

The background of the slide is a light gray gradient. It is decorated with several realistic water droplets of various sizes, scattered in the corners. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The largest droplet is in the top-left corner, while others are smaller and more numerous in the other corners.

Materijali za mikrosisteme

Materijali u izradi mikrosistema

- Mikrosistemi su bazirani na Si kao osnovnom materijalu
 - monokristalni silicijum - monoSi
 - polikristalni silicijum- polySi
- Osim Si u dosta veliku primenu imaju i njegova jedinjenja
 - silicijum dioksid- SiO_2
 - silicijum nitrid- Si_3N_4
 - silicijum karbid- SiC

Ostali materijali za mikrosisteme

- GaAs
- Kvarc
- Piezoelektrični materijali
- Polimeri

Silicijum-Si

- Najrasprostranjeniji element na planeti. Nalazi se u prirodi u obliku jedinjenja sa drugim elementima
- Monokristalni Si – osnovni materijal za supstrat kod Mikrosistema
- Osobine Si koje ga čine pogodnim za primenu:
 - mehanički stabilan materijal koji poseduje čvrstinu čelika, a lak je poput aluminijuma
 - u mehaničkom smislu ne poseduje histerezis – idealan za senzore i pokretače
 - moguća je izrada izrazito ravnih površina silicijuma - dobijanje preciznih tankih filmova i obavljanje preciznih elektromehaničkih funkcija

- poluprovodni materijal čija se provodnost može menjati dopiranjem
- lak za integrisanje drugih materijala u okviru struktura
- strukturno stabilan na povišenim temperaturama - ima visoku temperaturu topljenja
- poseduje malu vrednost termičkog koeficijenta širenja
- postoji razrađena tehnologija proizvodnje silicijumskih struktura

Monokristalni silicijum

- Ima uređenu kristalnu strukturu – anizotropan materijal
- Dobija se metodom Čohlarskog
- Dobijeni ingoti mogu biti prečnika 100mm - 300mm
- Ingoti se seku na pločice debljine 500 μ m – 1mm
- Površine pločica prate određenu kristalografsku ravan kristala – dobija se materijal različitih osobina
 - Si(100) - najlakši za obradu- sadrži najmanji broj atoma na osnovnoj ravni
 - Si(110) - najčišće površine u izradi
 - Si(111) - najkraće veze između atoma - najčvršća površina → najteži za obradu

Polikristalni silicijum – poly Si

- Sastoji se od mnogo zrna monokristalnog Si proizvoljne orijentacije
- Izotropan materijal – Ne poseduje uređenu kristalnu strukturu u okviru zapremine
- Čvršći od monokristalnog Si
- Obično je visokodopiran - dobar električni provodnik
- Nanosi se na površinu Si supstrata radi formiranja lokalizovanih provodnih oblasti
- Za izradu provodnih mikrostruktura

Jedinjenja silicijuma

➤ Silicijum dioksid- SiO_2


- dobar električni i termički izolator sa niskim koeficijentom termičkog širenja
- dosta jeftin
- pogodan kao materijal za maskiranje u procesu litografije i kao materijal za žrtveni (potporni) sloj kod površinskog mikromašinstva
- jednostavan za dobijanje-Termička oksidacija
 - suva oksidacija - zagrevanje silicijuma u atmosferi kiseonika
 - vlažna oksidacija - izlaganje silicijuma vodenoj pari

➤ **Si₃N₄ - silicijum nitrid**

- sprečava difuziju vode i drugih jona - otporan na oksidaciju i druge nagrizajuće reagense
- maskirajući materijal u procesima dubinskog nagrizanja
- izolacioni materijal visoke dielektrične čvrstoće (ima visoku vrednost probojnog napona)
- slojevi se nanose hemijskim neparavanjem iz gasne faze (CVD)
 - pod niskim pritiskom (LPCVD)
 - uz pomoć plazme (PECVD)



➤ **SiC - silicijum karbid**

- ima visoku tačku topljenja
 - otporan na hemijske reakcije - maskirajući materijal u procesima mikromašinstva
 - ima visoku mehaničku stabilnost
- 

