

Въведение в микро- и наносистемите – понятия, основни принципи и материали за реализирането им

Доц. д-р Мария Александрова

Микросистема – съвкупност от микроустройства, интегриращи функциите на сензори, интегрални схеми, обработващи сигналите от сензорите и актуатори (изпълнителни механизми) в миниатюрно изпълнение. Когато системите изпълняват не само електрически, а и механични функции (микропремествания), те се наричат микроелектромеханични системи (MEMS) или наноелектромеханични системи (NEMS).

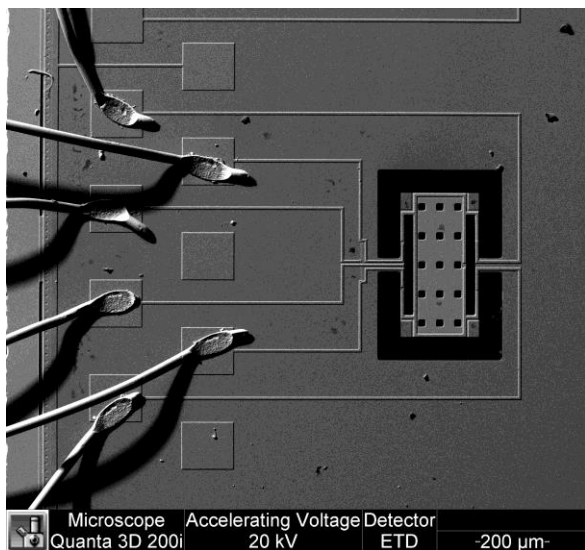
Микро- = 10^{-6} m; Нано- = 10^{-9} m

ISO 80004-1: 2010: Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms

ISO/TS 27687:2008: Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects

Микросистемата е изградена от функционални елементи с микрометрични линейни размери.

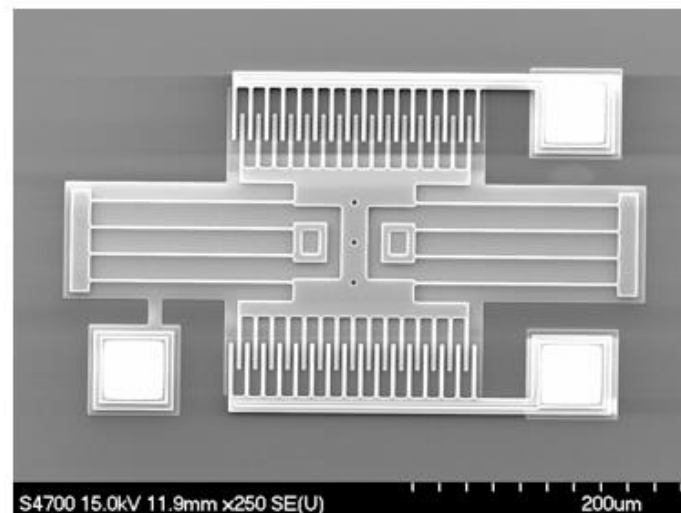
Наносистема - или е изградена от функционални елементи с нанометрични линейни размери или използва материали, които са дефинирани като наноматериали, тоест една от дименсиите им (дебелината) е в нанометри, а може и да са структурирани под формата на обекти в наноскалата (нанопори, нанонишки, нанотръбички).



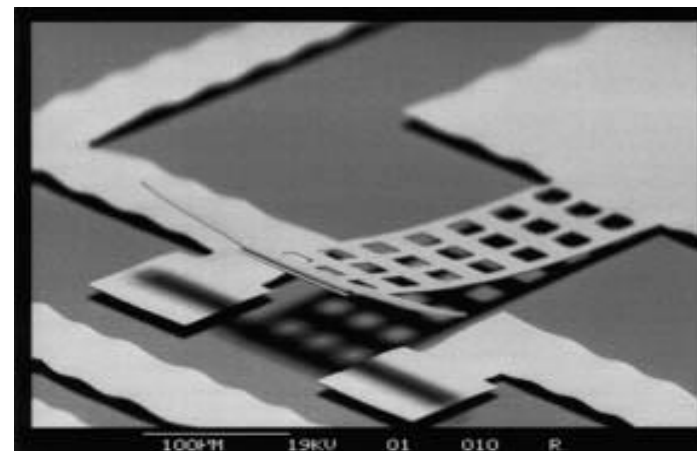
Пиезоелектричен микросензор
за налягане

Сензорът е устройство, преобразуващо неелектрическите величини в електрически (температура, налягане и др.).

Актуаторът е изпълнителен механизъм, който генерира механична реакция под действие на електрическия сигнал на входа му (движещи се части).

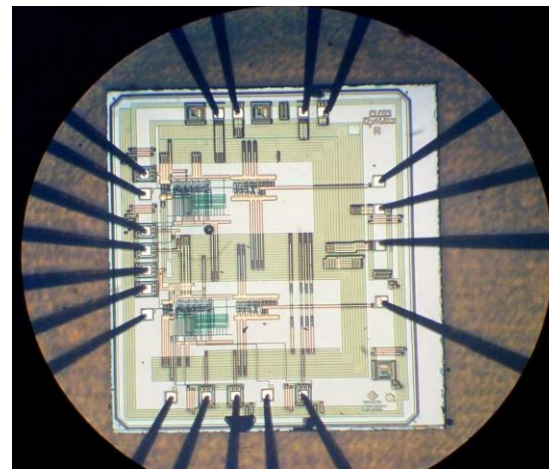
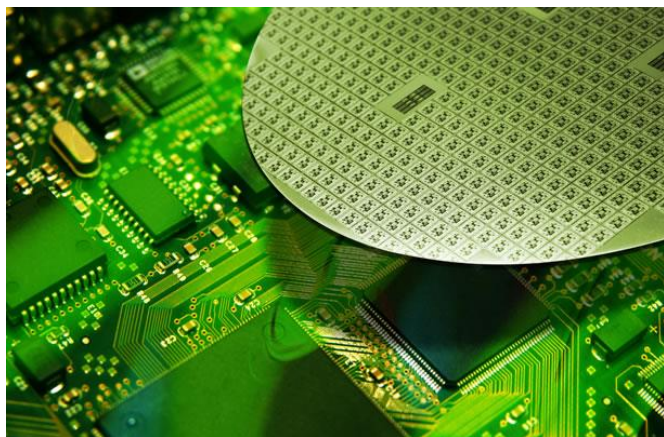


Капацитивен микросензор
за натиск



Термичен микроактуатор

Стремежът е всички функционални елементи да са изготвени върху един общ носител (подложка) чрез технологичните процеси, използвани за създаване на интегрални схеми (микрочипове), които са базирани на силициевата технология. Защо стремежът е към интеграция на тези функции в един чип?



