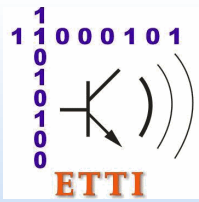




**DCAE**  
DISPOZITIVE, CIRCUITE ȘI  
ARHITECTURI ELECTRONICE



# CIRCUITE DE INTERFAȚARE A SENZORILOR PE SiC ȘI CARACTERIZAREA ACESTORA LA TEMPERATURI ÎNALTE

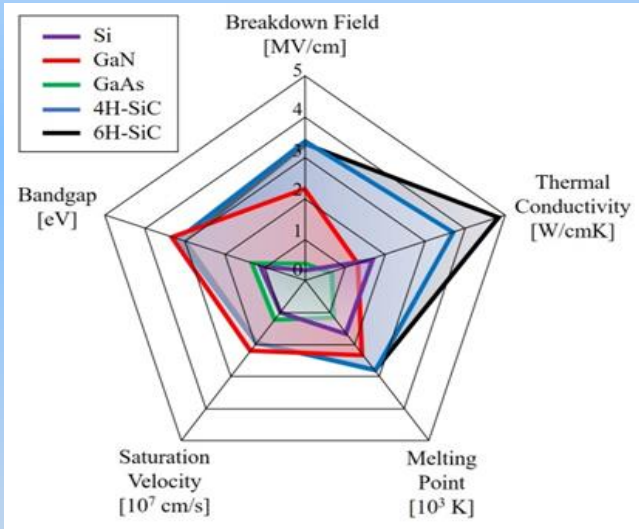
READOUT CIRCUITS AND HIGH TEMPERATURE CHARACTERIZATION OF  
SiC SENSORS

**Florin Drăghici, Florin Mitu**

Universitatea POLITEHNICA din București

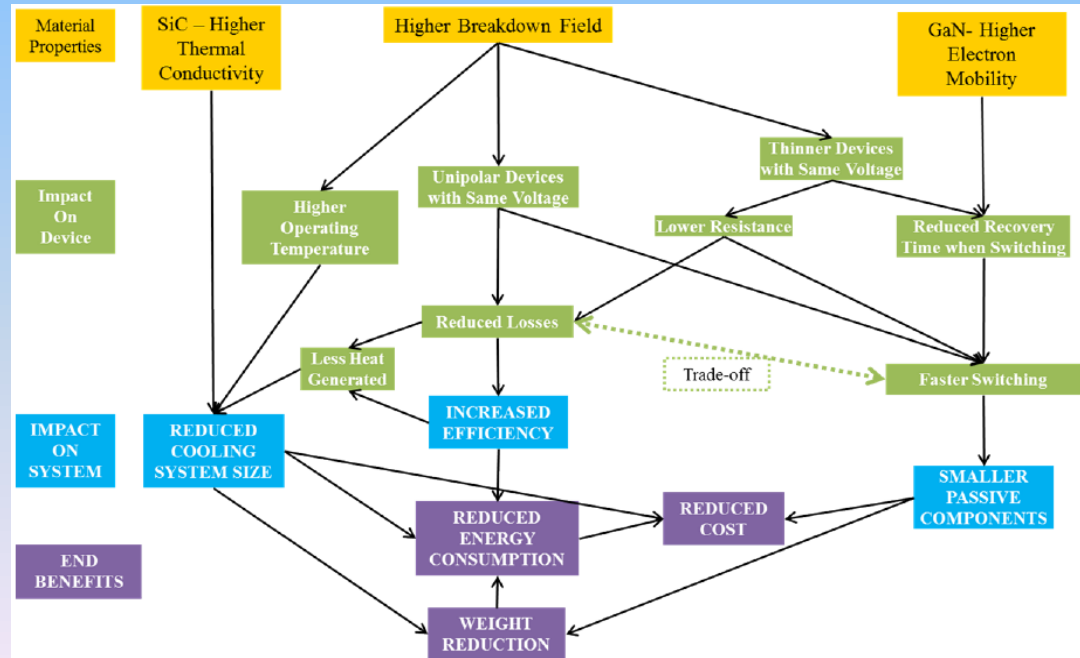
## Semiconductori de bandă interzisă mare

- $E_G > 2\text{eV}$
- Avantaje și proprietăți

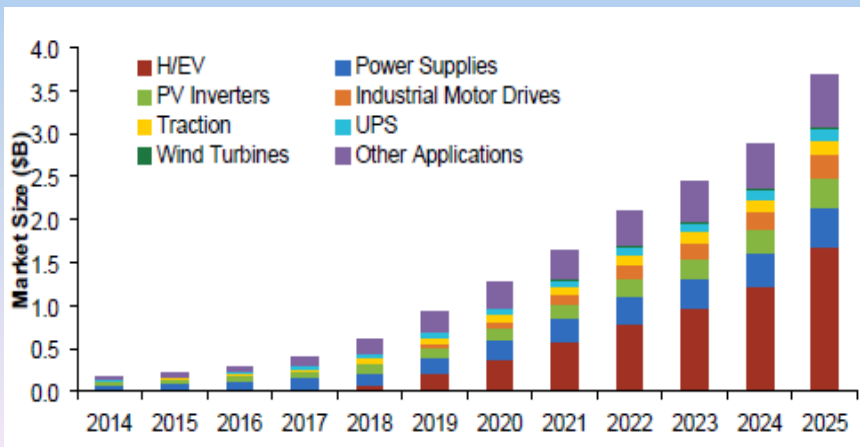
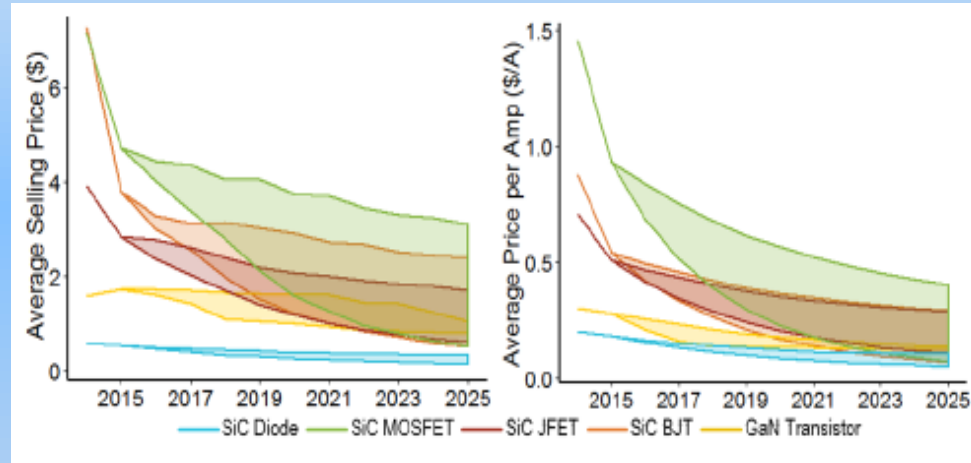
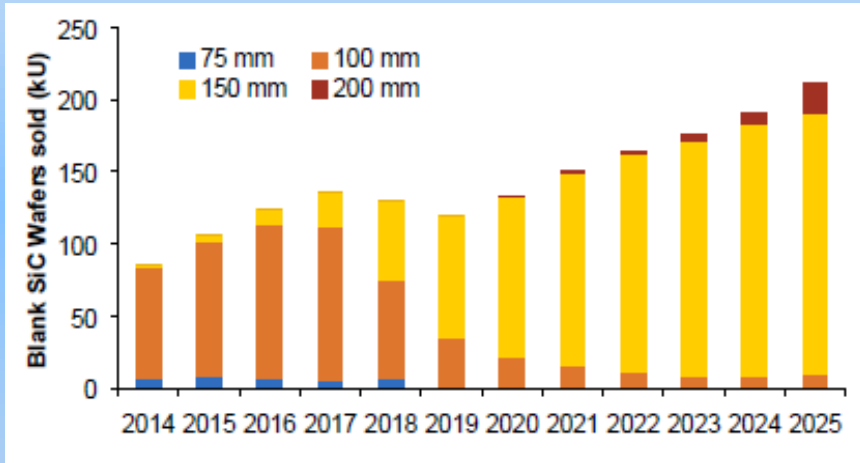


- Carbura de siliciu (SiC), nitrura de galiu (GaN), oxidul de galiu ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ), nitrura de aluminiu (AlN) și diamantul

- Temperaturi de operare ridicate
- Sisteme electronice cu eficiență crescută
- Sisteme de răcire reduse față de cele realizate cu dispozitive pe Si
- Greutate, dimensiuni și costuri reduse



