

МИКРО И НАНО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКИ СИСТЕМИ (МЕМС - НЕМС) И СЕНЗОРИ

Зоран Ђурић



САНУ Мај 2013

Микро и нано електромеханички системи (МЕМС - НЕМС) и сензори

Садржај презентације

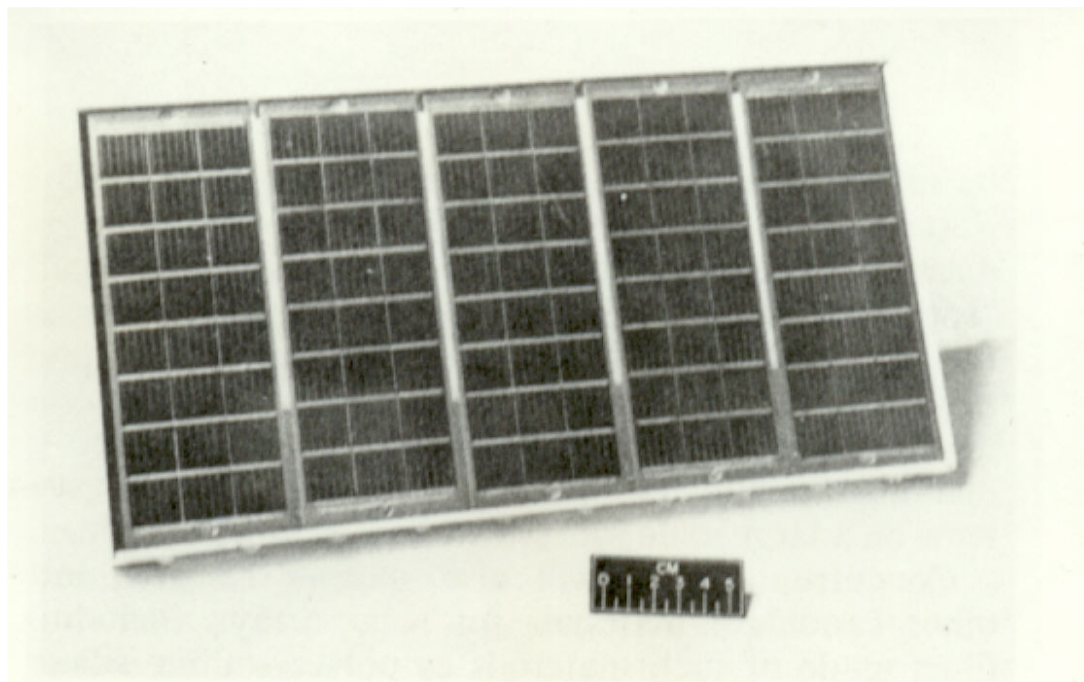
- Важнији научно-истраживачки пројекти
- Стварање услова за научно-истраживачки рад (опремање и развој лабораторије)
- Научно наставне делатности
- МЕМС И НЕМС - Велика тема, велики бизнис, а ствари све мање и мање
- Силицијумски пиезоотпорни сензори притиска
- НЕМС - Наука малих и још мањих ствари: милиметри, микрони, нанометри
- Сензори: мали, а моћни



Важнији научно истраживачки пројекти

- | | |
|---|------|
| ✓ Силицијумске соларне ћелије | 1964 |
| ✓ Високо фреквентни силицијумски планарни транзистори | 1967 |
| ✓ Полупроводнички микрофон | 1968 |
| ✓ Прва силицијумска интегрисана кола | 1969 |
| ✓ MOS транзистор са ефектом поља | 1970 |
| ✓ Si p-i-n фотодетектор | 1975 |
| ✓ Полупроводнички ласер са једним хетероспојем | 1977 |
| ✓ Први MEMS Si сензори притиска | 1983 |
| ✓ InSb инфрацрвени детектори | 1986 |
| ✓ HgCdTe ИЦ детектори за термовизију | 1990 |
| ✓ Трансмитери притиска | 2000 |
| ✓ Микро и наномеханички системи и сензори | 2002 |
| ✓ Сензори притиска - нова генерација | 2007 |
| ✓ Паметни трансмитери притиска и температуре | 2009 |
| ✓ MEMS ИЦ детектори | 2010 |
| ✓ Сензори на бази микро-нано гредица | 2011 |

Силицијумске соларне ћелије (1964)



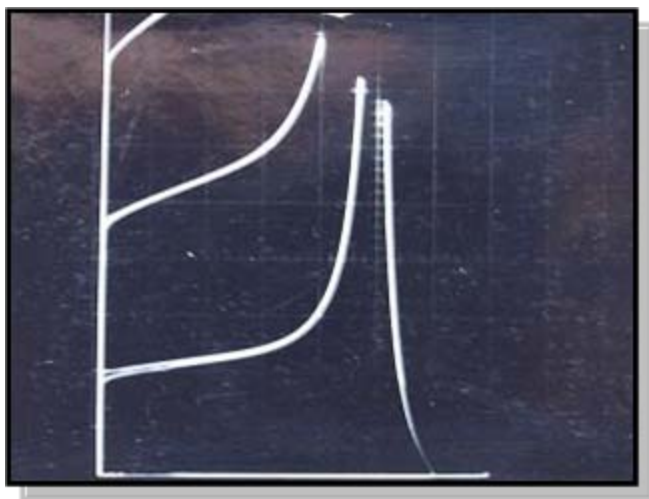
Ове соларне ћелије су произведене пре око 50 година у Одељењу за полупроводнике и специјалне материјале ИХТМ-а

Коефицијент корисног дејства (ефикасност) је био око 8%

Високофреквентни силицијумски планарни транзистори (1967)

Постављене основе планарног процеса што подразумева израду фотомаски, оксидацију силицијума, дифузију бора и фосфора, наношење танких слојева, сечење на чипове и завршну монтажу.