Предимства:

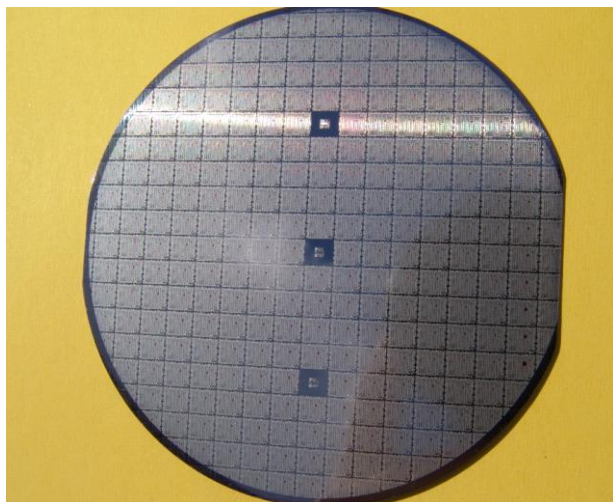
- няма проводящи връзки между съседни чипове: по-висока надеждност, по-голямо бързодействие, по-малки загуби и затихване на сигнала;
- по-малка площ;
- по-ниска консумация;
- уеднаквяват се топлинните линейни разширения на компонентите и се подобрява топлинната устойчивост.

Предизвикателство: адаптиране на процесите за планарна технология към 3-мерна.

Подобно на микроелектронните изделия, МЕМС елементите използват различни материали, обработени в подходящ вид – обикновено под формата на тънки (няколко десетки до няколко стотин нанометра) и/или дебели слоеве (няколко микрометра).

Класификация на материалите използвани в технологията на МЕМС според предназначението им:

- **Основни** – те са основните полупроводници (ПП) (*силиций*, германий, галиев арсенид), база за изготвяне на МЕМС и микроелектронните (МЕ) изделия.



Силициева пластина, служеща като носител, в който се изграждат микросистеми

Защо силицият се използва, като основен материал за носител в МЕМС технологията?

- Той има полупроводникови свойства, които могат да се контролират и да варират в широки граници чрез внасяне на примесни елементи.

- Технологичните процеси и оборудване, свързани с обработката на силиция, са вече разработени за производството на интегрални схеми, което улеснява интеграцията на сензорите/актуаторите на една подложка с електрониката, обработваща сигналите от/към тях.

- Модулът на Юнг, позволява силицията да има подходяща механична устойчивост, за да обединява в едно отделните градивни компоненти на системата, като носител (подложка).

- След ецване (химическо или физическо отнемане на монослоевете от силициевата пластина) модулът на Юнг намалява, което позволява при намаляване на дебелината на силициевата пластина тя от твърда подложка да се превърне в гъвкава. Това свойство е полезно за направата на мембрани при изготвянето например на сензори за налягане, микрофони в телекомуникационните устройства и др.

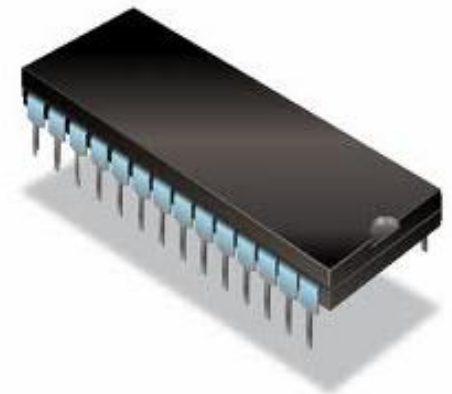
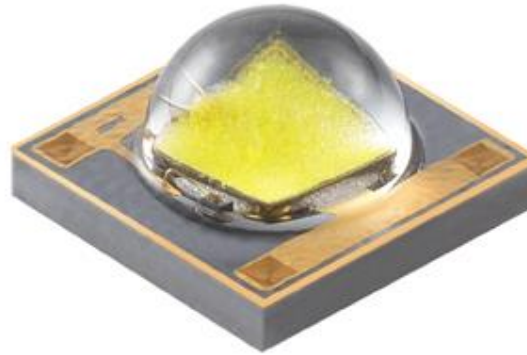
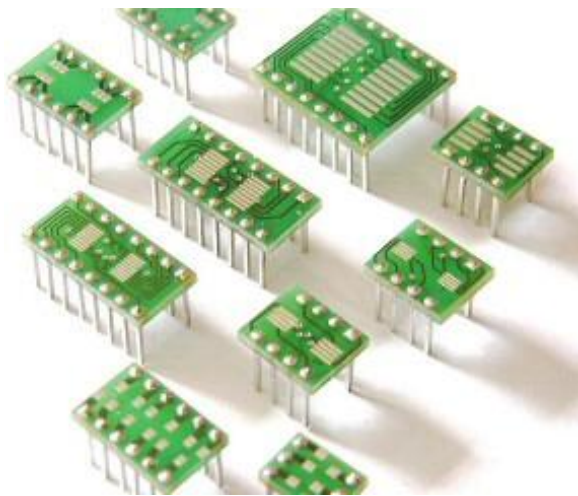
- Не проявява механичен хистерезис, тоест след премахване на въздействието предизвикващо деформация на силиция, той възстановява изходното си положение. Това го прави подходящ за елементи, включващи в принципа си на работа механично отместване.

- Има малък температурен коефициент на линейно разширение ($\sim 3 \cdot 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$), така че при загряване вследствие работата на вградените в него компоненти няма опасност от индуциране на термични и механични напрежения.