➤ Piezootporni silicijum

- Promena otpornosti materijala pri primenjenom naprezanju - efekat piezootpornosti.
- Dopirani silicijum n ili p tipa je piezootporni materijal
- Kristalni silicijum je anizotropan materijal - promena otpornosti - ΔR je izrazito zavisna od usmerenosti primenjenog naprezanja - σ , a koeficijent proporcionalnosti predstavlja matrica piezootpornih koeficijenata π .

$$[R] = [\pi] [\sigma]$$

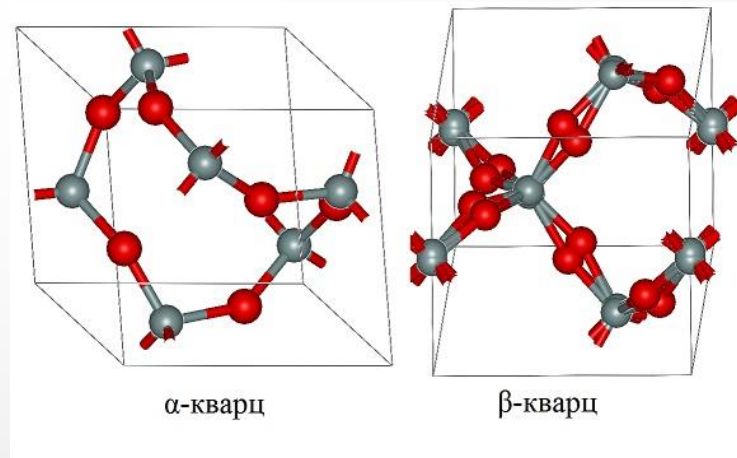
- Nedostatak je izrazita osetljivost piezootpornosti od temperature

GaAs - galijum-arsenid

- Poluprovodno jedinjenje - teži za proizvodnju od Si
- Pogodan za integraciju elektronskih i optikomponentata na jedinstvenom supstratu
- Ima visoku pokretljivost nosilaca
- Dobar termički izolator
- Posедуje nisku mehaničku čvrstoću

Kvarc

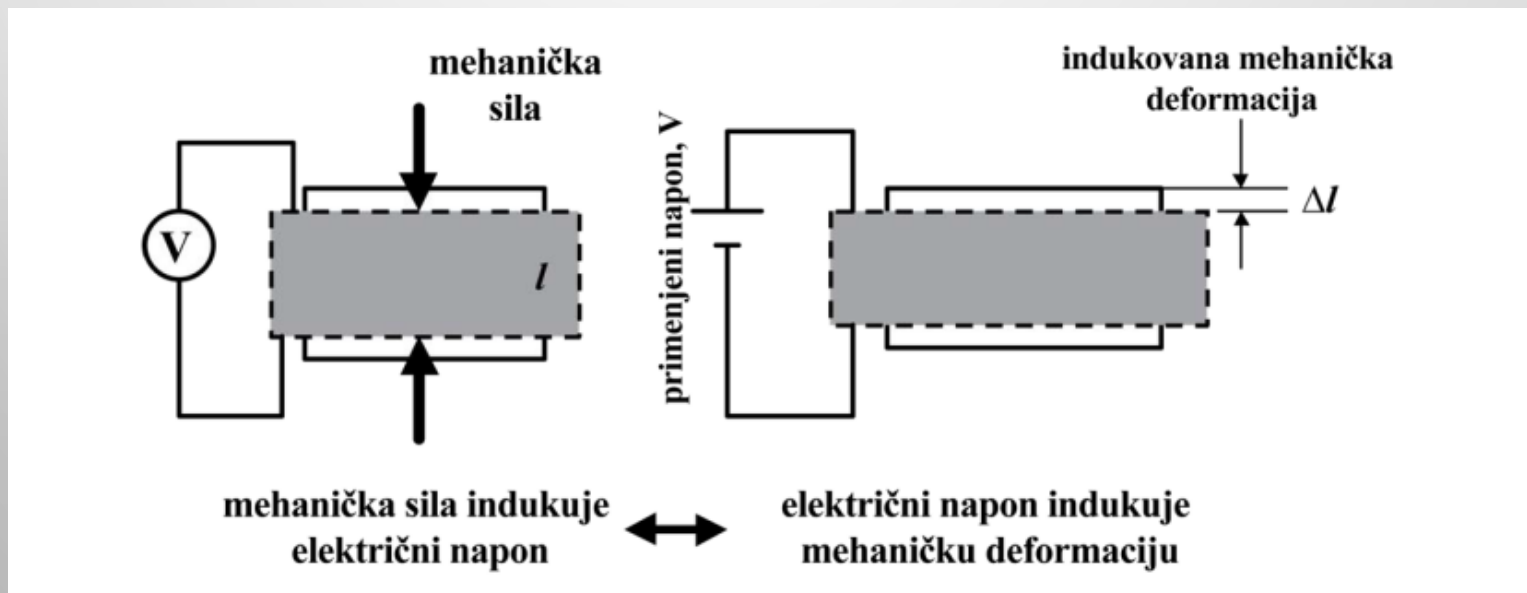
- jedinjenje SiO_2 sa tetraedarskom strukturom



