

**Materiale pentru fabricarea MEMS-urilor: siliciu  
cu germaniu policristalin (poli Si-Ge)**

Student: Ticu Ioana-Alexandra

Grupa: 55RD

MEMS-urile (Sistemele Micro-Electro-Mecanice) sunt structuri integrate de dimensiuni extrem de reduse, variind de la câțiva milimetri până la câțiva micrometri, ce combină componente electrice și mecanice. Acestea sunt fabricate printr-o combinație de tehnologii de realizare a circuitelor integrate și microprelucrări specifice materialelor și substraturilor utilizate. Spre deosebire de circuitele integrate, care valorifică doar proprietățile electrice ale siliciului, MEMS-urile exploatează atât caracteristicile electrice, cât și pe cele mecanice ale acestui material semiconductor și ale altor materiale. Prin urmare, MEMS-urile sunt dispozitive complexe, considerate echivalentul miniatural al sistemelor mecanice, completate cu componente electronice integrate.

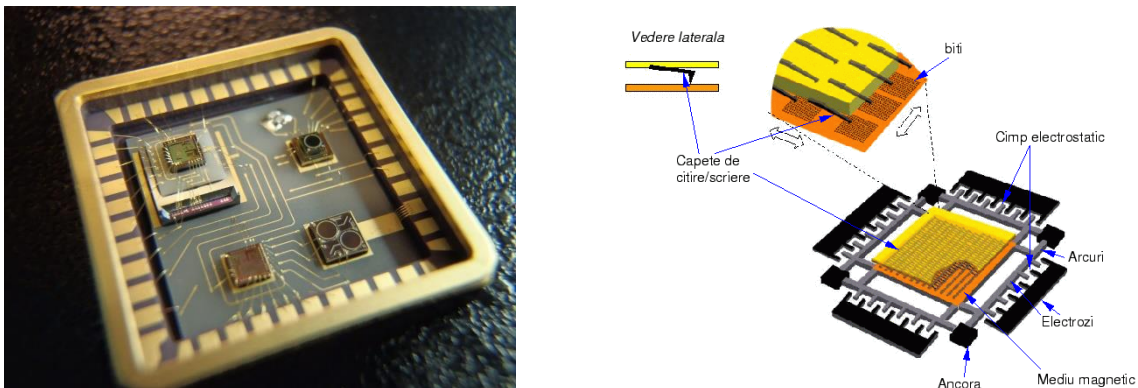


Fig.1: MEMS și structură MEMS

MEMS-urile sunt utilizate pe scară largă în diverse domenii datorită versatilității și miniaturizării lor. Cele mai întâlnite aplicații sunt în industria auto, unde sunt folosite pentru senzori de presiune, accelerometre și giroscopuri în airbaguri sau sisteme de stabilitate, și în electronicele de consum, precum smartphone-uri, tablete și console de jocuri, pentru detectarea mișcării și interacțiunii utilizatorilor. În domeniul medical, MEMS-urile se regăsesc în biosenzori, micro-pompe pentru administrarea medicamentelor și implanturi active, iar în telecomunicații sunt esențiale pentru filtre și comutatoare RF. De asemenea, sunt frecvent utilizate în avionică și aerospațial pentru sisteme de navigație inerțială, în industria energiei pentru senzori de gaze și microgeneratoare, precum și în securitate pentru detectarea mișcării și sisteme anti-sabotaj. Versatilitatea lor le face indispensabile în numeroase industrii moderne.

Cel mai utilizat material pentru MEMS-uri este siliciul cu germaniu policristalin (poli Si-Ge). Acesta este un material folosit frecvent în MEMS datorită temperaturii scăzute de depunere, compatibilității cu circuitele CMOS și proprietăților mecanice și termice ajustabile. Acesta este utilizat pentru straturi structurale sau de sacrificiu, fiind ideal pentru aplicații precum senzori termici, dispozitive RF și micro-oglinzi, datorită versatilității și performanțelor sale.

Alte materiale care se utilizează ca substrat în construcția MEMS-urilor sunt:

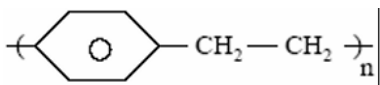
-metale (Cu, Al, Au, Ni, Ti), compusi metalici (TiN, ZnO) sau aliaje (TiNi);

-materiale ceramice (alumina);

-polimeri.