- ❑ Дијаметар силицијумских плочица (20÷30)mm
- ❑ Специфична отпорност (1 ÷5) Ωcm
- ❑ Оријентација (111)



Постигнуте карактеристике
планарних транзистора:

$$V_{\text{CBO}} - 100\text{V}$$

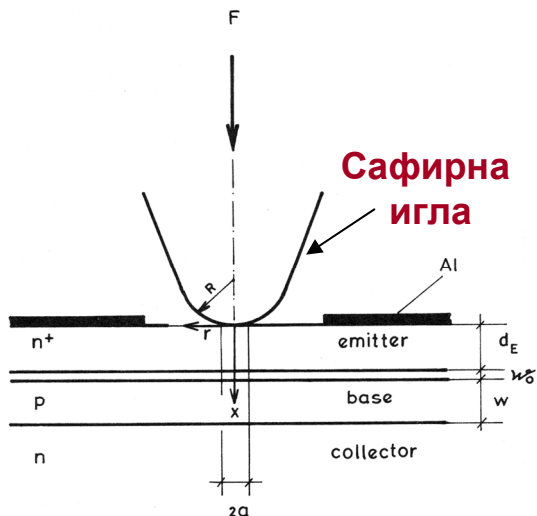
$$V_{\text{CEO}} - 70\text{V}$$

$$h_{21} - 80$$

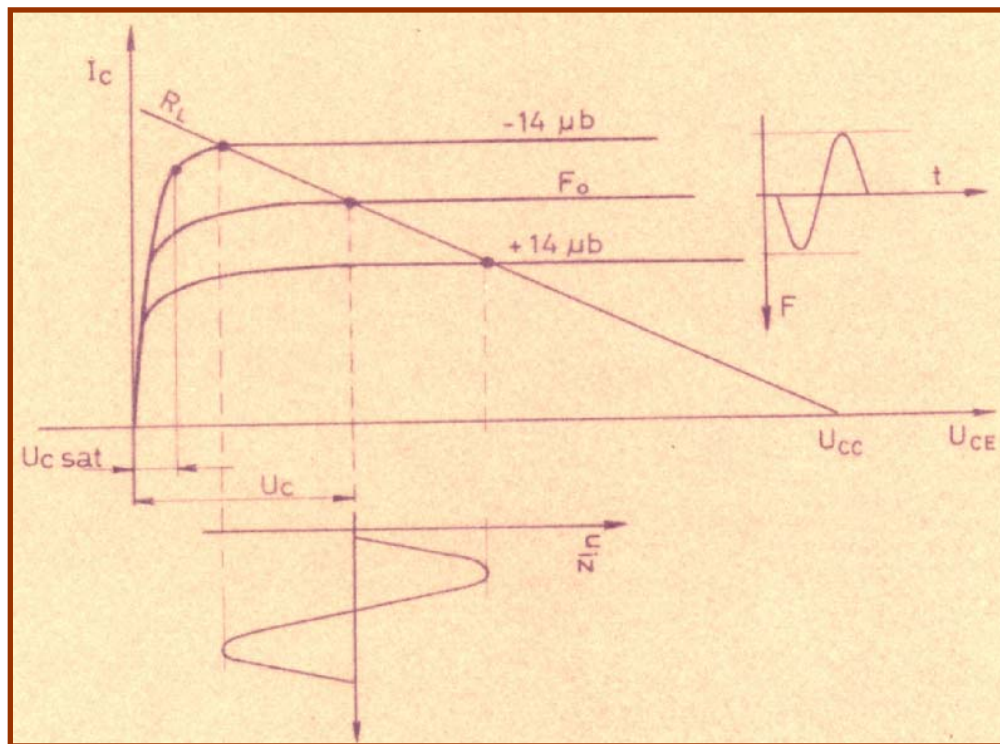
$$f_{\text{T}} - 120\text{MHz}$$

Фамилија колекторских карактеристика снимљених
на трасеру транзисторских карактеристика