- izrazito dimenziono stabila
- piezoelektričan materijal
- odličan električni izolator
- težak za mašinsku obradu - obrađuje se hemijskim nagrivanjem

Piezoelektrični materijali

- Piezoelektrični materijal izložen dejstvu mehaničke sile na svojoj površini indukuje naelektrisanje koje je proporcionalno primenjenoj sili
- Merenjem potencijalne razlike koja postoji na suprotnim stranama komada materijala može se odrediti vrednost primenjene sile.
- Ovi materijali poseduju i obrnuti piezoelektrični efekat kada se indukuje mehanička deformacija komada materijala usled primenjene potencijalne razlike na njegovim stranama.



- Prirodni piezoelektrični materijali su kvarc i turmalin, a veštački koji se najčešće koriste u mikroinženjerstvu su cink-oksidi i PZT (PbZrTiO_3 – olovo cirkonijum titanat).
- Dve važne grupe materijala se koriste kod piezoelektričnih senzora: **piezoelektrične keramike i specijalni kristali.**
- **Keramike** (kao što je PZT) se proizvode sinterovanjem i poseduju piezoelektričnu konstantu, koja može biti dva reda veličine veća nego kod kristalnih materijala. Nažalost, ova visoka osetljivost, je praćena lošom dugotrajnom stabilnošću. Piezoelektrična keramika može da se posmatra kao namagnetisana gvozdena šipka (ili magnetna kaset). Magnetizam se naknadno „unosí“ u materijal i može se menjati vremenom.
- **Monokristali** (kao što su turmalin, kvarc, galijum fosfat – GaPO_4) su drugačiji. U njihovom slučaju je specifična struktura kristalne rešetke odgovorna za piezoefekat. U principu su kristali manje osetljivi, ali imaju značajno višu, gotovo beskonačnu dugotrajnu stabilnost.
- Neki od materijala koji se koriste – naročito galijum fosfat i turmalin – imaju izuzetnu stabilnost u širokom temperaturnom opsegu, tako da mogu da se koriste na temperaturama do 1000°C .

- Uspon piezoelektrične tehnologije je zasnovan na brojim prednostima. Iako su piezoelektrični senzori elektromehanički sistemi koji reaguju na pritisak, merni element gotovo da ne trpi nikakvu deformaciju (obično dolazi do ugiba od nekoliko mikrometara).
- To je jedan od razloga zašto su ovi senzori toliko robusni i zašto imaju tako visoku sopstvenu frekvenciju i linearnost, čak i u najtežim uslovima.
- Piezoelektrična tehnologija je neosetljiva na elektromagnetna i radioaktivna zračenja.
- Jedna od mana piezo senzora je njihova primena kod statičkih merenja. Statičke sile proizvode određenu količinu elektriciteta na površini piezoelektričnog materijala. Prilikom rada sa uobičajenim elektronikama i materijalima koji nisu savršeno izolovani, dolazi do kontinualnog gubitka elektriciteta, što proizvodi stalni gubitak signala. Povišene temperature proizvode dodatni pad unutrašnje otpornosti, tako da se samo materijali sa visokom impedansom mogu koristiti u takvim uslovima merenja.