Aceste materiale se depun sub formă de straturi pe plăcuțele utilizate ca substrat. Grosimea acestor straturi poate varia de la câțiva nanometri la câțiva micrometri. polimeri.

<b>Materialul</b>	<b>Caracteristici/valențe/mod de utilizare la fabricarea MEMS-urilor</b>	<b>Aplicații</b>
Siliciu monocristalin (Si)	Material cu proprietăți foarte bune pentru utilizarea în industria electronică și cu anizotropie selectivă	Senzori piezorezistivi
Siliciu policristalin (polisiliciu)	Straturi de sacrificiu	Suprafață micromașinilor, Actuatori electroacustici
Dioxid de siliciu (SiO <sub>2</sub> )	Suprafețe insulare compatibile cu polisiliciul	Straturi de sacrificiu utilizate la realizarea micromașinilor Straturi de pasivizare
Nitrură de siliciu (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Si <sub>x</sub> N <sub>y</sub> )	Suprafețe insulare rezistente chimic, cu durabilitate mecanică mare	Straturi de izolație pentru dispozitive electrostatice, straturi de pasivizare pentru dispozitive

Germaniu policristalin (poli-Ge) Siliciu cu germaniu policristalin (poli Si-Ge)	Depunere la temperaturi joase	Suprafețe integrate ale MEMS-urilor
Aur (Au), Aluminiu (Al)	Straturi subțiri conducătoare	Straturi interconectate Straturi de mascare Înterupătoare mecanice
Nichel-fier (NiFe)	Aliaj magnetic	Actuatori magnetici
Titan-nichel (TiNi)	Aliaj cu memoria formei	Actuatori termici
Carbură de siliciu (SiC), Diamant	Stabilitate electrică și mecanică la temperaturi înalte, inerție chimică	MEMS-uri de înaltă frecvență
Arseniură de galiu (GaAs), Fosfură de indiu (InP)	Fante pentru trecerea luminii	Dispozitive optoelectronice
Arseniură de indiu (In As)	Semiconductor de bandă îngustă și cu mobilitate electronică mare	Detectoare de infraroșu, de obicei fotodiode fotovoltaice
Titanat zirconat de plumb (PZT, (Pb[Zr <sub>x</sub> Ti <sub>1-x</sub> ]O <sub>3</sub> 0<x<1))	Material piezoelectric	Senzori mecanici și actuatori
Poliamide	Polimeri rezistență chimică, rezistență la temperaturi înalte	MEMS-uri flexibile, bio-MEMS-uri
Parilen (poliparaxilen) 	Polimer biocompatibil, care se poate depune la temperatura camerei	Straturi de acoperire structuri polimerice moi

Tabel.1: Materiale pentru fabricarea MEMS-urilor

Pentru realizarea MEMS-urilor, materialele utilizate în fabricație sunt de două tipuri:

- Materiale utilizate ca substrat
- Materiale de depunere

Cel mai utilizat material folosit ca substrat este siliciul. Acesta este un element chimic cu simbolul Si și numărul atomic 14, clasificat ca metaloid. Este al doilea cel mai abundent element din scoarța terestră, reprezentând aproximativ 25% din masa acesteia, fiind prezent în principal sub formă de dioxid de siliciu și silicați.



Fig.2 : Siliciu

Avantajele acestui material sunt:

- Material accesibil și ieftin
- Se poate prelucra cu ușurință pentru a forma diferite structuri necesare în tehnologiile avansate.
- Proprietăți mecanice foarte bune

Dezavantajele ar fi:

- Fragilitate mecanică – Se poate sparge ușor sub stres ridicat.
- Sensibilitate la impurități – Necesită puritate mare, ceea ce crește costurile.
- Conductivitate electrică limitată – Mai mică decât cea a metalelor.
- Performanțe reduse la temperaturi ridicate – Ineficient în condiții extreme de căldură.
- Proces complex de prelucrare – Fabricarea implică metode costisitoare.
- Toxicitate în unele forme – Praful fin de siliciu poate fi nociv dacă este inhalat.