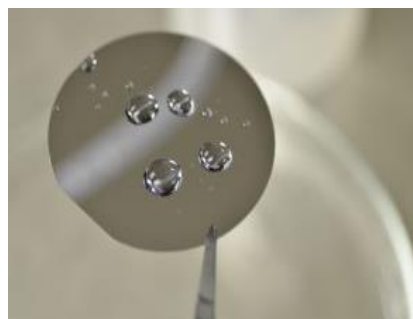
Изтънена силициева пластина
– гъвкава след ецването.

Конструкционни – за изработване на корпуси и като носители, които осигуряват нужната механична здравина за монтиране на други елементи. Това са метали и сплави, стъкла, керамики, пластмаси.



Технологични – използват се през отделните технологични стъпки, нужни за изграждането на MEMS или ME изделия:

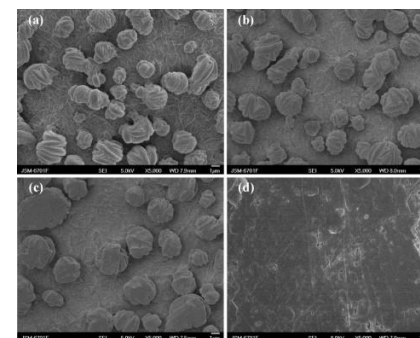
- абразивни материали за полиране на силициевите пластини и отстраняване на дефекти;



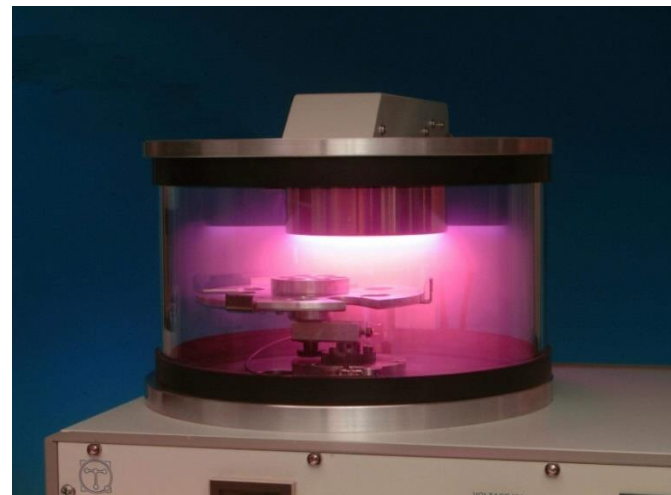
- почистващи разтвори;

- химически реагенти при създаване на релеф с определена геометрична форма (фоторезисти, проявители, ецващи разтвори);

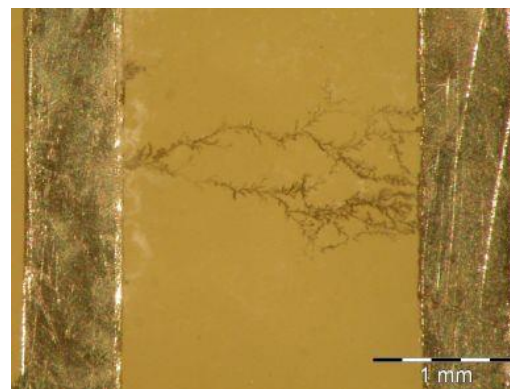
- дифузанти – легиращите примеси или веществата, необходими за създаване на области с определен тип проводимост и нужна концентрация;



- газове - реактивни съставки; транспортни среди, пренасящи вещества от една реакционна зона в друга; йонизируеми среди при плазмени процеси, за охлаждане, като защитна атмосфера.



Спомагателни – осигуряват необходимите условия при провеждането на технологичните операции: дейонизирана, дестилирана вода; материали за изработване на приспособления – тefлонови държатели, кварцови инструменти.



Електро-
миграция

Класификация на материалите използвани в технологията на МЕМС според специфичното им съпротивление

Материал	Специфично съпротивление, $\Omega \cdot \text{cm}$	Класификация
Сребро (Ag)	10^{-4}	Метал
Мед (Cu)	$10^{-5,8}$	Метал
Алуминий (Al)	$10^{-5,5}$	Метал
Платина (Pt)	10^{-5}	Метал
Германий (Ge)	$10^{-3} - 10^{1,5}$	Полупроводник
Силиций (Si)	$10^{-3} - 10^{4,5}$	Полупроводник
Галиев Арсенид (GaAs)	$10^{-3} - 10^5$	Полупроводник
Оксид (Oxide)	10^9	Изолатор (Диелектрик)
Стъкло (Glass)	10^{10}	Изолатор (Диелектрик)
Кварц (Quartz)	10^{16}	Изолатор (Диелектрик)

Сред критериите за избор на **метали** за електроди, контактни площадки и електрически връзки в миниатюрно изпълнение, са ниска температура на технологична трансформация под формата на тънък слой, адхезионна здравина към подслоя, формиране на специфичен тип контакт (Омов или Шотки), спойваемост, корозионна устойчивост, сходство на температурния коефициент на линейно разширение с този на подслоя, температурен коефициент на изменение на съпротивлението, склонност към окисляване.

По отношение на адхезията, за много метали тя не е достатъчно силна към типично използваните подложки (носителни) в микротехнологиите. Адхезията зависи от няколко фактора:

- вида на материала, с чиято повърхност контактува метала,
- грапавостта на тази повърхност,
- методът и условията на отлагане на металния слой,
- дебелината на слоя.

Благородните метали нямат добра адхезия към силиций или силициев диоксид, затова като междинен тънък слой (5-15 нм) се отлага метал с добра адхезия към въпросните материали, като например титан (Ti) или хром (Cr).