Primer – Piezo senzori

- Sila koja deluje na piezo senzor je direktno proporcionalna električnom izlazu (signalu) odnosno količini elektriciteta.
- Ova činjenica omogućava pouzdana merenja procesnih sila u mnogim industrijskim aplikacijama. Odnos između sile koja deluje i generisanog naelektrisanja ne zavisi od veličine i oblika piezo kristala, već samo od materijala. Važi sledeći obrazac

$$Q = q_{11} \cdot n \cdot F$$

- gde je n-broj kvarcnih elemenata povezanih u seriju, F-mehaničko opterećenje, q_{11} -konstanta materijala, Q-generisana količina elektriciteta.
- U principu osetljivost piezo senzora ne zavisi od mernog opsega. Ova činjenica obezbeđuje osnovu za precizna i pouzdana merenja u širokom mernom opsegu, preko nekoliko podopsega (dekada).
- U praksi to znači da 5kN može biti izmereno isto precizno sa 140kN senzorom kao i sa 5kN senzorom.



Polimeri

- plastika
 - adhezivi
 - pleksiglas
-
- Karakteristike
 - jeftini i jednostavni za proizvodnju
 - lagani i otporni na koroziju
 - niska tačka topljenja
 - visoka električna otpornost
 - termoplastične je lako oblikovati
 - termostabilni imaju dobru mehaničku čvrstoću do 350°C
 - sačinjeni od dugih lanaca organskih (ugljovodonikovih) molekula

Polimeri u mikrosistemima

- Kao fotorezist u fotolitografiji
- Kao osnovni kalup za izlivanje kod LIGA procesa
- Tanki filmovi kao električni izolatori ili kao dielektrici u kapacitivnim strukturama
- Provodni polimeri kao “organski” supstrati (poliester polietilen tetaftalat (PET) i polietilen naftalat (PEN)).
- Feroelektrični polimeri poseduju i piezoelektrični efekat
- Tanki Langmuir-Blodgett (LB) filmovi se koriste za višeslojne mikrostrukture
- Kao prevlake u kapilarama za pokretanje mikrofluida
- Koriste se za elektromagnetnu i radiofrekventnu zaštitu
- Idealni materijali za enkapsulaciju i pakovanje

Provodni polimeri

- Polimeri su dobri izolatori sa specifičnom otpornošću reda $10^{12} - 10^{14}$ Ωm
- Neki polimeri se mogu učiniti električno provodni postupcima
 - pirolize (u prisustvu amina)
 - dopiranjem (uvođenjem metalnih atoma u matrice molekula polimera)
 - impregnacijom provodnim vlaknima (zlato, srebro, aluminijum, čelik)

Langmuir-Blodgett (LB) filmovi

- Sadrže jedan ili više monoslojeva organskog materijala nanešenog na površinu supstrata potapanjem u rastvor
- Kontrolisanjem sastava nanešenih slojeva mogu se dobiti materijali koji pokazuju određene osobine
 - feromagnetne (bioimplanti)
 - piezoelektrične (zvučni pretvarači)
 - piroelektrične (senzori zračenja)
 - optičke (optička vlakna)
 - adsorpcione (hemijski senzori)

SU-8 fotorezist

- Polimer na bazi epoksi smole osetljiv na UV zračenje
- Ima osobine negativnog fotorezista (deo izložen svetlosti je nerastvorljiv)
- Nanosi se kao tanak film debljine od $1\mu\text{m}$ do 2 mm
- Pogodan za izradu debelih filmova u 3D strukturama kod kojih postoji veliki odnos dimenzija
- Jeftin i lak za nanošenje

Materijali za pakovanja

- Uključuje mnoštvo različitih materijala od plastike do nerđajućeg čelika
- Primer - senzor pritiska