Полупроводнички микрофон

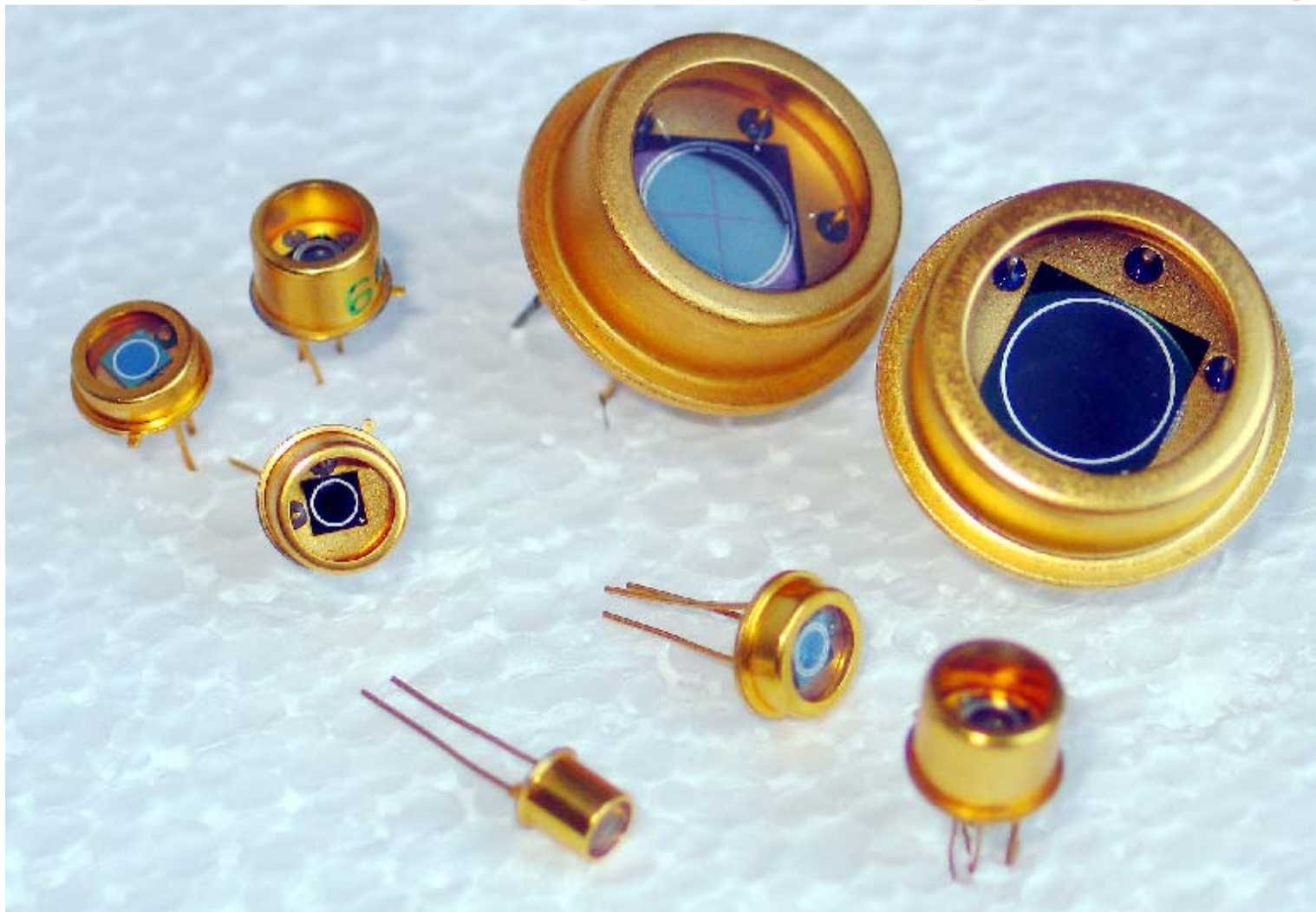


Београд 1964-1968



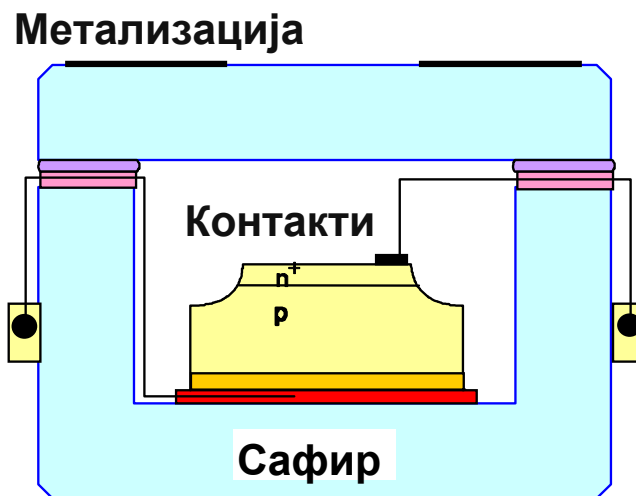
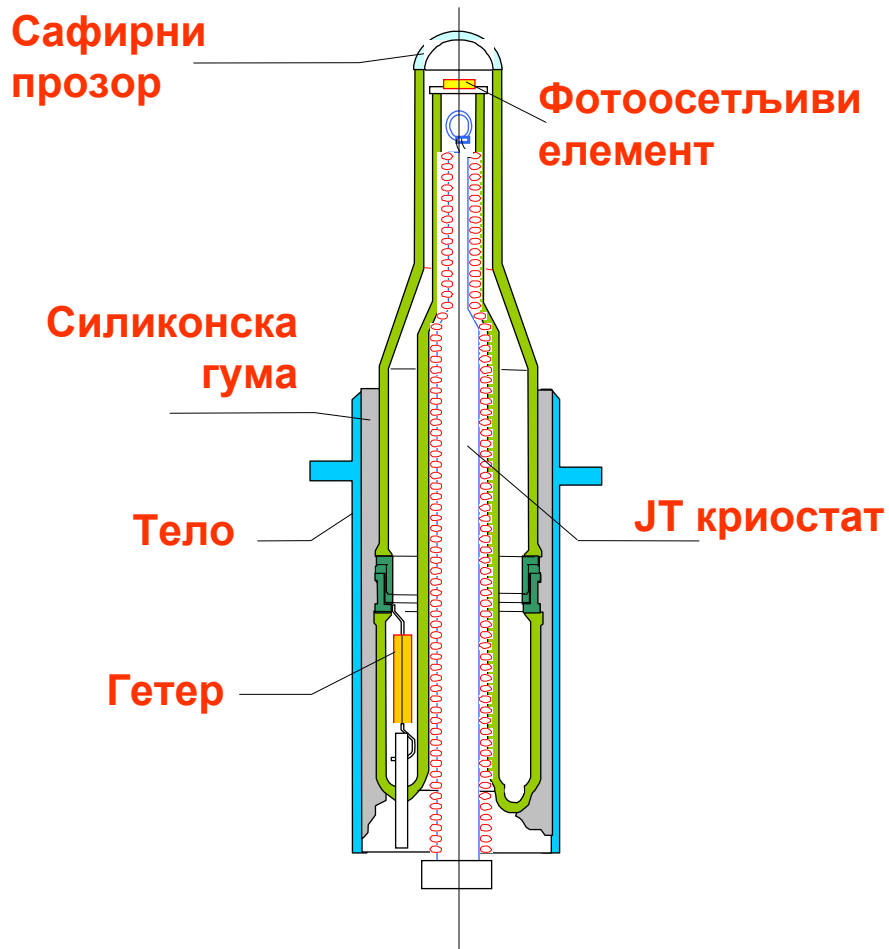
Принцип рада

Једно-елементне и квадрантне Si PIN фотодиоде (1975)



Све диоде су атестиране по војним стандардима

InSb инфрацрвени детектор (1986)

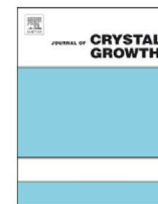




Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Crystal Growth

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jcrysgro



Growth kinetics of ISOVPE HgCdTe epilayers obtained on alloyed CdTe substrates with different crystalline orientations

U. Gilibert^{a,d,e}, E. Moyano^b, A. Scarpettini^c, A.B. Trigubó^{d,e,*}

3. Discussion

3.1. Djuric model

Fig. 1 shows the geometry of the device used for epitaxial growth. It consists of a polycrystalline HgTe source and a single crystalline CdTe, CdZnTe or CdTeSe substrate, separated by distance d . In the space between the source and the substrate, Hg, Cd and Te₂ vapors are present.