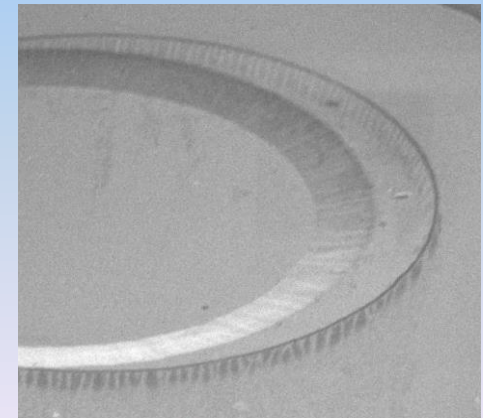
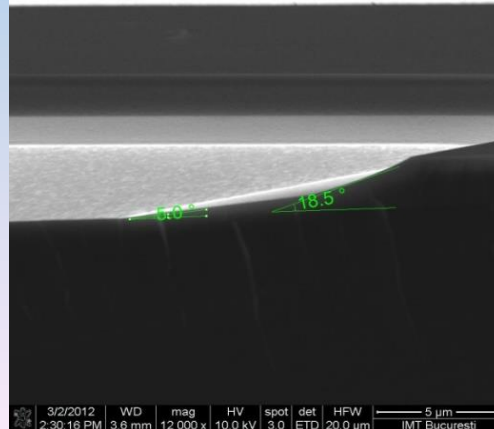
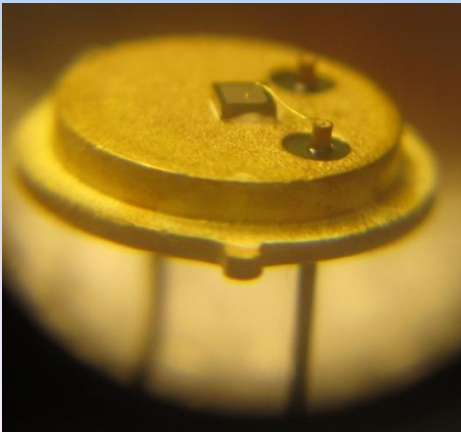
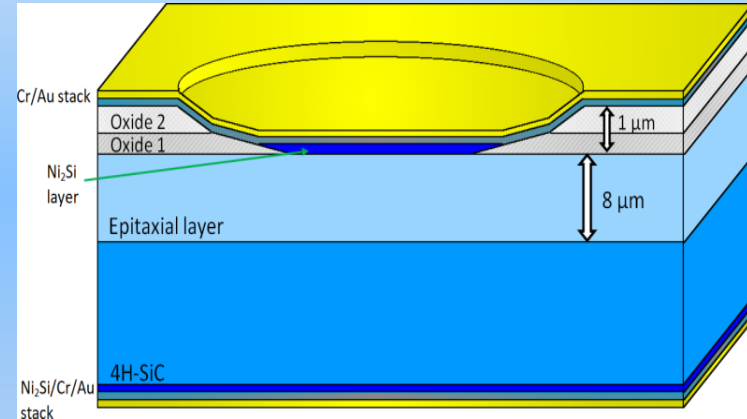
## Semiconductori de bandă interzisă mare



- Tehnologia de obținere a plachetelor de SiC de 6", grad industrial – ajunsă la maturitate în numai câțiva ani
- O scădere a prețului dispozitivelor realizate pe SiC și a prețului mediu pe amper
- Comercializarea de module echipate complet cu dispozitive pe SiC va crește în intervalul 2018-2024 cu un ordin de mărime

## Senzori de temperatură pe SiC

- Utilizați pentru măsurarea temperaturilor ridicate, 400°C
- Diodă Schottky cu terminație în profil rampă de oxid realizată pe SiC
- Presupune procese tehnologice de creștere de oxizi și depuneri metalice realizabile la IMT-București
- Corodarea în rampă cu unghiuri foarte mici, tipic mai reduse de 10° - distribuție uniformă a câmpului
- Uniformitatea distribuției de curent în contact



## Senzori de temperatură pe SiC

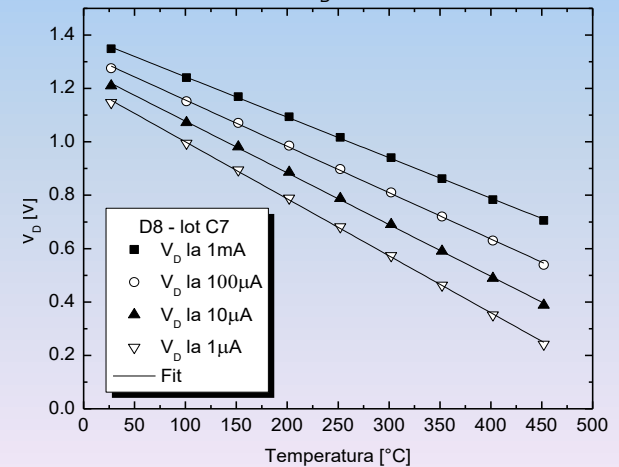
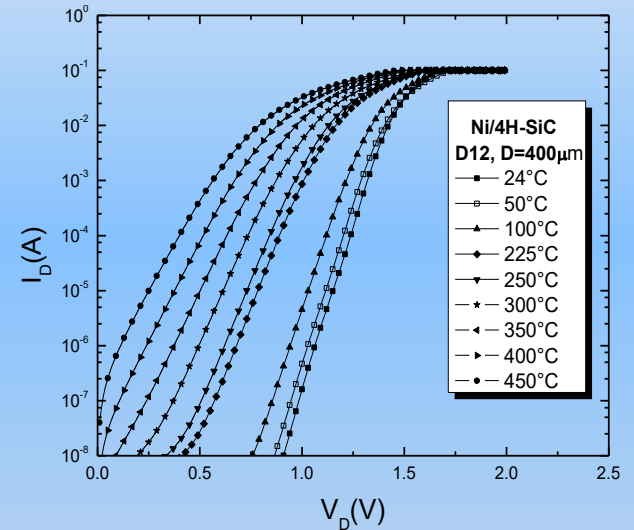
- Tensiunea directă - semnalul electric de la ieșirea senzorului dependent de temperatură

$$V_D(T) \cong n\phi_{Bn} - [n\phi_{Bn} - V_D(T_0)] \frac{T}{T_0}$$

- Tensiunea scade liniar cu temperatura
- Panta reprezintă sensibilitatea senzorului

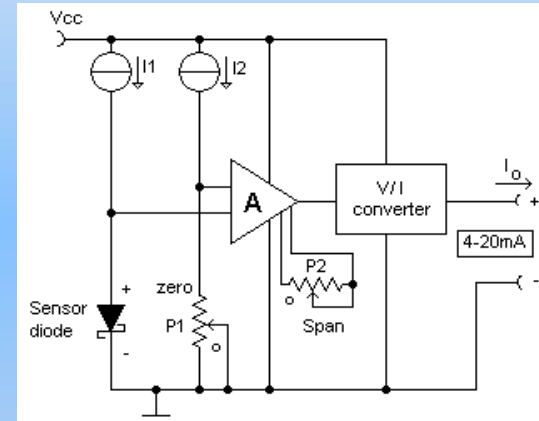
$$S \approx \frac{n\phi_{Bn} - V_F(T_0)}{T_0}$$

- Sensibilitatea în funcție de curentul direct de polarizare:  
-1,53mV/°C ... -2,14mV/°C



## Circuit analogic de condiționare a semnalului furnizat de senzori de temperatură

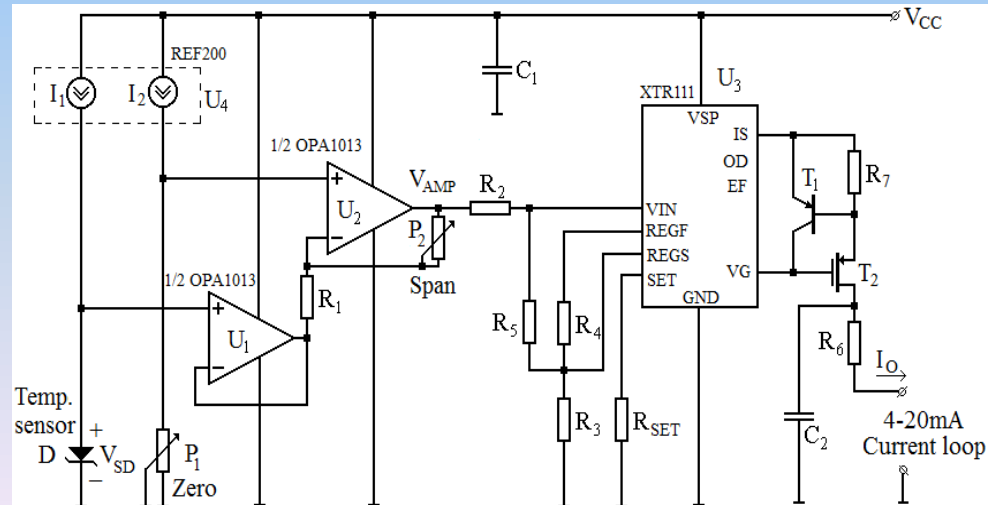
- Sensibilitate -1,6 ... -2,4mV/°C dependentă de curentul direct de polarizare
- Polarizarea sensorului în curent constant și măsurarea căderii de tensiune
- Conversia în buclă de curent 4-20mA – standard industrial



