehr auf [2][3]. Für die Herstellung der tief geätzten Membranstrukturen wurde eine Kupferhartmaske verwendet, welche mittels einer semi-additiven, elektrochemischen Abscheidung auf der Waferrückseite aufgebracht wurde. Um den Prozess des reaktiven Ionenätzens von SiC in dieser Tiefe zu entwickeln, wurde ein Modell des Ätzprozesses mit einem DoE-Ansatz (Design of Experiment) entwickelt. Der Prozess wurde verifiziert und die optimalen Parameter für das Ätzen zur Herstellung der Membran verwendet. Die Gleichmäßigkeit der Ätztiefe des Prozesses über den gesamten Wafer betrug 5 %. Die gesamte Ätzzeit zur Erzielung von 300 µm tiefen Kavitäten betrug 172 Minuten, was für den optimierten Ätzprozess eine Ätzrate von 1,7 µm/min ergibt. Die maximal erreichte Ätzrate während der statistischen Versuchsplanung betrug 4 µm/min, wies aber unerwünschte Ätzdefekte auf. Abbildung 4 zeigt einen Teil der Rückseite des strukturierten 100 mm SiC-Wafers nach dem optimierten Ätzprozess. Es konnte eine sehr glatte Ätzoberfläche erhalten werden, was zeigt, dass durch die gewählte Prozessführung Ätzdefekte wie Mikromaskierung und Mikrotrenching nahezu vollständig unterdrückt werden konnten.

## 1.2 Elektrische Charakterisierung

Nach der Herstellung des Sensorwafers wurde eine erste elektrische Messung auf Wafer-Ebene durchgeführt. Um einen guten elektrischen Kontakt zwischen SiC und der Metallisierung zu erreichen, wurde ein Silizidkontakt mit Titan (Ti) als Kontaktmaterial und Titan-Wolfram-Nitrid (TiWN) als Sperrschicht hergestellt. Die Bildung von TiSi<sub>2</sub> wurde mittels Rapid Thermal Annealing (RTA) erreicht. Die Metallisierung des Sensors besteht aus TiWN und Gold (Au), wobei TiWN eine Diffusionsbarriere für das Gold bildet [8].

Für eine erste Charakterisierung wurde die vollständige Wheatstone-Brücke jedes Sensors gemessen. Neben dem



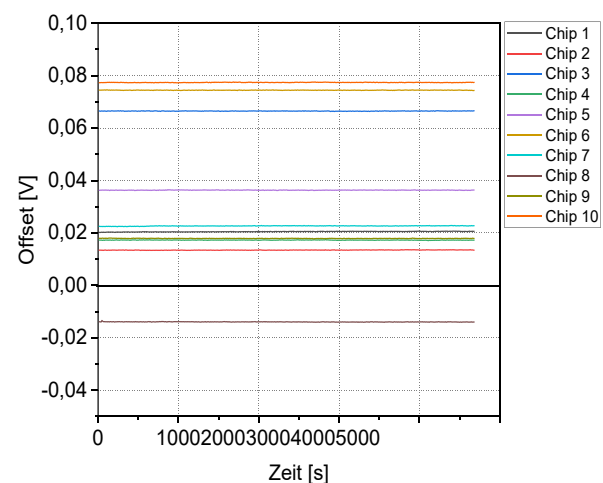
**Abbildung 7:** Brückenwiderstand der Drucksensoren für verschiedene Temperaturbereiche

Offset der Brücke wurden auch der Brückenwiderstand mit einer Vierpunktmessung gemessen sowie das thermische Verhalten der Piezowiderstände untersucht. Der durchschnittliche Brückenwiderstand der 718 Dies auf einem vollen Wafer bei Raumtemperatur (25 °C) betrug 2507 Ω. Dieser Wert entspricht den Erwartungen an den Schichtwiderstand und das Seitenverhältnis der Piezowiderstände (46:1). Der Brückenwiderstand sinkt auf 1829 Ω bei 125 °C und sogar auf 1528 Ω bei 225 °C.

Abbildung 6 zeigt die Brückenwiderstandsverteilung aller Sensoren bei drei verschiedenen Temperatursollwerten (25 °C, 125 °C und 225 °C). Der thermische Widerstandskoeffizient (TCR) wurde mit der folgenden Gleichung berechnet (1)

$$TCR = \frac{1}{R_{T1}} \cdot \frac{R_{T2} - R_{T1}}{T2 - T1} \cdot 100\%$$

Für die Berechnung des TCR wurden drei Temperatursollwerte verwendet: 25 °C, 125 °C und 225 °C. Der TCR wurde von 25 °C bis 125 °C und von 125 °C bis 225 °C berechnet. Bei der ersten Temperatur wurde ein TCR von -0,270 TCR [%/°C] berechnet, während er im zweiten Temperaturbereich -0,195 TCR [%/°C] betrug.