Адхезия на метални слоеве към различни материали в МЕМС

	Si	SiO ₂	полимери
Al	Слаба/средна	средна	средна
Au	слаба	слаба	слаба
Cr	висока	висока	висока
Cu	слаба	слаба	слаба
Ni	слаба	слаба	средна
Pt	слаба	средна	слаба
Ta	висока	висока	средна
Ti	висока	висока	висока

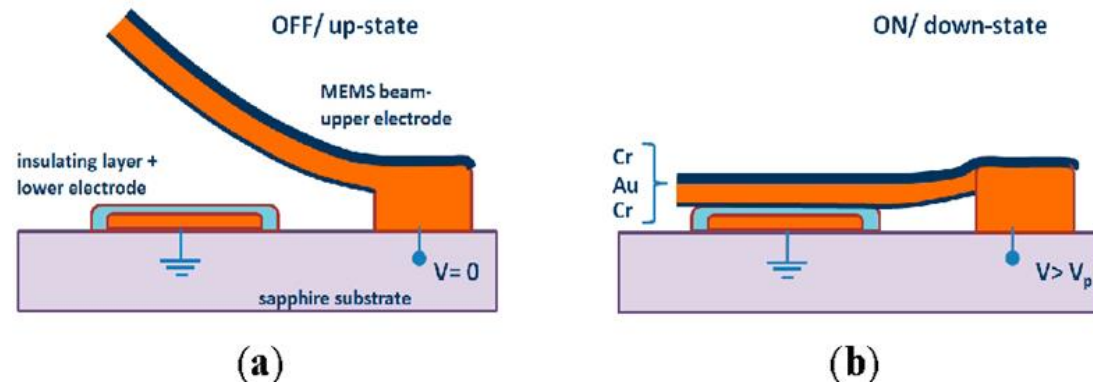
Електрически свойства на металите, използвани в МЕМС технологията.

	Електрическо съпротивление ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TKR, $\times 10^{-3}/\text{K}$	Спойваемост	Бондиране	Собствен пасивиращ оксид
Ag	1,62	3,8	Да	Al	Не
Al	2,71	3,6	Трудно	Au, Al	Да
Au	2,26	8,3	Да	Au, Al	Не
Cr	12,6	3	Не	Не	Да
Cu	1,71	3,9	Да	Au	Не е пасивиращ
Ni	7,12	6,9	Не	Не	Да
Pt	10,7	9,9	Да	Al	Не
Ta	13,4	3,8	Да	Al	Да
Ti	39	3,8	Не	Не	Да
W	5,39	4,5	Не	Не	Не

- В някои случаи се цели TKR да е нисък, за да има стабилност на електрическото поведение на микросистемите и висока надеждност.
- Сензори, като температурните, пък са преднамерено проектирани да използват тази промяна в TKR, за да регистрират изменението на температурата. За такива цели често се използва платината.
- Алуминият, титанът и хромът формират собствен оксиден слой, който предпазва метала от по-нататъшно силно окисление. При медта, оксидът спомага за нейното кородиране. Трябва да се вземат мерки за отстраняване на оксидния слой от повърхността непосредствено преди реализирането на електрическия контакт, за да има спойваемост.

Механични свойства на металите, използвани в MEMC технологията.

Материал	Модул на Юнг, GPa
Ag	83
Al	70
Au	78
Cr	279
Cu	130
Ni	200
Pt	168
Ta	186
Ti	116
W	411

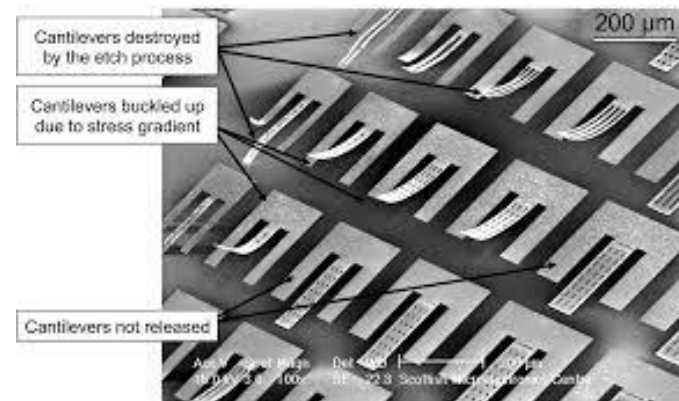


микрореле

Semantic Scholar

Те са важни при изграждането на подвижни елементи от микросензори или микроактуатори, като микрогреди, мембрани (диафрагми), микропружини, еластични връзки и др. Тогава критериите за избор на метал са **коефициент на еластичност (модул на Юнг), механична якост, износоустойчивост.**

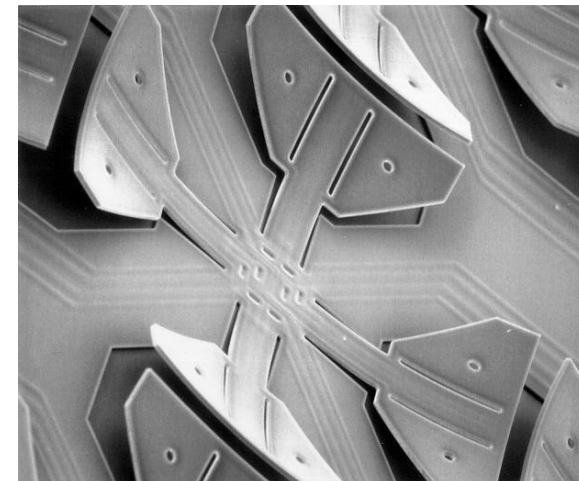
Механичните свойства зависят от чистотата и микроструктурната подредба на слоя, които от своя страна силно се влияят от условията на получаване.



Снимка от електронен микроскоп.

Термични свойства на металите, използвани в MEMC технологията.

	ТКЕ, $\times 10^{-6}/\text{K}$	Топлопроводност, (W/m.K)	Специфичен топлинен капацитет, (J/kg.K)	Температура на топене
Ag	18,9	429	235	1235
Al	23,1	237	897	933
Au	14,2	317	129	1337
Cr	4,9	93,7	450	2180
Cu	16,5	401	384	1358
Ni	13,4	90,7	445	1728
Pt	8,8	71,6	133	2041
Ta	6,3	57,5	140	3290
Ti	8,6	21,9	522	1941
W	4,5	174	132	3695



Често в конструкцията на MEMC, металите участват, като част от микронагреватели и термични микроактуатори, затова тяхната топлопроводност и температурен коефициент на разширение (ТКЕ) също са важни свойства.