The Hg partial pressure is approximately three orders of magnitude higher than the Te₂ pressure and almost five orders higher than the Cd pressure. Here, the Hg pressure is the determinant pressure. Besides, the Cd partial pressure is sufficiently low so that sublimation of this element from the surface of the epitaxial film can be neglected.

Keeping in mind these simple thermodynamic considerations, the model postulates the following steps for the ISOVPE MCT growth [5]:

(a) HgTe sublimation:

$$F_1 = D_{\text{Te}_2} \left(\frac{n_{\text{Te}_2}(x_s) - n_{\text{Te}_2}(x_e)}{d} \right)$$

where F_1 is the Te₂ molecule flow, D_{Te_2} is the diffusion coefficient, $n_{\text{Te}_2}(x_s)$ and $n_{\text{Te}_2}(x_e)$ are the Te₂ molecule concentrations at the source and the growing epitaxy surface, respectively.

$$F_2 = k_s(n_{\text{Te}_2}(x_e) - n_{\text{Te}_2}^{\text{eq}}(x_e))$$

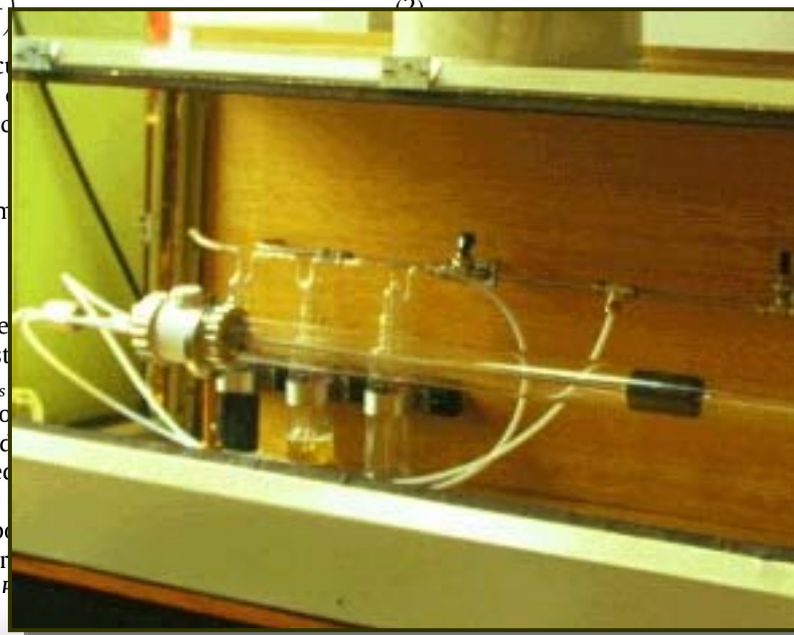
F_3 is the flow of Te₂ molecules to the growing epitaxy expressed as

$$F_3 = \frac{1}{2} N v(t)$$

For Eqs. 2–4, d is the distance between the source and the substrate, k_s is the surface reaction rate constant, $n_{\text{Te}_2}^{\text{eq}}(x_e)$ is the equilibrium Te₂ molecule concentration at the growing epitaxy surface, N is the number of Te₂ molecules per unit area and $v(t)$ is the velocity of the growing epitaxy.

In addition, $n_{\text{Te}_2}^{\text{eq}}(x_e)$ and $n_{\text{Te}_2}(x_e)$ are the equilibrium and the growing epitaxy in equilibrium Te₂ molecule concentrations, respectively, and N is the number of Te₂ molecules per unit area. The dimer flow F_3 corresponds to the number of Te₂ molecules per unit area and the factor 1/2 corresponds to the factor 1/2 transformation of Te₂ molecules into Te atoms.

In the steady state $F_1 = F_2 = F_3$.