Siliciul în fabricarea MEMS-urilor se pot găsi sub trei forme:

### 1. Cristalin

Siliciul de înaltă puritate, sub formă cristalină, este fabricat sub formă de plăcuțe circulare cu diametre de 100, 150, 200 sau 300 mm și grosimi variate. O caracteristică importantă a acestui material este capacitatea sa de a fi corodat anizotrop. Proprietățile fizice ale siliciului sub formă cristalină sunt următoarele:

- **Densitate:** 2330 kg/m<sup>3</sup>
- **Temperatura de topire:** 1410 °C
- **Modulul de elasticitate:**  $E=1.6 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>
- **Limita de curgere:**  $7 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>
- **Permitivitatea electrică relativă:**  $\epsilon_r=11.9$
- **Constanta rețelei cristaline:**  $a=5.4310$  Å
- **Conductivitatea termică** (la 300 K): 150 W/m·°C

### 2. Amorfă

Acesta are o structură neregulată și conține numeroase defecte. Împreună cu siliciul policristalin se poate depune în straturi subțiri de până la 5 micrometri. Siliciul amorf (poros) este produs la temperatura camerei prin gravare electrochimică a Si în acid hidrofluoric.

### 3. Policristalin

Siliciul policristalin este utilizat în MEMS și circuite integrate (IC) pentru realizarea straturilor subțiri, acestea fiind depuse printr-un proces denumit depunere chimică de vapori la presiune joasă (LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition). Procesul se desfășoară la temperaturi cuprinse între 580 °C și 650 °C și la presiuni între 100 și 400 mtorr, folosind gaze precum silanul (SiH<sub>4</sub>).

Straturile subțiri din siliciu policristalin sunt alcătuite din mici monocristale, iar microstructura și orientarea acestora depind de condițiile de depunere. Într-un proces LPCVD (low-pressure chemical vapor depositon) tipic, temperatura de tranziție de la starea amorfă la cea cristalină este de 570 °C, iar depunerea stratului amorf se realizează în jurul acestei temperaturi. La 600 °C, grăunții cristalini sunt mici și uniformi, iar la 625 °C, aceștia devin mari și alungiți.

Rezistivitatea siliciului policristalin poate fi ajustată prin saturare, de obicei folosind fosforul ca agent de dopaj, metoda fiind aplicată frecvent în realizarea straturilor subțiri pentru componentele MEMS. Acest proces permite o mare viteză de difuzie, iar difuzibilitatea în filmele subțiri este de  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Conductivitatea termică a siliciului policristalin depinde de condițiile de depunere. În straturile subțiri cu granulație fină, aceasta este 25% din cea a siliciului monocristalin, iar în cele cu granulație mare poate atinge 50%-85%. Proprietățile termice, electrice și tensiunile reziduale variază în funcție de depunere. În condiții tipice (200 mtorr, 625 °C), tensiunile reziduale sunt ne semnificative, însă acestea cresc în straturile amorse sau cu granule alungite.

**Germaniul**, simbolizat cu Ge și având numărul atomic 32, este un metaloid dens, lucios, de culoare gri, cu proprietăți chimice asemănătoare siliciului și staniului. În formă pură, germaniul este un semiconductor, având un aspect similar cu siliciul. Din cauza reactivității sale cu oxigenul, germaniul nu se găsește în stare nativă pe Pământ, ci sub formă de compuși în minerale rare, precum germanitul, argiroditul, renieritul și canfielditul.



Fig.3 : Germaniu

Acesta are următoarele proprietăți:

- Densitate: 5.323 g/cm<sup>3</sup>.
- Punct de topire: 938.3 °C.
- Punct de fierbere: 2833 °C.
- Semiconductor: Are o bandă interzisă (gap) de 0.67 eV, ceea ce îl face mai sensibil decât siliciul pentru dispozitive optice și senzori IR.

Avantajele germaniului ar fi:

- Sensibilitate crescută: Comparativ cu siliciul, germaniul este mai eficient pentru detectarea semnalelor optice și IR.
- Mobilitate electronică ridicată: Permite o viteză mai mare de răspuns în dispozitivele electronice.
- Compatibilitate: Ușor de integrat cu siliciul pentru aplicații complexe (de exemplu, Si-Ge).