Те имат по-голям коефициент на топлинно разширение от полупроводниците и диелектриците, което може да е проблем при нанасяне на метал върху полупроводник (например Al върху Si), поради възникване на термично индуцирани механични напрежения и влошаване на адхезията.

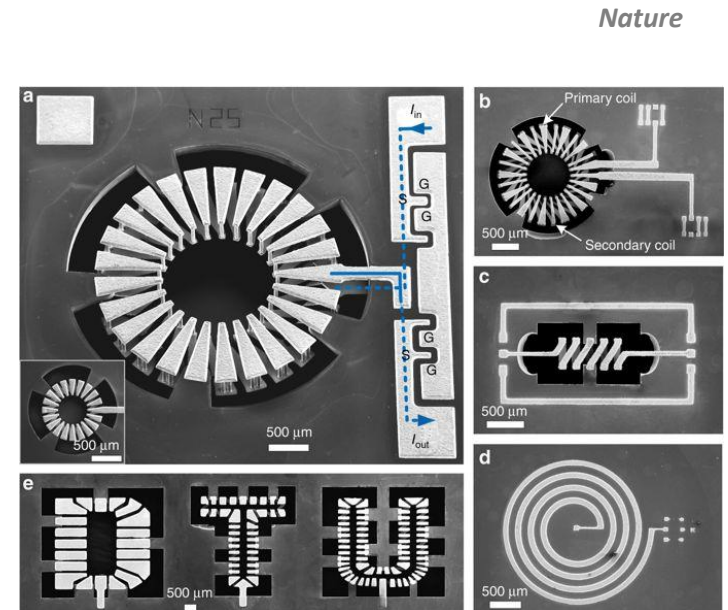
При загряване някои метални частици имат склонност към дифузия в съседни слоеве или пък се засилва окислението на металните повърхности.

Магнитни свойства на материалите, използвани в MEMS технологията.

Магнитномеките материали проявяват слабо магнетизиране, но могат да бъдат лесно намагнитени дори при слаби магнитни полета. Те могат да се използват заедно с електрохимично нанесен метал, за да се формират слойни бобини или трансформатори в микросистемите.

Също така с помощта на магнитни материали могат да се изградят по-сложни микроустройства, като актуатори, микрогенератори и микромотори.

Магнитномеките материали са никел, желязо и кобалт, както и техните сплави Ni-Fe, Co-Fe, Co-Ni-Fe. Магнитнотвърди материали са сплави, като Co-Ni-Pt, Fe-Pt, Co-Pt.



Тороидален микроиндуктор

ПОЛУПРОВОДНИЦИ

СИЛИЦИЙ

- Забранена зона $\sim 1,1$ eV – обуславя темпераурното поведение и консумацията.
- Подвижност на електроните е $\mu_e = 1330$ cm²/V.s – това определя гранична работна честота на силициевите интегрални схеми до около 4 GHz.
- Силицият е анизотропен – електрофизичните му свойства не са еднакви в различните пространствени направления, затова позволява изготвяне на елементи със сложна геометрична форма.
- Специфично съпротивление при стайна температура 230 Ω .cm. Съпротивлението намалява с увеличаване на температурата и зависи от вида и концентрацията на примеси.
- Висока температура на топене (1423°C), позволяваща вграждане на примеси и израстване на силициев диоксид – високотемпературни процеси над 1000°C.

ГЕРМАНИЙ

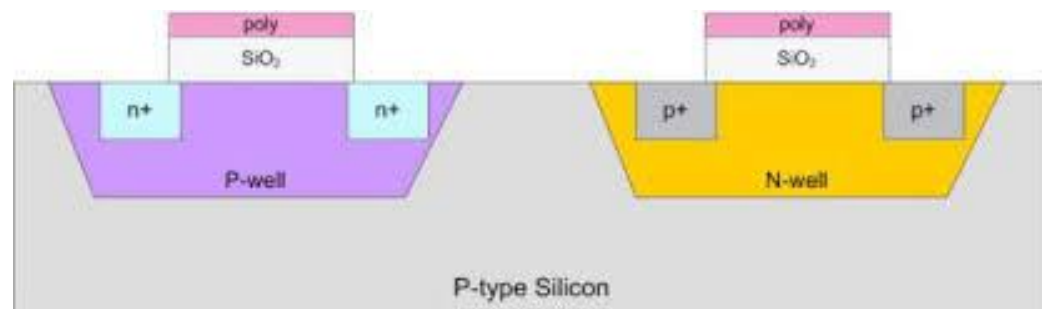
- Ширина на забранената зона 0,72 eV, което ограничава приложението им при високи температури, заради повишаване на утечните токове.
- Подвижност на електроните $\mu_e = 3900$ cm²/V.s, което позволява изграждане на високочестотни прибори над 4 GHz (до около 10 GHz).
- Специфично съпротивление при стайна температура 60 Ω .cm. Не позволява изготвяне на прибори с високо входно съпротивление и проявява високи обратни (утечни) токове.
- Температурата на топене на материала е 960°C, което определя и по-ниските температури на окисление и легиране с примеси, свързано с по-ниски скорости на протичане на тези процеси.

ДИЕЛЕКТРИЦИ

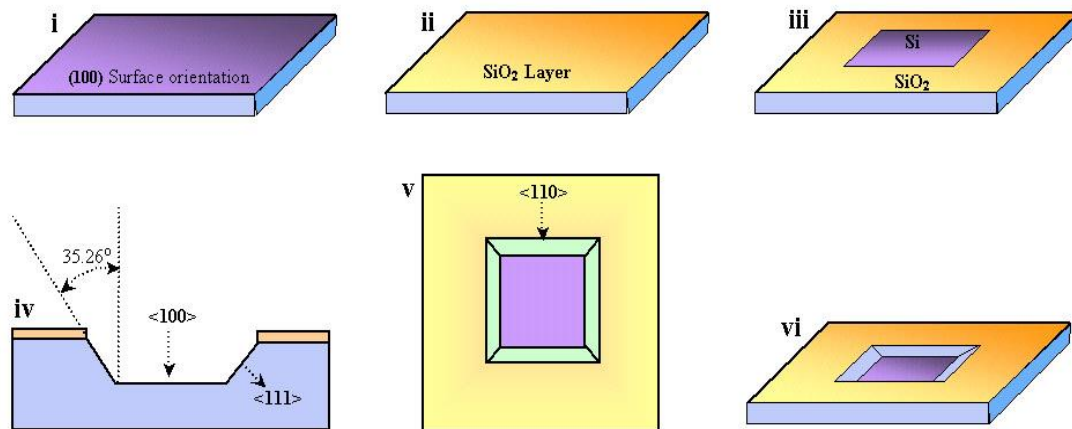
Силициев диоксид (SiO_2)