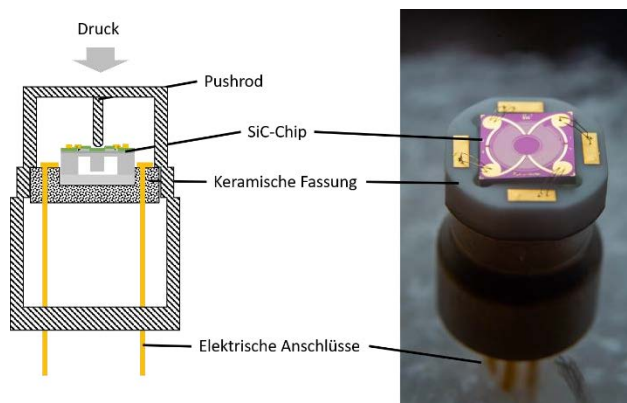
**Abbildung 5:** Langzeitstabilität des Offsets von 10 Chips.



Der unbelastete Offset wurde auf Wafer-Ebene gemessen und zeigt einen Mittelwert von 3 mV. Die Stabilität des Sensorsignals ist sehr gut. Abbildung 7 zeigt die Offset-Werte für 10 Dies, die 4600 s lang gemessen wurden. Nach Abschluss der ersten Messungen auf Wafer-Ebene wurden die Dies auf dem Wafer mittels Blade Dicing einzeln, die Sensoren auf einen Sockel montiert und mittels Ball Wedge Drahtbonden verbunden. Dieser Sockel wurde in ein Druckgehäuse eingeschraubt, das in der Lage ist, einen Druck von bis zu 70 bar auf die SiC-Sensormembran zu übertragen. Um Messungen des Sensors bei verschiedenen Temperaturen durchführen zu können, wurde das Gehäuse mit in einen Ofen gestellt. Im ersten Testaufbau wurden die Sensoren im Bereich von  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einem Druckbereich von 0 bis 70 bar gemessen. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Linearität in diesem Druckbereich und eine Empfindlichkeit von  $859\text{ }\mu\text{V}/\text{bar}$  bei  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 1 mA Versorgungsstrom. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Empfindlichkeit aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Piezowiderstände.

### 1.3 Zusammenfassung und Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Herstellung von Sensoren auf Wafer-Ebene ermöglicht die Serienfertigung für die zukünftige kommerzielle Produktion solcher SiC-basierten MEMS-Sensoren für den Einsatz bei hohen Temperaturen und in rauer Umgebung. Während die Evaluierung auf Wafer-Ebene abgeschlossen ist, wurde die Evaluierung auf Die-Ebene für Temperaturen von bis zu  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgeschlossen. Diese Temperaturgrenze ergibt sich aus dem heute am IZM verfügbaren Druckmessaufbau. Der Aufbau soll ausgebaut werden, um den Drucksensor bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  charakterisieren zu können. In einer ersten Evaluierung wurden Sensorchips 8 Stunden lang bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  in einer Umgebungsatmosphäre gelagert und die Veränderungen an der aufgetragenen Metallisierung beobachtet. Abbildung 9 zeigt die Metallisierung des Drucksensors nach der 8-stündigen Lagerung bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Außer der Oxidation der überlappenden TiWN-Metallisierung an den Rändern der Goldleiterbahnen konnte keine Delamination beobachtet werden, welche ein Hinweis für ein frühen Ausfall des Sensors wäre.



**Abbildung 8:** Ölfreier Sensoraufbau mit Druckübertragung über ein Pushrod

## 2 Literatur

- [1] S. Senturia, "Perspectives on MEMS Past and Future: the Tortuous Pathway from Bright Ideas to Real Products", in Digest Tech. Papers Transducers'03 Conference, Boston, June 8-12, 2003, pp. 10-15.
- [2] K. Erbacher, P. Mackowiak, M. Schiffer, K. -D. Lang, M. Schneider-Ramelow and H. -D. Ngo, "Investigation of Deep Dry Etching of 4H SiC Material for MEMS Applications Using DOE Modelling," 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021, pp. 634-637, doi: 10.1109/MEMS51782.2021.9375268.
- [3] M- Ozgur, M. Pedersen and M. Huff, "Comparison of the Etch Mask Selectivity of Nickel and Copper for a Deep, Anisotropic Plasma Etching Process of Silicon Carbide (SiC)" 2018 ECS Journal of Solid State Science and Technology, Volume 7, Number 2, pp. 55 doi: 10.1149/2.0121802jss
- [4] V. Cimalla, J. Pezoldt, and O. Ambacher, "Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 40, pp. 6386–6434, 2007
- [5] M. Werner and W. Fahrner, "Review on materials, microsensors, systems and devices for high-temperature and harsh-environment applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 48, pp. 249–257, 2001.
- [6] R. G. Azevedo, D. G. Jones, A. V. Jog, B. Jamshidi, D. R. Myers, L. Chen, X. an Fu, M. Mehregany, M. B. J. Wijesundara, and A. P. Pisano, "A SiC MEMS resonant strain sensor for harsh environment applications," IEEE Sensors J., vol. 7, pp. 568–576, 2007.
- [7] M. A. Fraga, H. Furlan, R. S. Pessoa, and M. Massi, "Wide bandgap semiconductor thin films for piezoelectric and piezoresistive MEMS sensors applied at high temperatures: an overview," Microsyst. Technol., vol. 20, pp. 9–21, 2013
- [8] Ngo, H.-D.; Mukhopadhyay, B.; Mackowiak, P.; Kröhnert, K.; Ehrmann, O.; Lang, K.-D. A WSi–WSiN–Pt Metallization Scheme for Silicon Carbide-Based High Temperature Microsystems. Micromachines 2016, 7, 193. <https://doi.org/10.3390/mi7100193>