Dezavantajele ar fi:

- Cost ridicat: Este mai scump decât siliciul, ceea ce limitează utilizarea pe scară largă.
- Conductivitate termică scăzută: Mai mică decât cea a siliciului, ceea ce poate afecta performanța în anumite aplicații.
- Disponibilitate limitată: Germaniul este mai rar decât siliciul, fiind extras în principal ca subprodus al minereurilor de zinc.

Forma cea mai întâlnită a germaniului este de tip policristalin. Straturile subțiri de germaniu policristalin pot fi depuse prin procesul LPCVD la temperaturi mai mici de 325 °C pe substraturi de Si, Ge și SiO<sub>2</sub>. Aceste filme pot fi utilizate ca straturi de sacrificiu, iar tensiunea reziduală acumulată în ele poate fi redusă aproape de zero printr-o calire ușoară la temperaturi între 30 și 600 °C. Germaniul policristalin, fiind impermeabil la KOH, este folosit pentru realizarea membranelor de Ge pe substraturi de siliciu. Proprietățile mecanice ale germaniului policristalin sunt similare celor ale polisiliciului, având un modul de elasticitate de 132 GPa și o rezistență la rupere cuprinsă între 1,5 și 3 GPa. De asemenea, acesta poate fi utilizat ca strat de sacrificiu pe



suprafețe de polisiliciu pentru fabricarea straturilor de acoperire pentru micromașini. Prin acest procedeu, dispozitive precum termistorii bazați pe germaniu policristalin și senzorii cu membrane de presiune din  $\text{Si}_3\text{N}_4$  utilizează germaniul policristalin ca strat de sacrificiu în timpul procesului de fabricație.

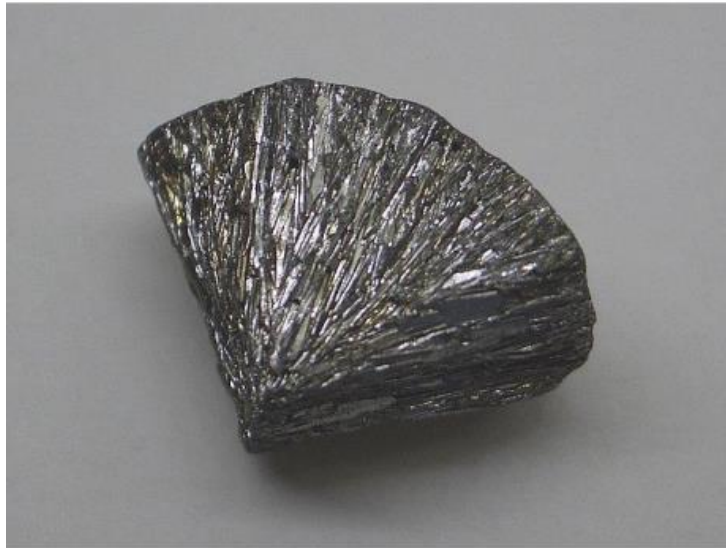


Fig.4 : Germaniu policristalin

### **Siliciu cu Germaniu policristalin (SiGe policristalin)**

Siliciul cu germaniu policristalin (poli Si-Ge) este un material esențial în fabricarea MEMS datorită proprietăților sale unice, care îl fac potrivit atât pentru aplicații mecanice, cât și electrice. Utilizarea sa în diverse straturi funcționale și de sacrificiu contribuie la dezvoltarea dispozitivelor MEMS cu performanțe ridicate.

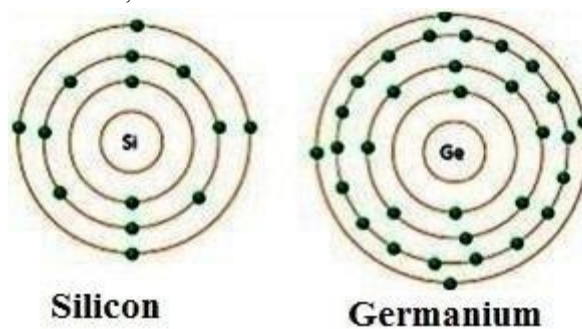


Fig.5 : structură separată a siliciului și germaniului policristalin

## 1. Caracteristici și Proprietăți

### 1.1 Structura Materialului:

- Poli Si-Ge este un compozit format din siliciu și germaniu, cu o structură policristalină, în care dimensiunea și orientarea grăunților depind de condițiile de depunere.
- Temperaturile de depunere sunt mai mici decât cele pentru polisiliciu, variind între 450°C (în LPCVD) și 625°C (în RTCVD).
- Conductivitatea termică și elasticitatea pot fi ajustate prin variația concentrației de germaniu.