Има висока химична, механична и термична устойчивост и задоволителна диелектрична проницаемост. Основното му предназначение в микросистемите е:

- 1) като електрически изолиращ слой;
- 2) като защитен (маскиращ) слой, при селективно отнемане (ецване) на части от материал, например от силициевата подложка или при селективна дифузия на примеси за контрол на типа проводимост в полупроводника.



SiO_2 при дифузия



SiO_2 при ецване

Прясно почистена силициева пластина, оставена на въздух за няколко минути се покрива с няколко нанометра SiO_2 .

ДИЕЛЕКТРИЦИ

Силициев карбид (SiC)

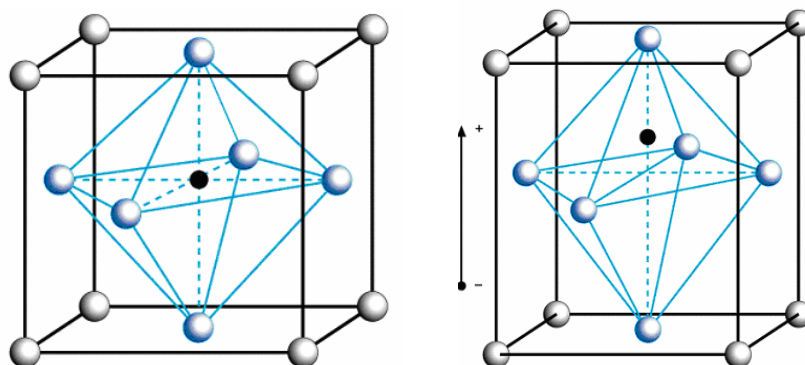
- висока топлопроводимост,
- химическа устойчивост към киселини и основи.

Слоеве от SiC се нанасят върху MEMC компоненти, като защитни и износоустойчиви.

Силициев нитрид (Si₃N₄)

- Този материал има отлични диелектрични (изолаторни) и бариерни (защитни) свойства.
- Si₃N₄ успешно възпрепятства проникване на влага и подвижни йони на алкални метали (натриеви, калиеви), които променят свойствата на материалите и влошават работните характеристики на устройствата.

Пиезоелектрични и пиезорезистивни материали



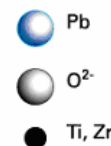
Пиезоелектриците са оксидни съединения:

- Оловно-циркониев титанат (PZT)

- Кварц (SiO_2)

- BaTiO_3

- ZnO



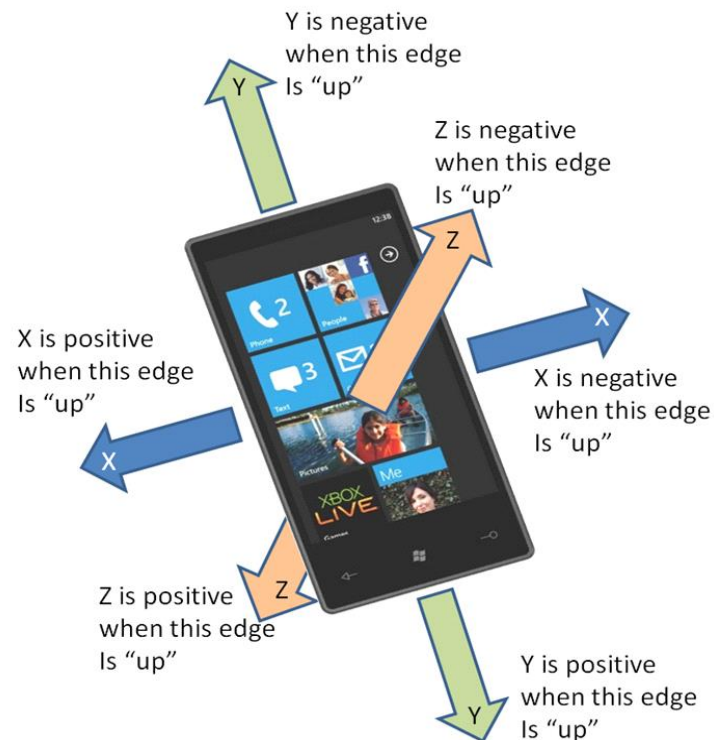
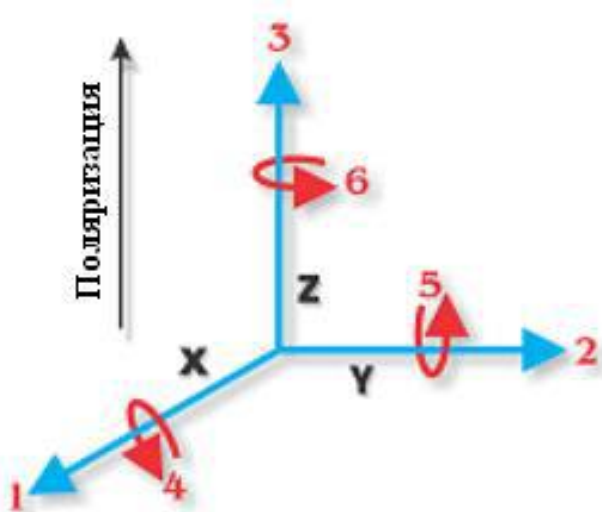
Поляризация на пиезокристал



Един от съвременните подходи е слоевете да се нанасят върху гъвкави подложки (полиетилентерефталат), а не върху твърд носител, за да има допълнително разместване на зарядите при огъване и по-висока степен на компактност. Тогава от съществено значение е добрата механична устойчивост и адхезионна здравина на пиезопокритието.