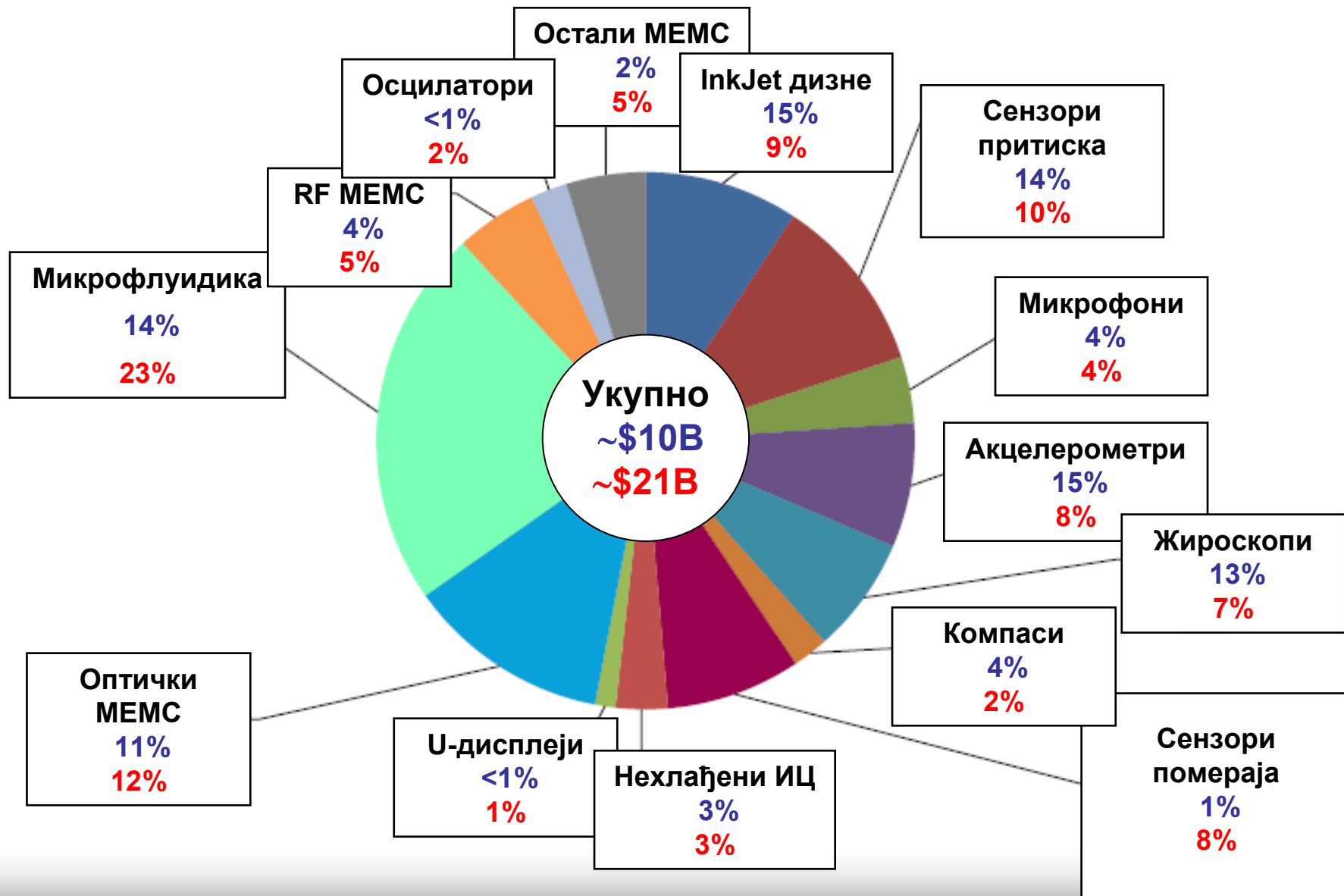


MEMS ТЕХНОЛОГИЈЕ

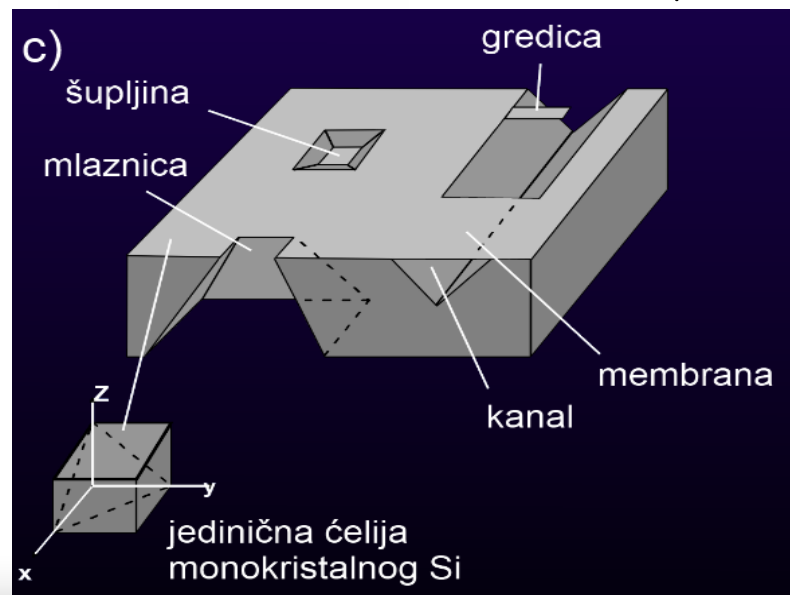
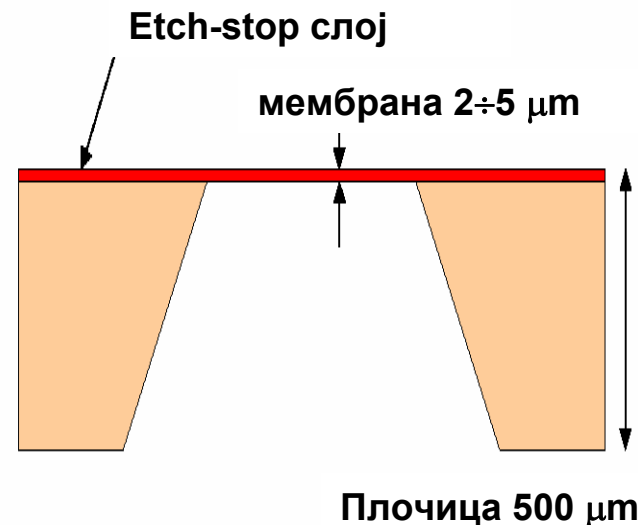
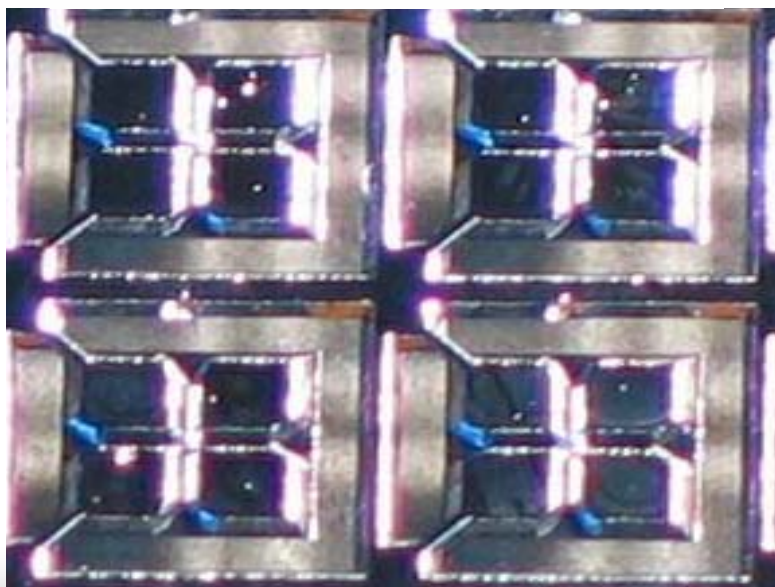
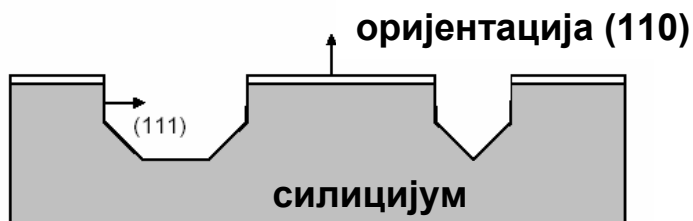
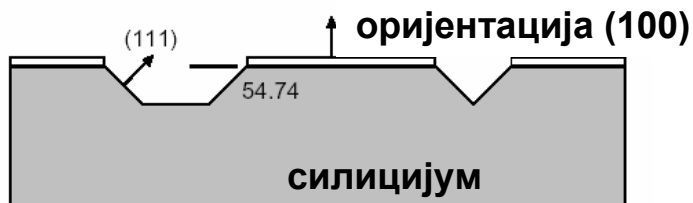
- ❑ MEMS технологије користе основне поступке израде интегрисаних кола, тј литографију, термалну оксидацију, допирање, депозицију танких филмова итд. MEMS такође користи различите технике нагризања и бондовања (спајања), које омогућавају формирање минијатурних тродимензионалних (3D) структура.
- ❑ За разлику од интегрисаних кола код којих се користе електронска својства Si, MEMS компоненте Si користе и као електронски и као механички материјал.
- ❑ Ова глобална технологија ефикасније користи природне ресурсе чиме штити екосферу; њене особине су нижа потрошња енергије, повећање ефикасности због смањења димензија и тежине, дуже време живота, коришћење лако доступних материјала и вероватно најважније **смањење цене**.
- ❑ У дугом временском периоду сензори и актуатори су израђивани техникама прецизне механике што је довело до проблема у даљој минијатуризацији комплетних сензорских система.