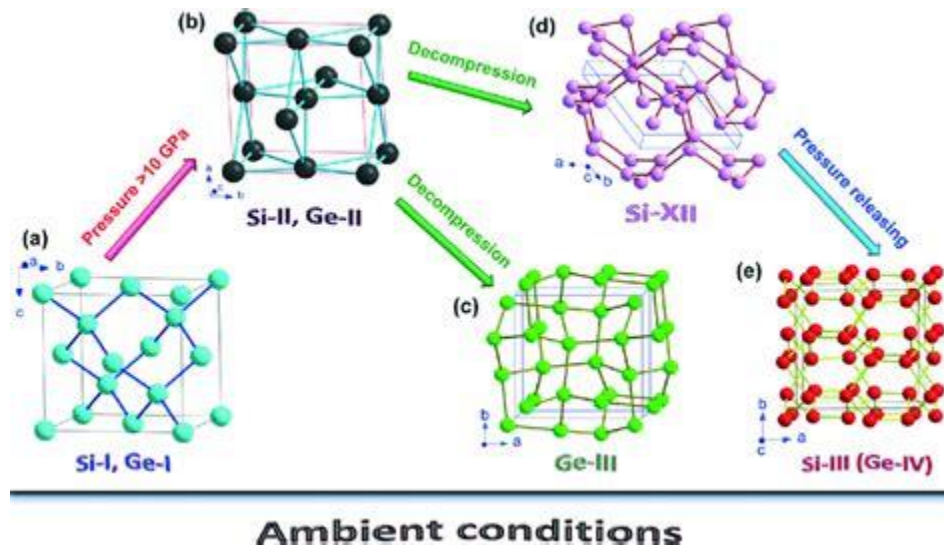


Fig.6: structură siliciu și germaniu policristalin

### 1.2 Proprietăți Mecanice:

- Modulul lui Young: Aproximativ 132 GPa, similar cu polisiliciul.
- Rezistența la rupere: Între 1,5 GPa și 3 GPa, suficient pentru aplicații MEMS.

### 1.3 Proprietăți Termice și Electrice:

- Conductivitatea termică este mai mică decât cea a polisiliciului, fiind avantajoasă pentru aplicații care necesită izolație termică.

Material	Conductivitate termică ( $\kappa$ ) la 300 K (W/m·K)
Siliciu (Si)	~150
Germaniu (Ge)	~60
Poli Si-Ge	15-50 (în funcție de compoziție și structură)

Tabel.2 : valori tipice ale conductivității termice

Material	Conductivitate termică ( $\kappa$ ) la 300 K (W/m·K)
Siliciu (Si)	~150
Germaniu (Ge)	~60
Poli Si-Ge (50% Ge)	~30
Oxid de siliciu (SiO <sub>2</sub> )	~1.4
Aluminiu (Al)	~205

Tabel.3 : comparație cu alte materiale

- Coeficientul de expansiune termică poate fi ajustat prin modificarea raportului Si:Ge, minimizând tensiunile termice.
  - La o compoziție de 70% Si și 30% Ge, CTE este de aproximativ  $4,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .
  - La o compoziție de 50% Si și 50% Ge, CTE este mai mare, în jur de  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Material	Coefficient de Expansiune Termică (CTE) ( $^{\circ}\text{C}$ )
Siliciu (Si)	$2,6 \times 10^{-6}$
Germaniu (Ge)	$5,8 \times 10^{-6}$
Poli Si-Ge	$4,0 - 5,5 \times 10^{-6}$
Oxid de siliciu	$0,5 \times 10^{-6}$
Aluminiu (Al)	$23 \times 10^{-6}$

Tabel.4 : comparație cu alte materiale

- Poate fi dopat cu fosfor sau bor pentru a îmbunătăți conductivitatea electrică.