Пиезоелектричен микрогенераторен елемент върху гъвкав носител, имплантируем в гума на превозно средство.

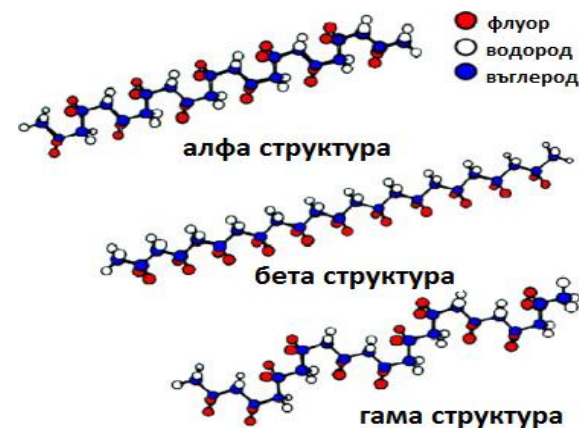


Единицата мярка за реакция на пиезоелектричния материал е пиезоелектричният коефициент (pC/N или pm/V , според режима на работа). Тъй като пиезоматериалите са анизотропни, то стойностите на пиезоелектричния коефициент d не са еднакви за различните направления (d_{33} , d_{31}). Когато се използва на практика ефектът, за оптимална работа на устройството, е важно пиезопреобразувателят да се ориентира така, че посоката на външно въздействие да съвпадне с максималната чувствителност на материала към това въздействие.

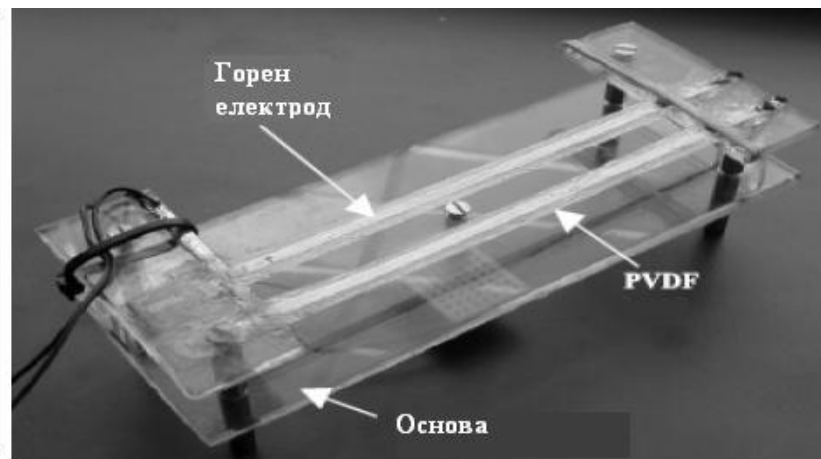
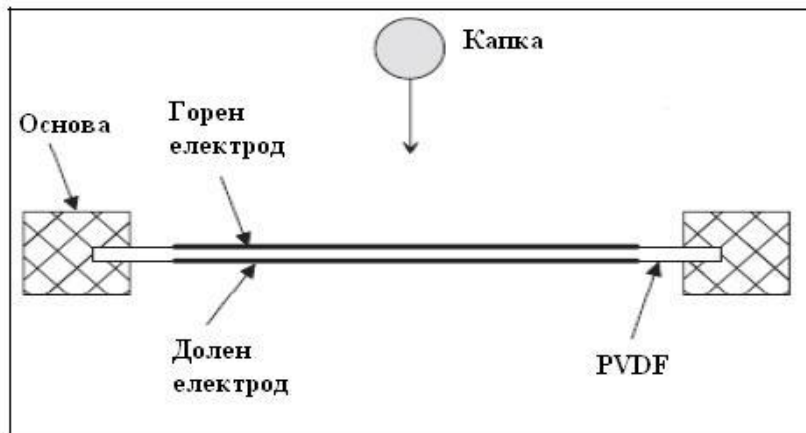
Сравнителна таблица на основните пиезоелектрични материали, намиращи приложение в микроелектрониката.

	PZT	ZnO	PVDF
d_{31} , pC/N	180	5	6-10
d_{33} , pC/N	360	12,4	13-22
g_{31} , Vm/N	0,011	0,36	0,14
g_{33} , Vm/N	0,025	1,57	0,22
k	0,35-0,69	0,33	0,10-0,15
Y, GPa	49-63	30-200	8,3
ϵ_r	1700	10-11	10-12
Технология	Вакуумно разпрашване	Вакуумно реактивно разпрашване	Пулверизиране/центрофугиране

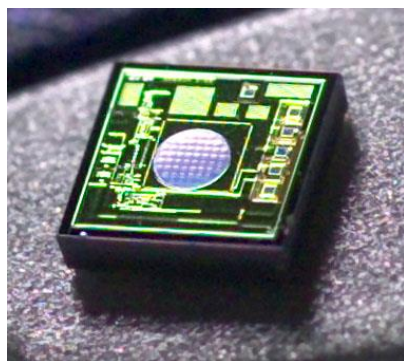
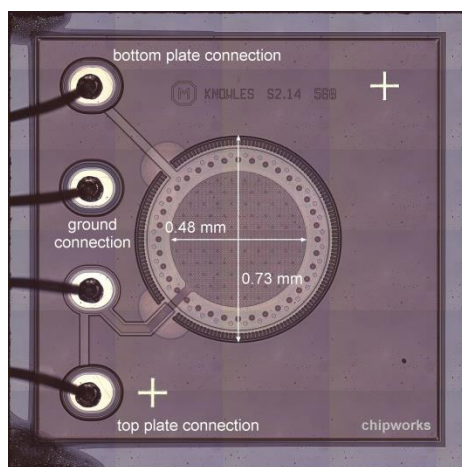
Разположение на молекулните вериги в поляризиран поливинилиден дифлуорид (PVDF) в β -фаза, която е пиезоелектрична.