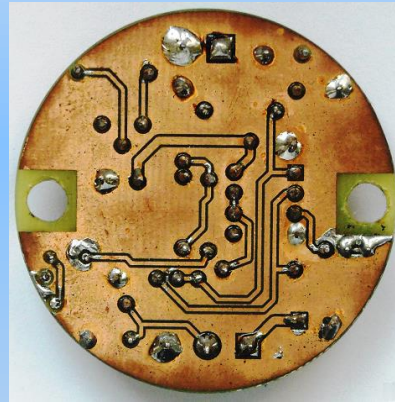
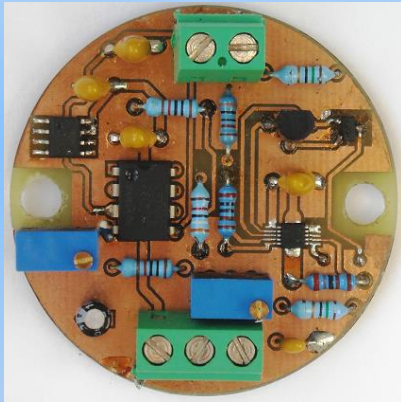
$$V_{AMP} = I_2 \cdot R_{P1} \cdot \left( 1 + \frac{R_{P2}}{R_1} \right) - V_{SD} \cdot \frac{R_{P2}}{R_1}$$

$$I_o = \frac{m}{R_{SET} \cdot (R_2 + R_5)} \cdot \left[ R_2 \cdot V_R \cdot \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + R_5 \cdot V_{AMP} \right]$$

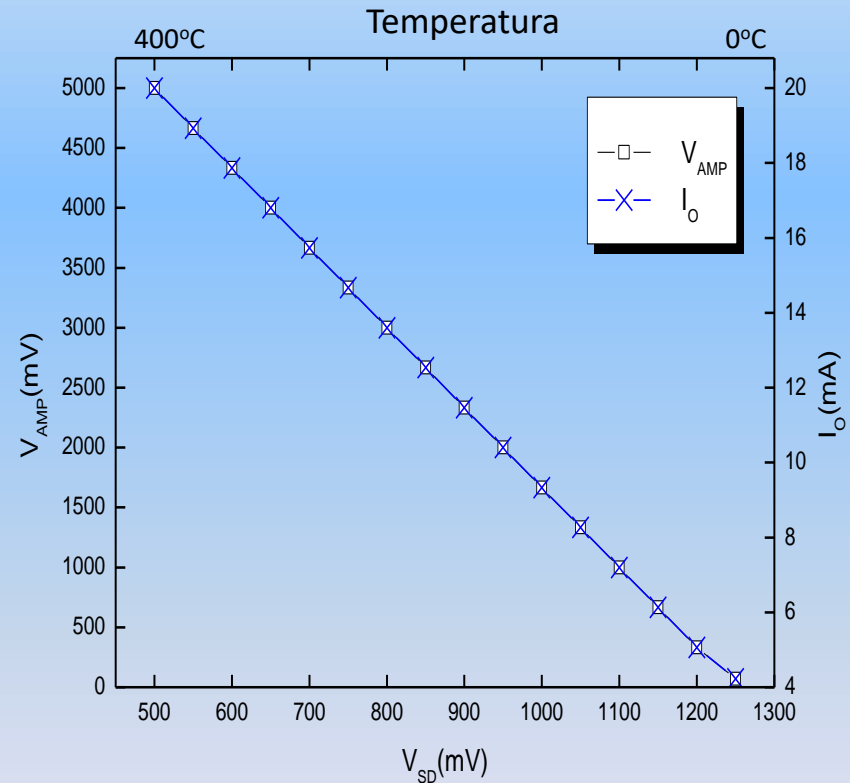
- Dependența liniară temperatură - curent de ieșire



## Circuit analogic de condiționare a semnalului furnizat de senzori de temperatură

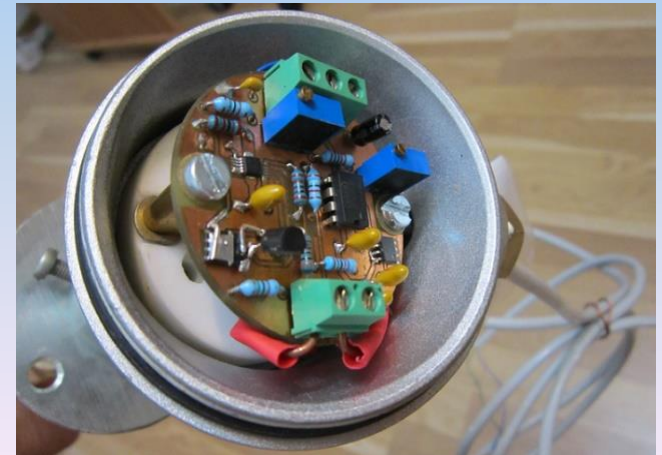


- Liniaritate bună în domeniul de tensiuni specifice sensorului de temperatură pe SiC
- Ușoară neliniaritate pentru un  $V_{SD}$  în domeniul 1200 - 1250mV
- Temperaturile echivalente acestei tensiuni  $<70^{\circ}\text{C}$



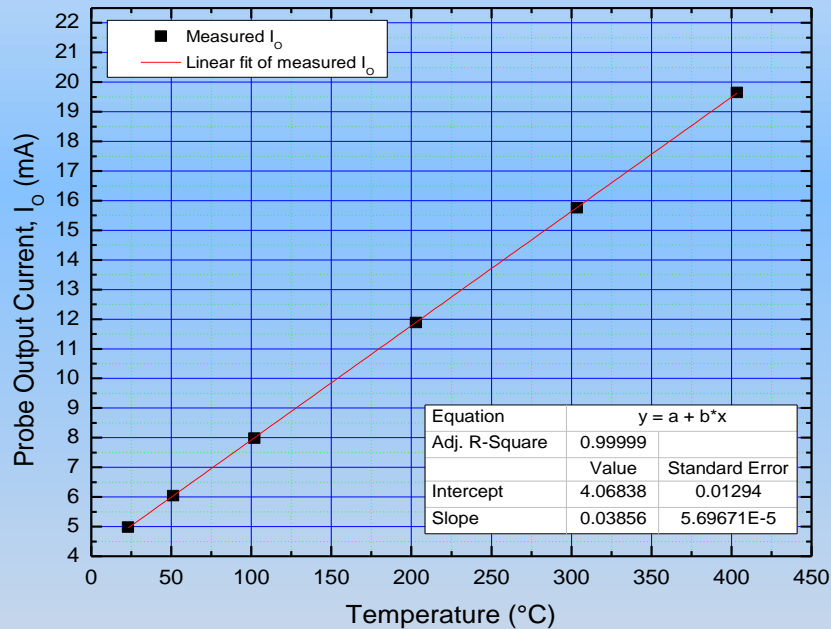
## Sondă de temperatură pentru aplicații industriale

- Bazată pe senzor Schottky pe SiC
- Compatibilitate completă (electrică și mecanică) cu linia de fabricație (alimentare +24V, senzor izolat față de carcasa sondei, ieșire în gama 4-20mA)





## Sondă de temperatură pentru aplicații industriale



- Calibrare în gama 0...400°C în Laboratorul DCE-SA
- Testată pe linia de producție a unei fabrici de ciment
- Punctul de măsură ales foarte apropiat de o sondă cu termocuplu, utilizată de fabrică pentru monitorizarea și controlul parametrilor de proces