Сматра се да је овај разлог био један од важнијих који су довели до појаве MEMS технологија.

Тржиште MEMS-а у 2011 і 2017



Пример запреминског микромашинства



Основни поступци у MEMS-у



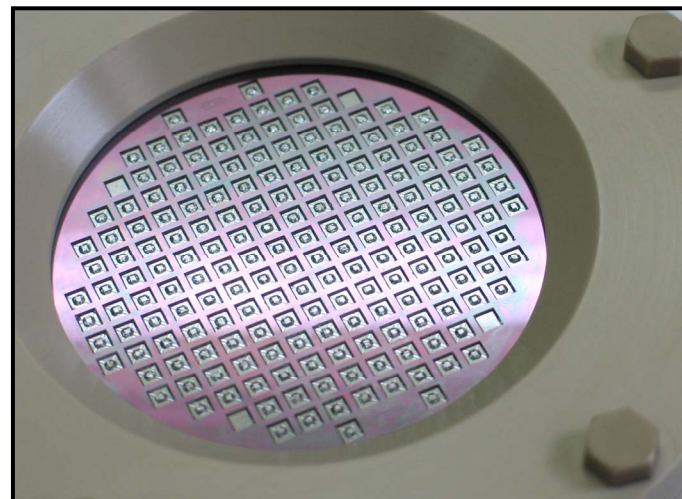
Термичка
оксидација



Анизотропно
нагризање

Термичка
оксидација

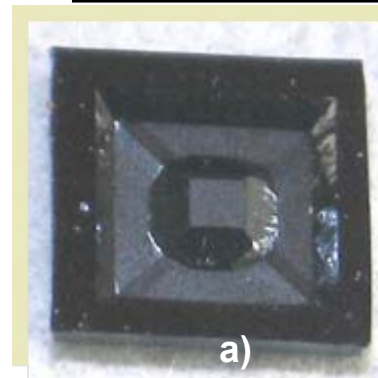
Анизотропно нагризање мембрана



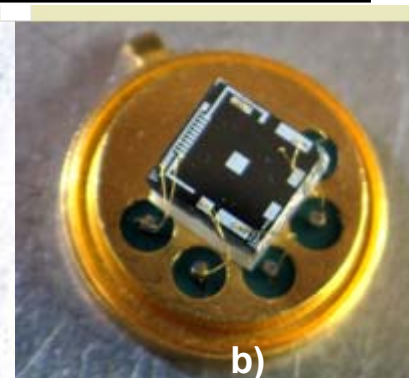
7x
фотолитографски
поступак

p⁺⁺ дифузија

Термичка
оксидација



a)



b)