Приложения в микросистемите (по-често се използва правият пиезоефект)



Пиезоелектричен микрогенератор преобразуващ кинетичната енергия от падащи дъждовни капки в електрическа енергия



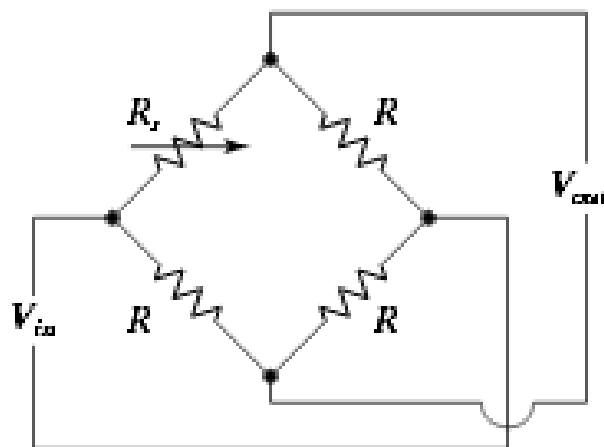
Микрогенератор тип диафрагма като микрофон за GSM апарат

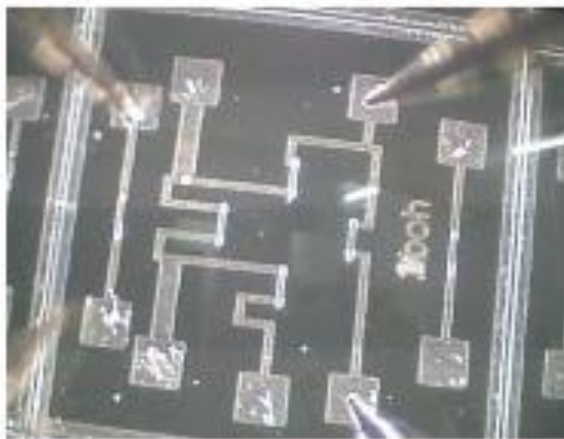
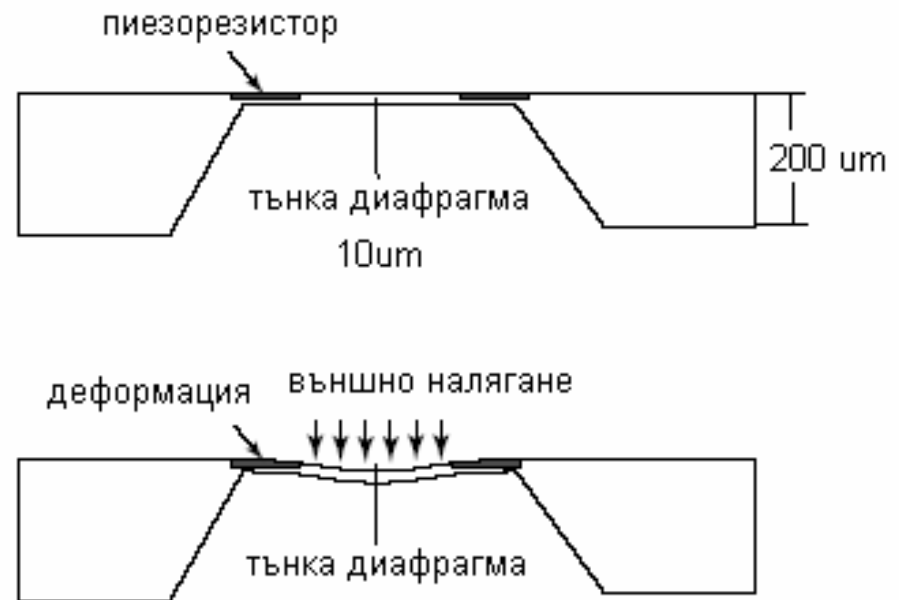
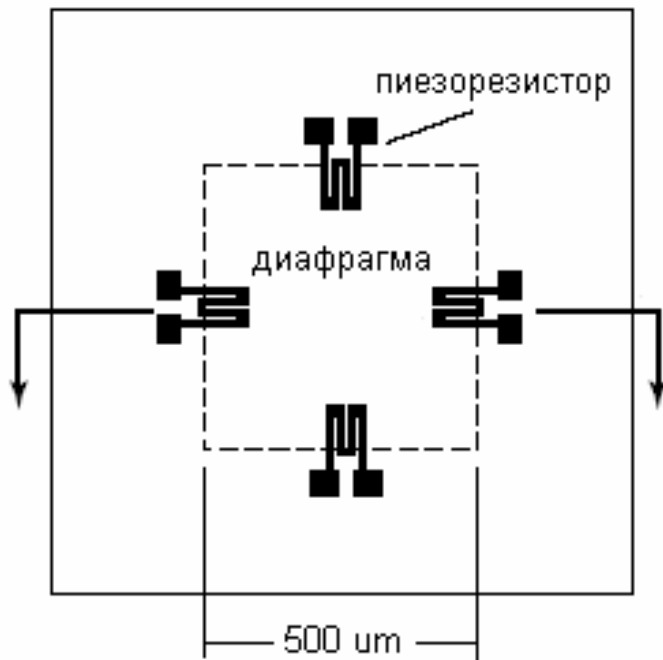
Други приложения

Пиезорезистивен ефект – представлява промяна на електрическото съпротивление на тънък **полупроводников слой (не диелектричен)** при механична деформация. Това означава, че ако през слоя е протичал ток с определена големина, то след деформация стойността на тока ще се промени според това дали съпротивлението на материала намалява или се увеличава.

Този ефект трябва да се разграничава от пиезоелектричния, където има генериране на потенциална разлика или пораждање на напрежение при положение, че преди деформацията то е било нула. Тоест, **пиезорезистивната структура не може да се използва като алтернативен източник на енергия, а само като детектор на деформация, а деформацията може да бъде и статична.**

Типични примери за материали, проявяващи пиезорезистивен ефект са **поликристалният силиций и силициевият карбид (SiC).**





Пиезорезистивен сензор на деформация:
изглед отгоре; напречен разрез и
микроскопска снимка.

БЛАГОДРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!