## 2. Valențe

- Compatibilitate cu procese CMOS: Depunerea la temperaturi scăzute permite integrarea cu circuite electronice existente, fără a afecta straturile metalice.



Fig.7 : Integrarea actuala (a) și perspectiva de integrare (b) dintre substratul CMOS și MEMS

- Adaptabilitate: Prin ajustarea raportului Si:Ge, materialul poate fi optimizat pentru cerințe specifice mecanice sau termice.
- Depunere versatilă: Este compatibil cu tehnici precum LPCVD, PECVD și PVD.

## LPCVD (Low-Pressure Chemical Vapor Deposition)

LPCVD este o metodă utilizată pentru depunerea straturilor subțiri de materiale, cum ar fi polisiliciul sau siliciul cu germaniu policristalin, pe substraturi de siliciu. Această tehnică se realizează într-o atmosferă de presiune redusă (low pressure), folosind gaze precursori care reacționează chimic pentru a forma un strat solid pe suprafața substratului.

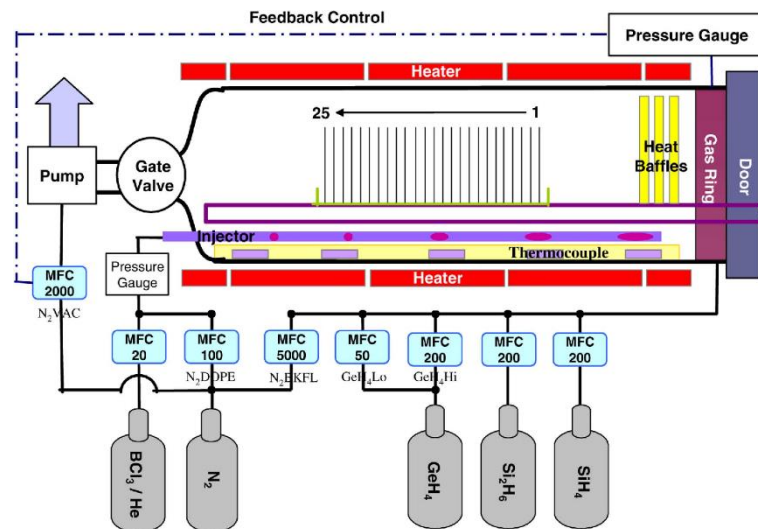


Fig.8 : process LPCVD

### Caracteristici principale:

- Presiune redusă: Presiunea din reactor este de obicei între 0,1 și 1 Torr.
- Temperaturi de lucru: Între 450 °C și 650 °C pentru siliciu cu germaniu.
- Uniformitate: Produce straturi foarte uniforme și de înaltă calitate, fiind ideală pentru procese MEMS.
- Aplicații: Depunerea de polisiliciu, nitruro de siliciu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), dioxid de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ) și poli Si-Ge.

### Avantaje:

- Cost redus și control bun al grosimii stratului.
- Uniformitate excelentă pe suprafețe mari.
- Compatibilitate cu procese CMOS.

### Dezavantaje:

- Rata de depunere mai scăzută comparativ cu alte metode (ex. RTCVD).

### RTCVD (Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition)

RT-CVD este o tehnică de depunere similară LPCVD, dar procesul se desfășoară la temperaturi ridicate pentru perioade scurte de timp, ceea ce permite depunerea rapidă a straturilor subțiri.

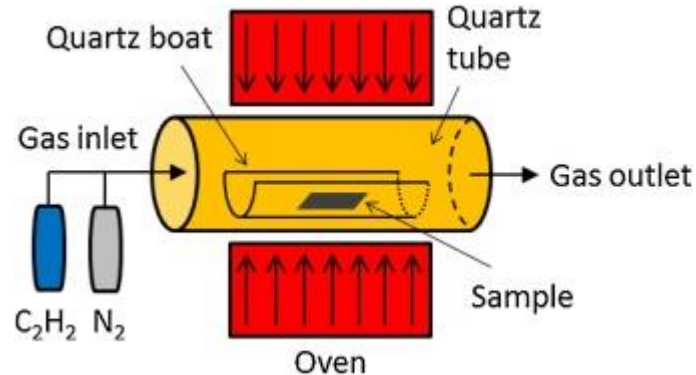


Fig.9 : process RTPCVD

### Caracteristici principale:

- **Temperaturi ridicate:** De obicei peste 700 °C.
- **Timp redus de procesare:** Reactorul poate încălzi rapid substratul, reducând timpul total de proces.
- **Aplicații:** Este utilizată pentru depunerea de materiale precum polisiliciu, siliciu amorf și Si-Ge.