Спатоврање Al

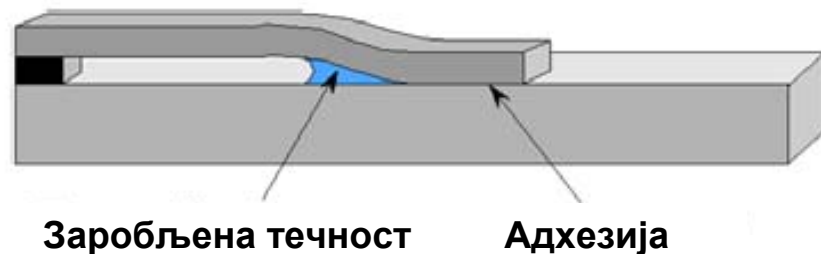
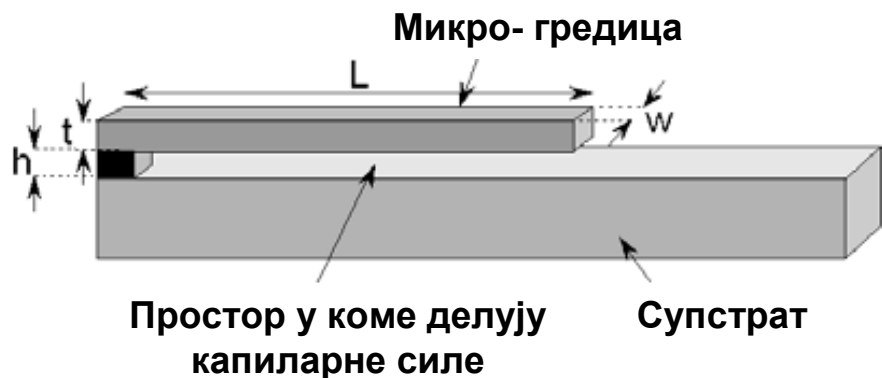
Спатоврање
SiO₂



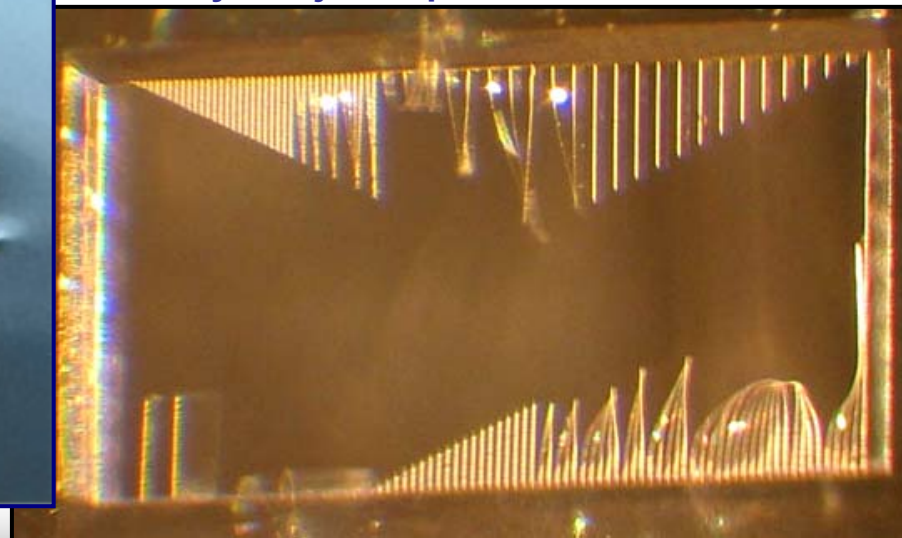
p⁺ дифузија

SP6 сензорски чип:
Доња страна (a),
Монтиран чип на кућишту(b)

Површински напони и MEMS структуре



Наша тест структура за испитивање
утицаја површинског напона

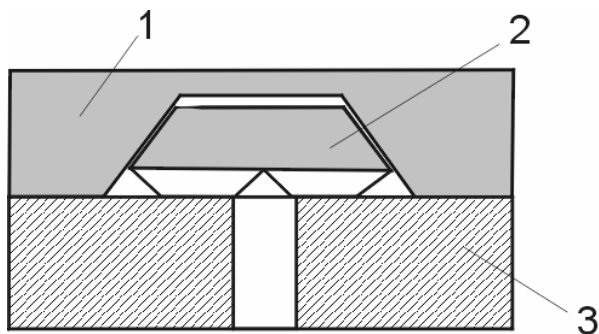


Неопходна знања и поступци за израду чипа сензора притиска

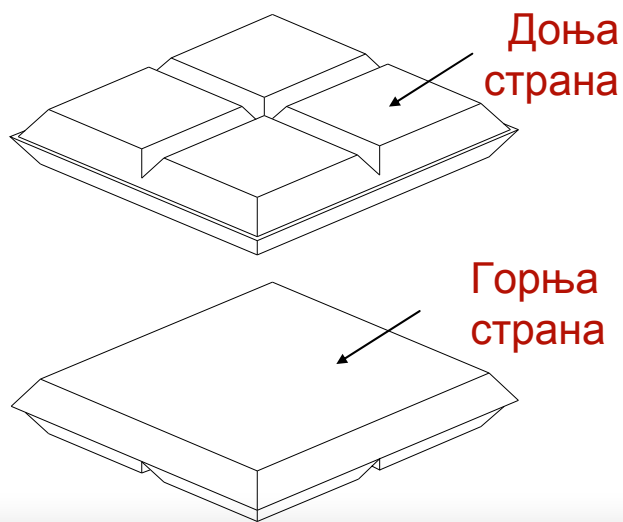
Параметар сензора	Неопходна знања
Осетљивост	Пиезоотпорни ефекат, зависност од кристалографске оријентације, концентрације дифузионих примеса и њихова расподела, напони у дијафрагми и њихова веза са притиском, механичка својства силицијума-теорија еластичности
Температурна зависност	Зависност отпорности и пиезоотпорности од температуре и концентрације (профила дифузионих примеса)
Нелинеарност	Појава нелинеарних механичких напона у мембрани и нелинеарност пиезоотпорних коефицијената
Хистерезис	Механичка својства силицијума
Дијагностика дефеката и нестабилности	Физичка електроника (струје цурења p-n споја, ефекти инверзије и обогаћења, C-V карактеристике, омски спојеви, утицај температуре на миграцију покретних јона