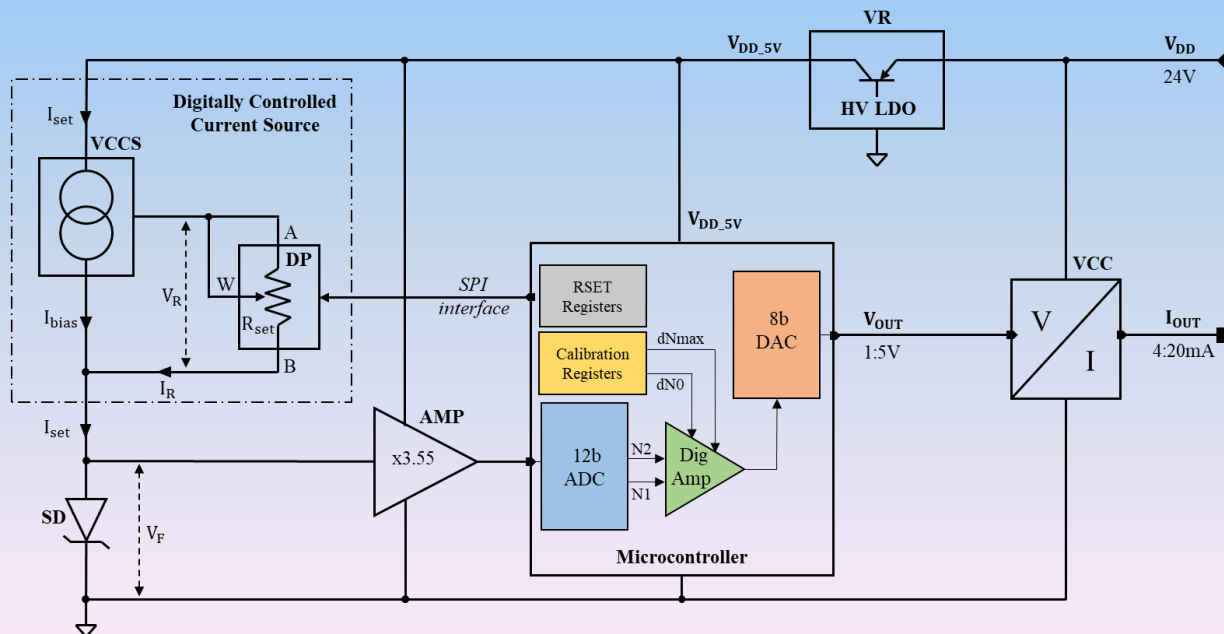
## Sondă de temperatură pentru aplicații industriale



- Dinamică similară cu sonda de proces
- Fiabilitate bună
- Diferența de temperatură datorată lipsei cuplajului termic între cele două sonde

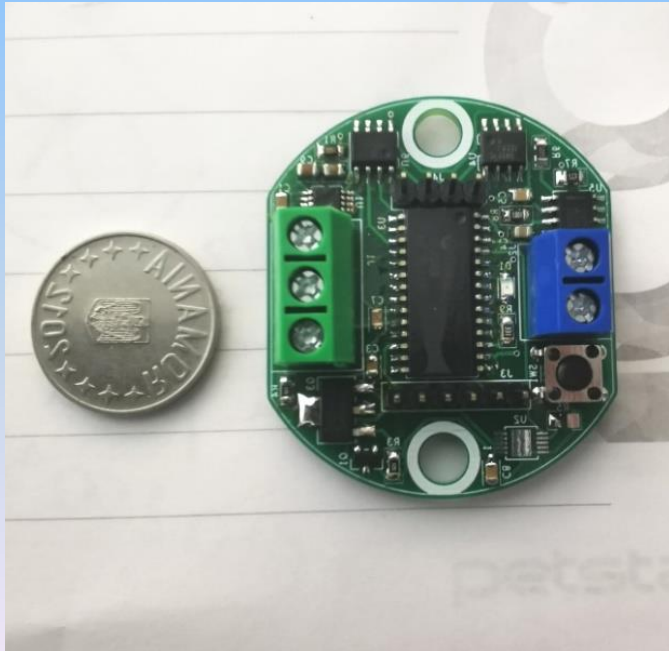
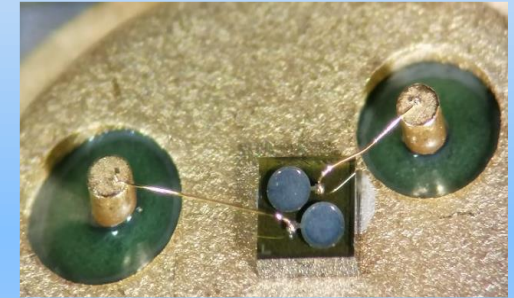
## Circuit de condiționare a semnalului furnizat de senzori de temperatură bazat pe microcontroler

- Polarizarea sensorului la curent constant la două valori și măsurarea diferenței căderii de tensiune
- Senzor PTAT (Senzor de temperatură proporțional cu temperatura absolută)
- Prelucrarea digitală a informației
- O liniaritate foarte bună
- Conversia în buclă de curent 4-20mA – standard industrial