### Avantaje:

- Depunere rapidă, ceea ce crește productivitatea.
- Reducerea tensiunilor reziduale datorită timpului scurt de expunere la căldură.
- Compatibilă cu depunerea selectivă.

### Dezavantaje:

- Costuri mai mari din cauza necesității unui echipament specializat.
- Uniformitate mai redusă pe suprafețe mari comparativ cu LPCVD.

Caracteristică	LPCVD	RTCVD
Presiune	Joasă (0,1 – 1 Torr)	Presiune atmosferică sau joasă
Temperatură	450 – 650 °C	700+ °C
Timp de procesare	Lung	Foarte scurt
Uniformitate	Foarte bună	Medie
Aplicații tipice	MEMS, CMOS, nitruro, polisiliciu	Straturi selective, rapid prototyping

Tabel. 5: Comparație între LPCVD și RTCVD

## 3. Mod de utilizare în fabricarea MEMS

### 3.1 Straturi Structurale:

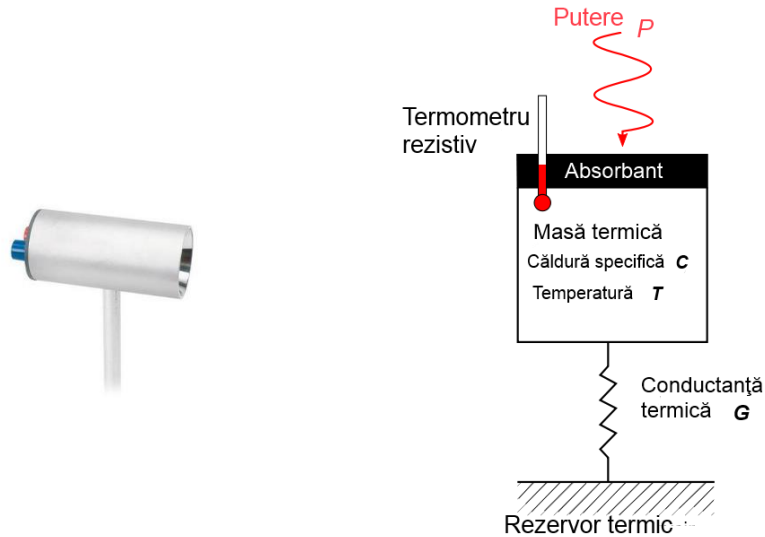
- Utilizat pentru rezonatoare, membrane și cantilevere datorită stabilității mecanice.

### 3.2 Straturi de Sacrificiu:

- Straturile temporare de poli Si-Ge sunt folosite pentru fabricarea structurilor complexe, fiind îndepărtate ulterior prin procese chimice.

### 3.3 Dispozitive Termice:

- Aplicații precum termopile și bolometre, unde conductivitatea termică scăzută este un avantaj.



### 3.4 Integrarea cu alte materiale:

- Funcționează bine cu  $\text{SiO}_2$  și  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pentru fabricarea senzorilor și actuatorilor.

## 4 Avantaje

### 4.1 Compatibilitate cu CMOS:

- Depunerea la temperaturi scăzute permite integrarea cu circuite electronice complexe.

### 4.2 Reglabilitate:

- Proprietățile mecanice și termice pot fi ajustate în funcție de cerințele aplicației.

### 4.3 Rezistență chimică:

- Este rezistent la soluții alcaline, ceea ce îl face ideal pentru utilizarea în procese chimice complexe.



#### 4.4 Performanță ridicată:

- Proprietățile mecanice și conductivitatea termică oferă performanțe superioare în aplicații MEMS.

## 5 Exemple de Dispozitive MEMS Realizate din Poli Si-Ge

### 1. Senzori:

- Detectoare de presiune și vibrații.



Fig. 12 și 13: Detectoare de vibrații și tensiune

- Senzori termici utilizați în industria aerospațială.