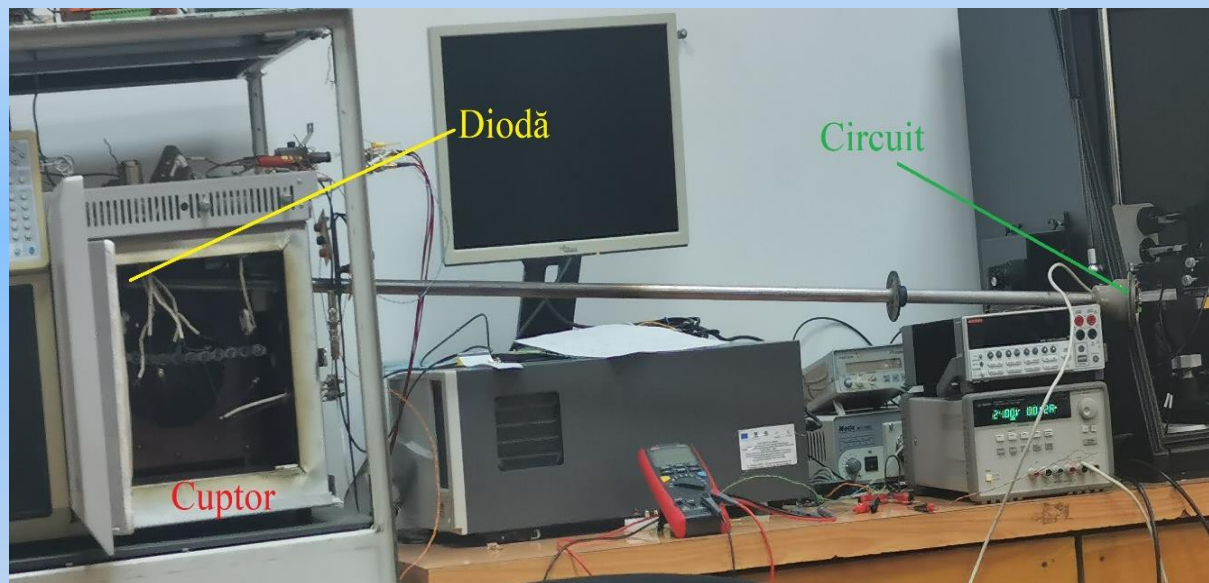


## Circuit de condiționare pentru senzori de temperatură cu microcontroler

- Utilizarea unei noi măști prin care pe un cip se obțin doi senzori



## Sondă de temperatură cu diodă Schottky pe SiC și microcontroler

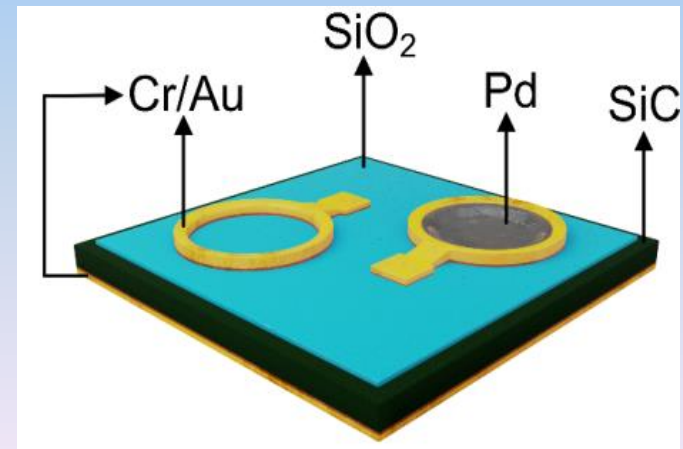
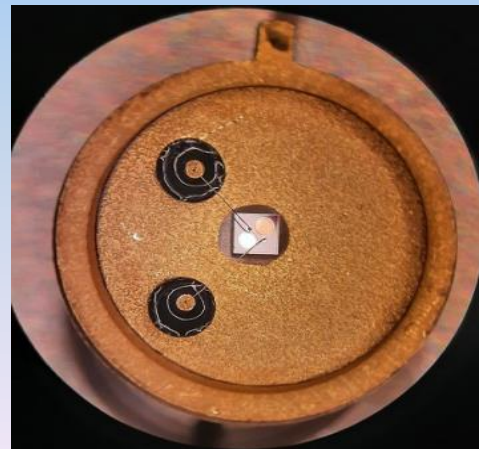
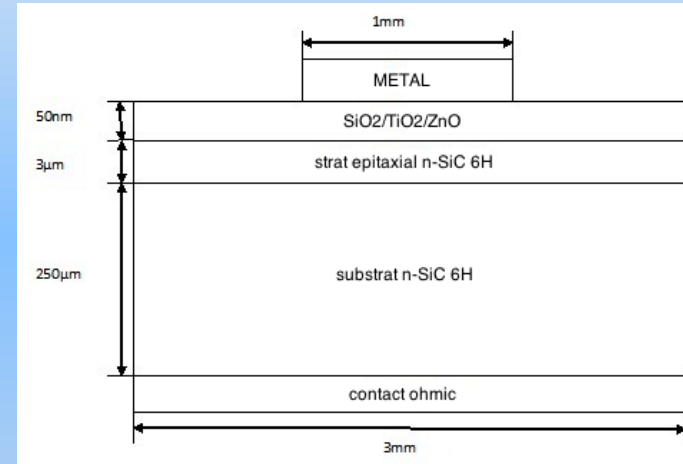


- Compatibilitate mecanică și electrică 100% cu sondele utilizate în industrie
- Liniaritate bună
- Calibrare ușoară, similară cu a sondelor utilizate industrial

Temp. [°C]	I <sub>OUT</sub> măsurat [mA]	I <sub>OUT</sub> ideal [mA]	Temp. măsurată [°C]	ε <sub>T</sub> [°C]
0.00	4	4.00	0.00	0.00
27.80	5.11	5.11	27.98	0.18
101.80	8.02	8.05	101.07	-0.73
202.30	12.15	12.06	204.65	2.35
400.00	20	20.00	400.00	0.00

## Senzori de gaz pe SiC

- Senzor capacitiv, bazat pe o structură MOS realizată pe SiC
- Funcționare la temperaturi ridicate (300°C)
- Monitorizarea scurgerilor de gaz pentru detectarea unor concentrații cu potențial exploziv sau nociv
- Detecție de hidrocarburi sau H<sub>2</sub>
- Proces tehnologic comun în cea mai mare parte cu senzorul de temperatura



## Senzori de gaz pe SiC

- Capacitatea - mărimea dependentă de concentrația de gaz

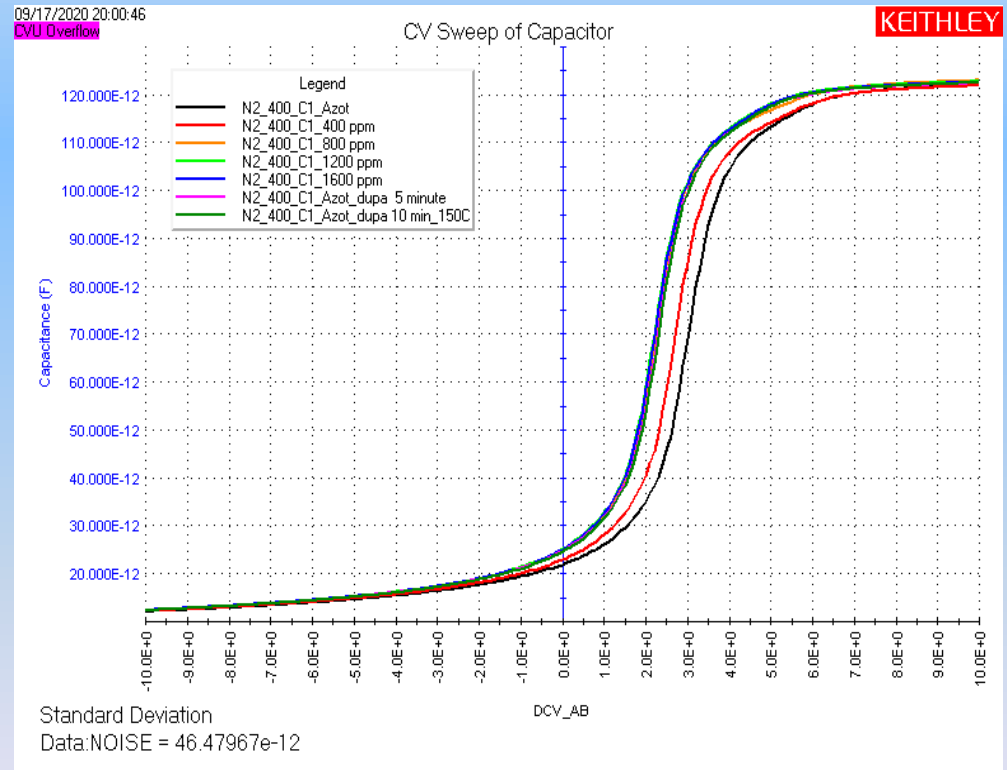
$$\frac{1}{C_{act}} = \sqrt{\frac{1}{C_{ox}^2} + \frac{2(V_{FB} - V_A)}{q\epsilon_s N_B A^2}}$$

- Influența gazului prin intermediul tensiunii de benzi netede ( $V_{FB}$ )

$$V_{FB} = \psi_G - \chi_S - \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_c}{N_B} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$Q_{ox} = f(\text{concentrația de gaz})$$

- Expunerea senzorului la gaz duce la deplasarea caracteristici C-V către tensiuni mai mici



## Circuit de interfațare pentru senzori de gaz ( $H_2$ )

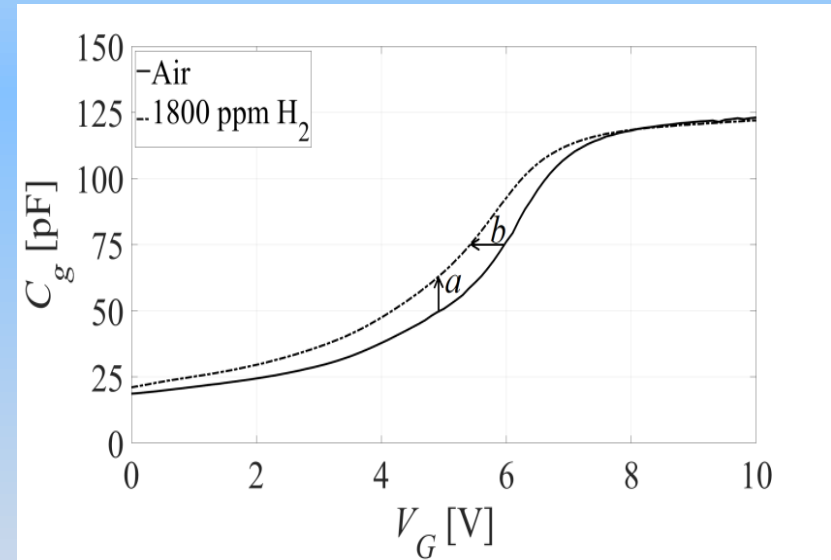
- Influența gazului poate fi sesizată ca:
  - o deplasare a caracteristicii C-V pe axa capacităților la o tensiune constantă (a)

$$S_C = \frac{\Delta C}{k_{H_2}}$$

- o deplasare pe axa tensiunii la o capacitate constantă (b)

$$S_V = \frac{\Delta V}{k_{H_2}}$$

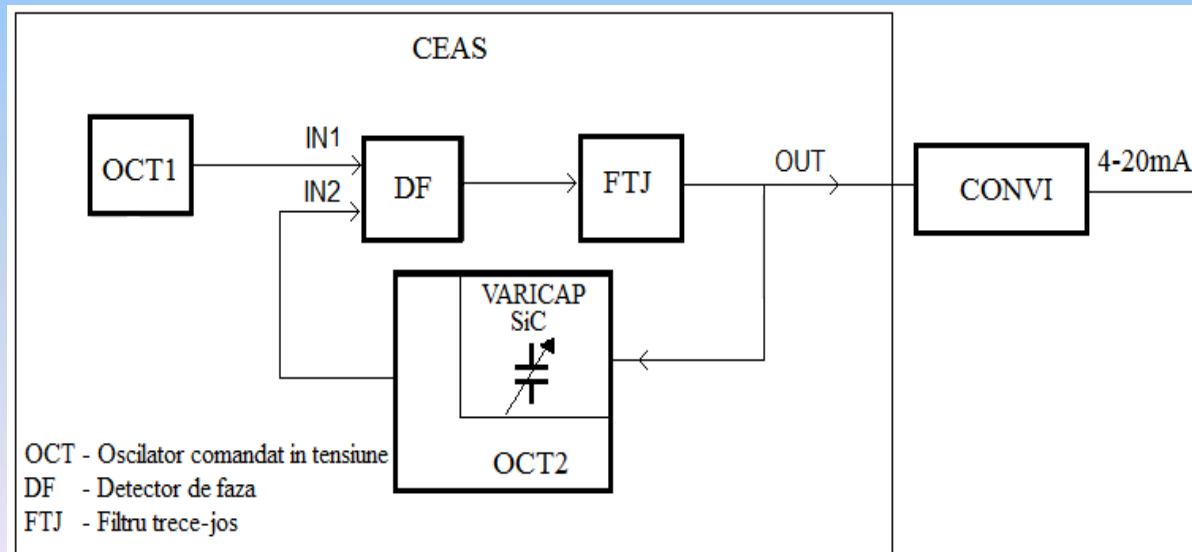
- Alegerea modului de variație (în capacitate sau în tensiune) impune principiul de măsură



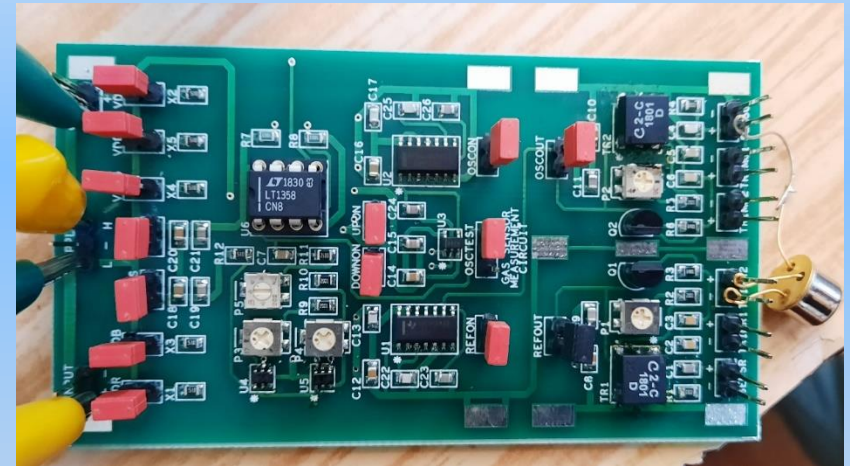
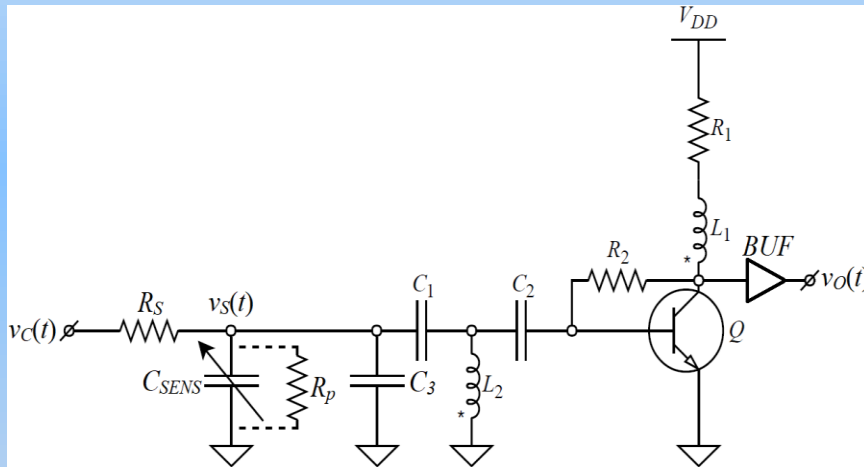


## Circuit de interfațare pentru senzori de gaz ( $H_2$ ) dezvoltat pe un PLL

- Conversia capacitate – tensiune senzor– tensiune de ieșire bazată pe circuit PLL
- Tensiunea de eroare a circuitului PLL dependendă de variația capacității senzorului (CEAS)
- Circuit conversie tensiune/curent în standardul industrial, curent în gama 4-20mA (CONVI)
- Concept nou de circuit de prelucrare a semnalului dat de un senzor de gaz



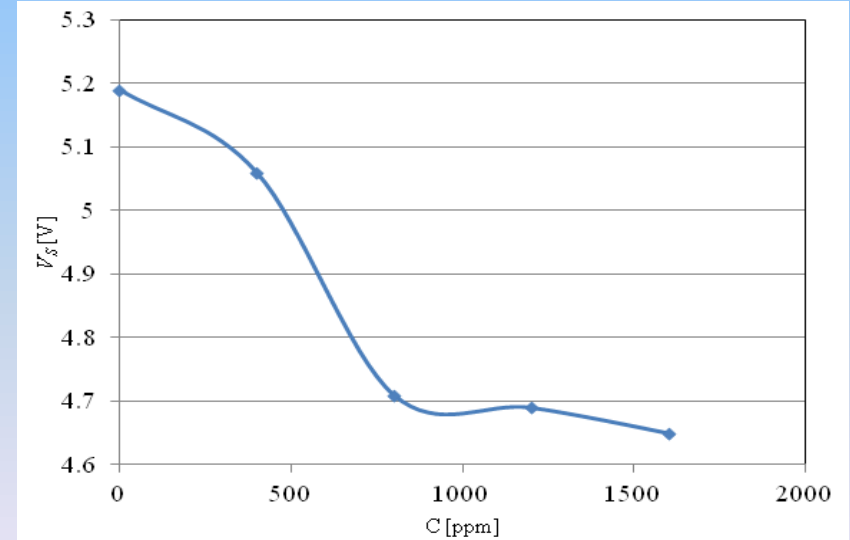
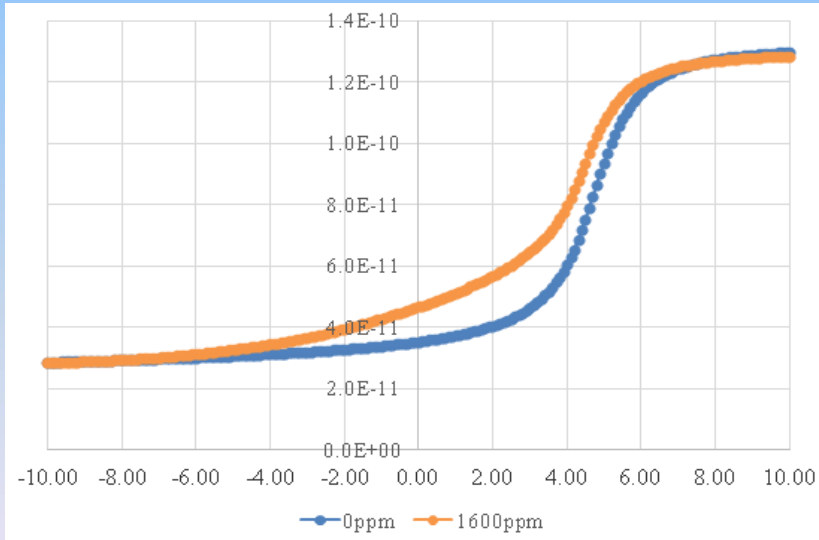
## Circuit de interfațare pentru senzori de gaz ( $H_2$ ) dezvoltat pe un PLL



- Senzorul MOS pe SiC inclus în rețeaua unui oscilator comandat în tensiune (OCT)
- Funcționare la  $f=1\text{MHz}$  și semnal mic – condiții similare cu cele din sistemul de caracterizare
- PCB proiectat pentru reducerea EMI

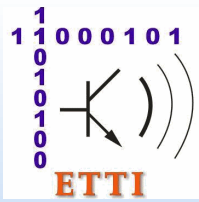
## Circuit de interfațare pentru senzori de gaz ( $H_2$ ) dezvoltat pe un PLL

- Curbele  $C(V)$  ale senzorului de gaz pe SiC la 0ppm și 1600 ppm  $H_2$
- Dependența tensiune de eroare PLL – concentrație de gaz (în punctele de 400 ppm, 800ppm, 1200 ppm și 1600 ppm de  $H_2$ )