### 2. Comutatoare RF MEMS:

- Utilizate în telecomunicații pentru comutarea semnalelor la frecvențe înalte.

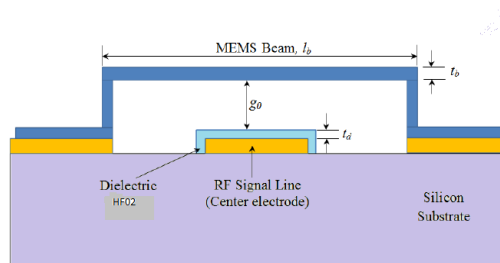


Fig. 14: comutor RF MEMS

### 3. Dispozitive optice:

- Micro-oglinzi și filtre utilizate în telecomunicații și aplicații biomedicale.

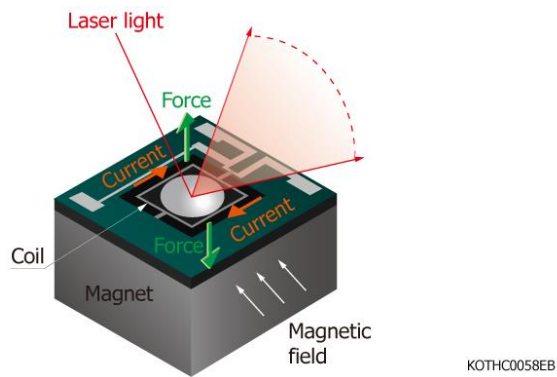


Fig.15 : Micro-oglință

### 4. BioMEMS:

- Dispozitive utilizate în livrarea controlată a medicamentelor și în biosenzori.

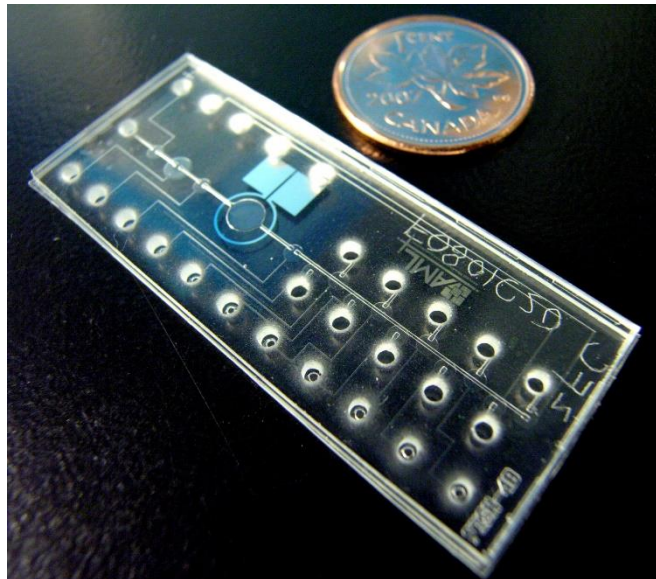


Fig.16: BioMEMS

În concluzie, Siliciul cu germaniu policristalin (poli Si-Ge) este un material esențial în tehnologia MEMS datorită versatilității sale, oferind proprietăți mecanice, termice și electrice ajustabile. Adaptabilitatea sa îl face ideal pentru aplicații diverse, de la senzori și actuatore la dispozitive optoelectronice, contribuind semnificativ la avansul tehnologic modern.

### **Bibliografie:**

1. D. Ionescu, Note de curs
2. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59497-7\\_227](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59497-7_227)
3. [https://www.researchgate.net/publication/270213415\\_Poly-SiGe\\_a\\_superb\\_material\\_for\\_MEMS](https://www.researchgate.net/publication/270213415_Poly-SiGe_a_superb_material_for_MEMS)
4. <https://ro.wikipedia.org/wiki/Germaniu>
5. <https://ro.wikipedia.org/wiki/Siliciu>
6. <https://www.cs.cmu.edu/~mihaib/articole/mems/mems-html.html>
7. <https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon%E2%80%93germanium>
8. <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/lowtemperature-lpcvd-mems-technologies/D5745DF300A588C4A15FE7B7A5E34AA3>
9. <https://www.annealsys.com/applications/rtp-rtcvd-processes/rtcvd-processes.html>