**DCAE**  
DISPOZITIVE, CIRCUITE ȘI  
ARHITECTURI ELECTRONICE



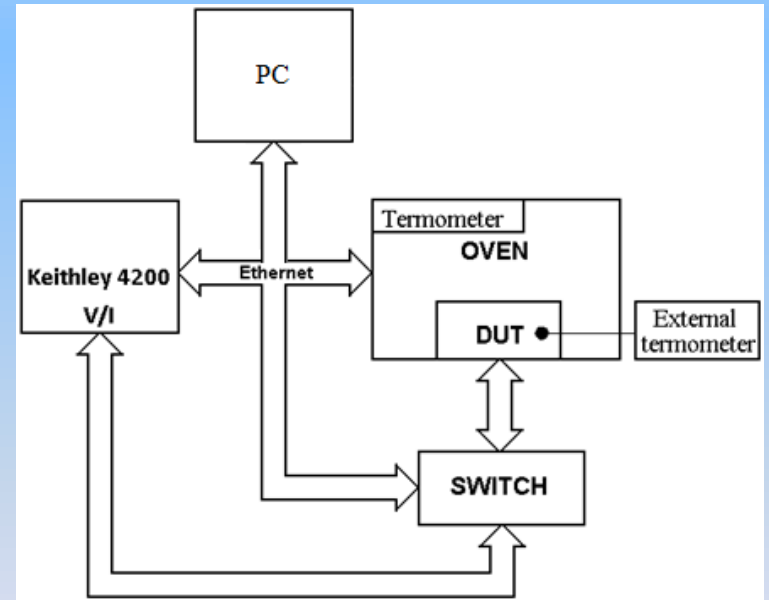
## Sisteme de testare a dispozitivelor pe materiale de bandă interzisă mare

- Sisteme de caracterizare și testare la temperaturi înalte care depășesc de două sau chiar trei ori temperatura maximă de operare a dispozitivelor pe siliciu
- Destinate testării și caracterizării dispozitivelor încapsulate și pe plachetă
- Dispozitive încapsulate, intervalul -90 - 800°C
- Pe plachetă, posibilitatea de testare repetitivă în cicluri termice cu rampa controlată de temperatură, intervalul ambiant...300°C
- Caracterizare în funcție de temperatură și concentrația de gaz țintă pentru senzori de gaz
- Precizia atingerii țintei de temperatură: <math><0,5^{\circ}\text{C}</math>, repetabilitate <math><0,1^{\circ}\text{C}</math>
- Mărimile caracteristice testării sunt controlate automat (tensiunea, curentul, temperatura și concentrația de gaz)
- Interfețele de control software ale aparatelor pot fi accesate de la distanță, inclusiv selecția dispozitivelor testate.

## Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare

### Configurarea pentru testarea în temperatură

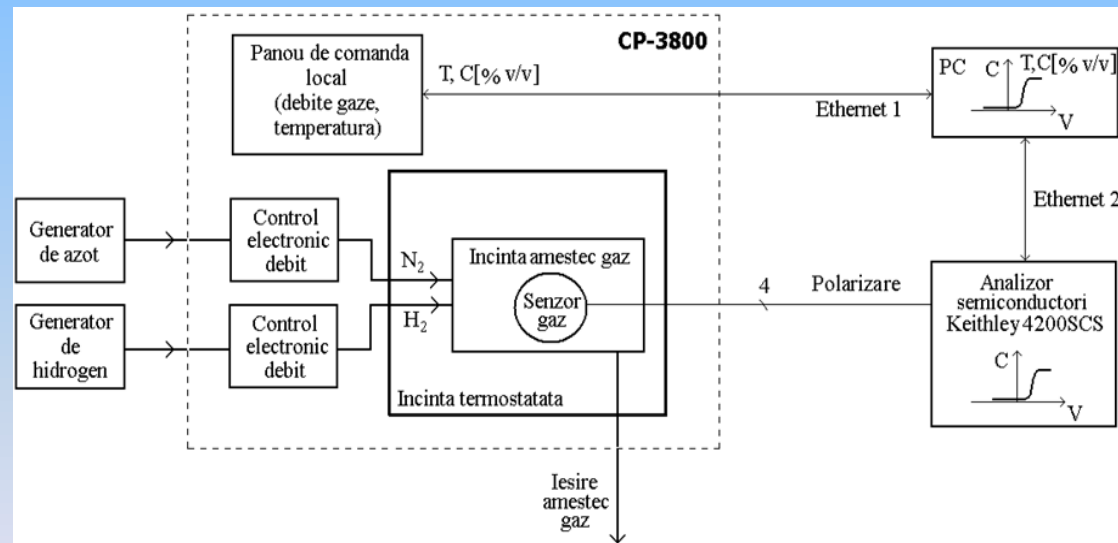
- Necesari pentru atingerea obiectivelor propuse în proiectele de cercetare
- Domeniul de temperaturi de test:  $-90 - 450^{\circ}C$
- Rampa maximă de temperatură:  $50^{\circ}C/min$ , controlabilă
- Acuratețe:  $0,5^{\circ}C$
- Tensiuni de polarizare:  $0 - 1100V$  (posibilitate de extindere la  $3kV$ )
- Gama de curenți:  $100pA - 100mA$
- Datele măsurate furnizate în format Excel: caracteristici  $I-V(T)$  și  $C-V(T)$
- Interfețe software pentru configurarea parametrilor de măsură - aplicație Keithley 4200SCS sau aplicație proprie pe sistem HP4140B/4275A
- Program de temperatură - aplicație Varian-WS



## Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare

### Configurarea pentru testarea în temperatură și la concentrații de gaz

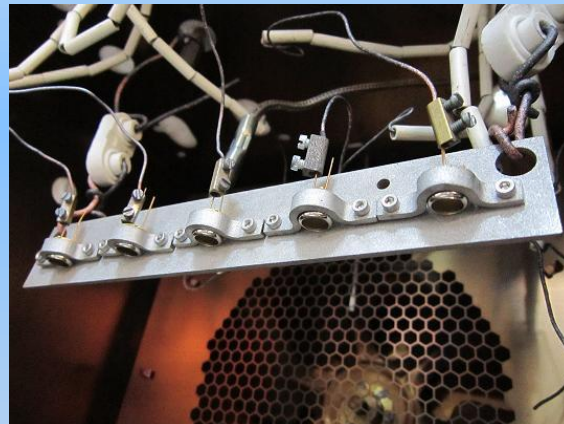
- Domeniul de temperaturi: 0-300°C
- Rampa maximă de temperatură: 50°C/min, controlabilă
- Acuratețe: 0,5°C
- Tensiuni de polarizare: 0 - 100V
- Gama de curenți: 100pA -100mA
- Datele furnizate în format Excel: caracteristici C-V[T, C%(v/v)] și I-V[T, C%(v/v)]
- Interfețe software pentru configurarea parametrilor de măsură - aplicație Keithley 4200 sau aplicație proprie pe sistem HP4140B/4275A
- Programul de temperatură și control al gazelor - aplicație Varian-WS



## Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare



## Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare



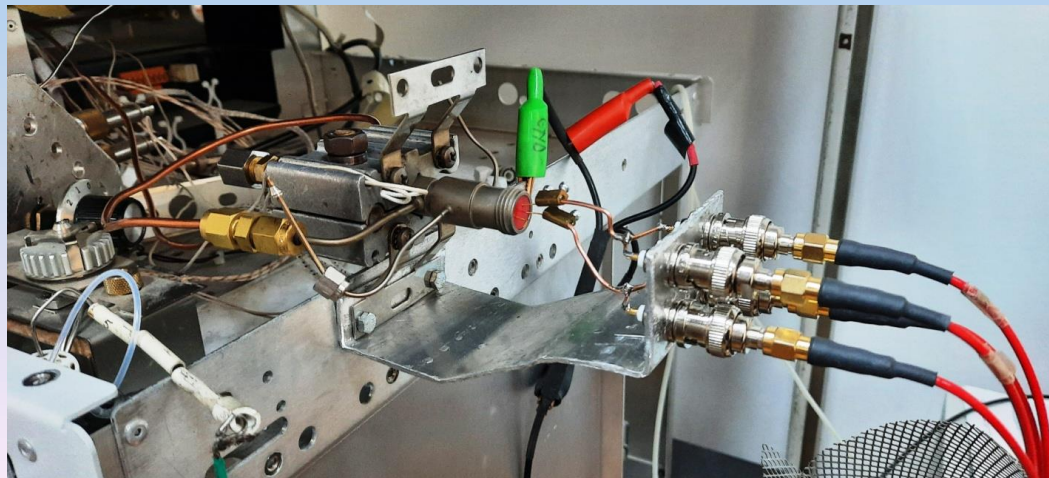
Column Oven Coolant:  On  Off

Enable Coolant at (C):

Coolant Timeout (min):

Stabilization Time (min):

	Temp (C)	Rate (C/min)	Hold (min)	Total
1	50		4.00	
2	400	50.0	4.00	
3	50	50.0	4.00	
4	400	50.0	4.00	
5	50	50.0	4.00	
6	400	50.0	4.00	
7	50	50.0	4.00	
8	400	50.0	4.00	

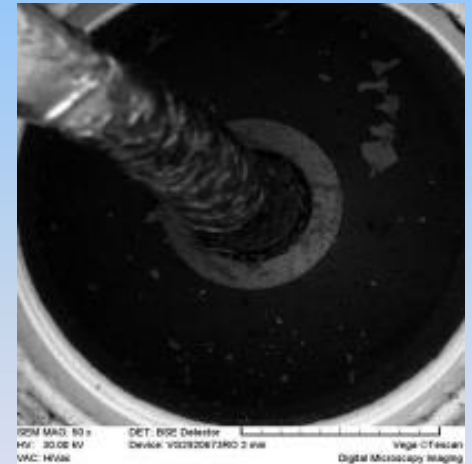
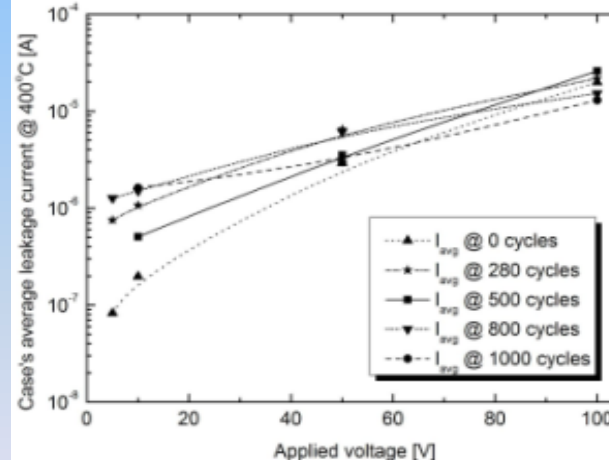
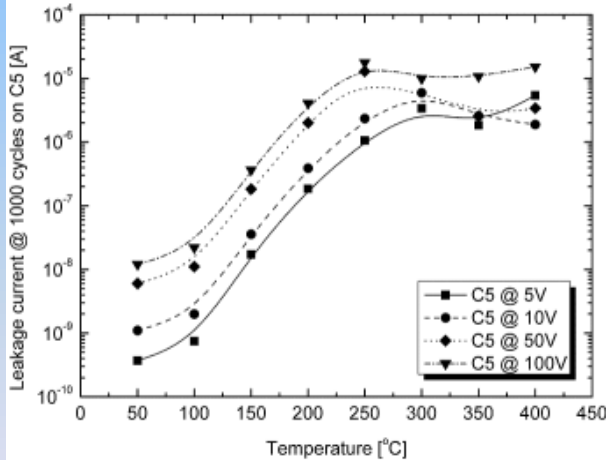




# Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare

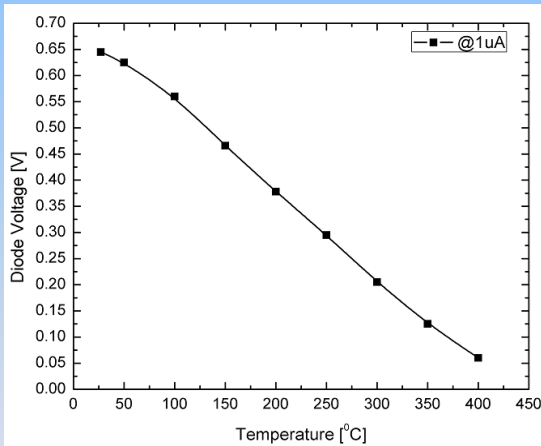
## Capsula senzor de temperatură – măsurători la stres termic

- Ciclări termice în intervalul ambient - 450°C

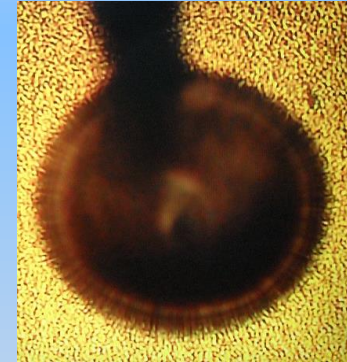


## Sistem de testare în temperatură și la concentrații de gaz ( $H_2$ în $N_2$ ) pentru dispozitive electronice pe materiale de bandă interzisă mare

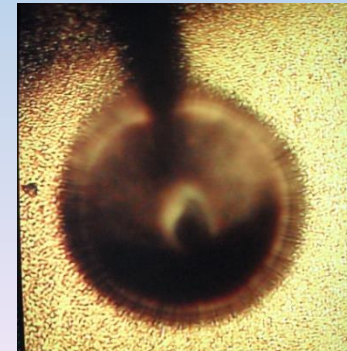
- Caracteristica  $V_{diodă} - T$  în intervalul 27 - 400°C (diodă Schottky pe SiC)



Cip D1 înainte de testarea în temperatură



Cip D1 după testarea în temperatură până la 430°C



## Laboratorul de “Dispozitive și circuite electronice – studii avansate (DCE-SA)”

<https://eris.eu/ERIF-2000-000M-2131>

- Un laborator destinat cercetării
- Deschis pentru:
  - master (MON) - Laboratorul de Dispozitive semiconductoare de putere
  - doctoranzi

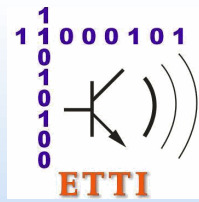
Membri echipei de cercetare:

- Prof. G. Brezeanu – Director laborator
- Prof. F. Drăghici – Coordonare tehnică
- Dr. M. Bădilă
- Dr. F. Mitu
- S.L. G. Pristavu
- Drd. A. Enache
- Drd. V. Moise
- Drd. M. Șerbănescu





**DCAE**  
DISPOZITIVE, CIRCUITE ȘI  
ARHITECTURI ELECTRONICE



## Laboratorul de “Dispozitive și circuite electronice – studii avansate (DCE-SA)”

<https://eeris.eu/ERIF-2000-000M-2131>

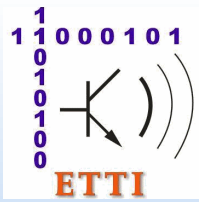
### Facilități

Caracterizarea și testarea de dispozitive electronice realizate pe materiale de bandă interzisă mare:

- I-V (T) și C-V (T) cu temperaturi controlate în gama (-90 - 800°C) pe dispozitive încapsulate și pe plachetă în intervalul cameră -300°C
- Rampa maximă de temperatură: 50°C/min
- C-V[T, C%(v/v)] și I-V[T, C%(v/v)] cu temperaturi controlate în gama (0-300°C) și concentrații de gaz (0-100%) cu pas de 400ppm
- Tensiuni de polarizare: 0 - 1100V (posibilitate de extindere la 3kV)
- Curenți: fA - A)
- Capacități (pF...nF)
- Datele măsurate furnizate în format Excel
- Alte caracterizări de uz general
- Arhitectura deschisă - adăugarea de noi blocuri care pot îmbunătăți performanțele și crea noi funcții
- Obținerea unei rezoluții pentru fixarea concentrației de gaz de test de 100ppm



**DCAE**  
DISPOZITIVE, CIRCUITE ȘI  
ARHITECTURI ELECTRONICE

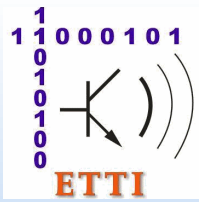


## Concluzii

- Grupul de dispozitive pe materiale de bandă interzisă mare din UPB în colaborare cu IMT înființat de peste 25 de ani
- Proiectare de dispozitiv și layout/măști
- Tehnologie și fabricație
- Caracterizare și testare în temperatură în diverse atmosfere într-un laborator dedicat
- Senzori pentru aplicații industriale
- Circuite de condiționare și prelucrare a semnalului (proiectare, realizare și testare)



**DCAE**  
DISPOZITIVE, CIRCUITE ȘI  
ARHITECTURI ELECTRONICE



# CIRCUITE DE INTERFAȚARE A SENZORILOR PE SiC ȘI CARACTERIZAREA ACESTORA LA TEMPERATURI ÎNALTE

READOUT CIRCUITS AND HIGH TEMPERATURE CHARACTERIZATION OF  
SiC SENSORS

**Florin Drăghici, Florin Mitu**

Universitatea POLITEHNICA din București