Неопходна знања и поступци за израду чипа сензора притиска

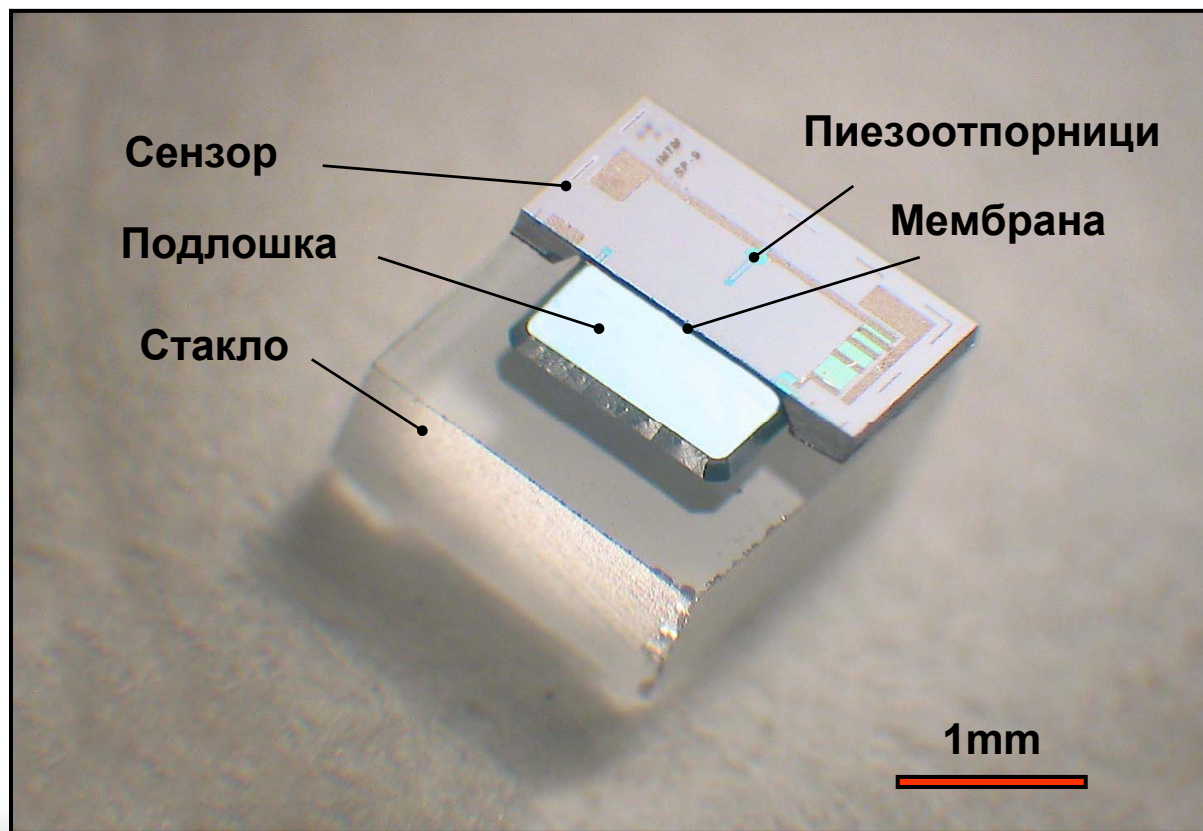
Поступак	Резултат
Класична планарна технологија	Пиезоотпорник одређене оријентације на дијафрагми
Селективно нагризање силицијума (микромашинство)	Израда дијафрагме прецизних димензија са унапред пројектованим положајима пиезоотпорника; двострана фотолитографија
Спајање сензорског чипа са носачем	Спајање силицијума и стакла (који имају приближне коефицијенте ширења и температурске коефицијенте ширења) електростатичким бондовањем; спајање Si-Si еутектичким бондовањем
Монтажа на кућиште	Термокомпресионо и ултразвучно бондовање; код диференцијалних сензора повезивање чипа са стакленом цевчицом
Заштита чипа од спољашњих утицаја	Нискотемпературна депозиција SiO_2 , Si_3N_4 , разни заштитни премази, монтирање у кућиште пуњено уљем са мембраном



1- сензор,
2- подлошка,
3- стаклена подлога
са/без рупе за уље



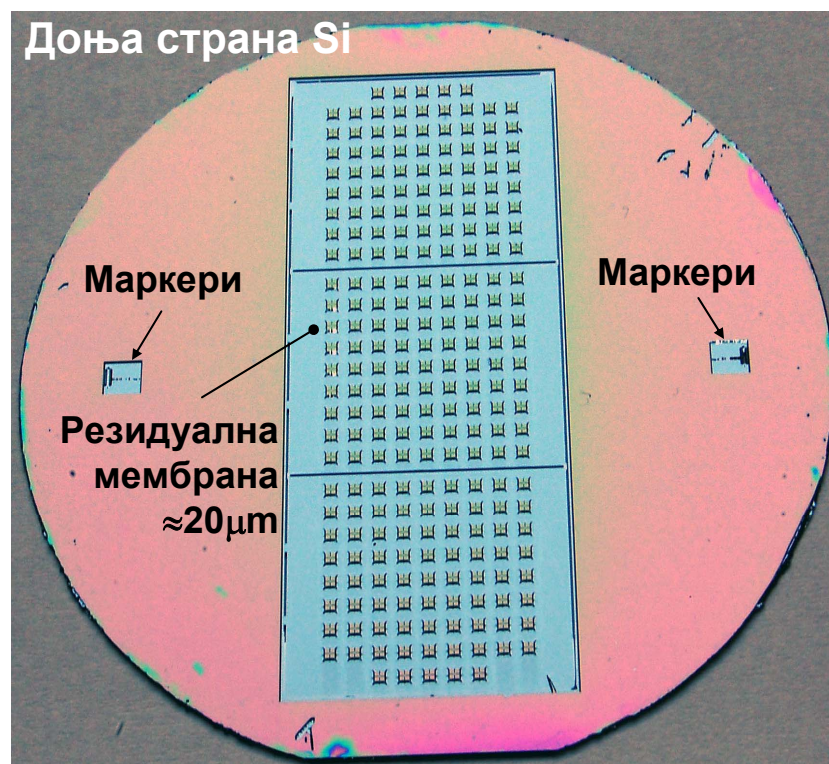
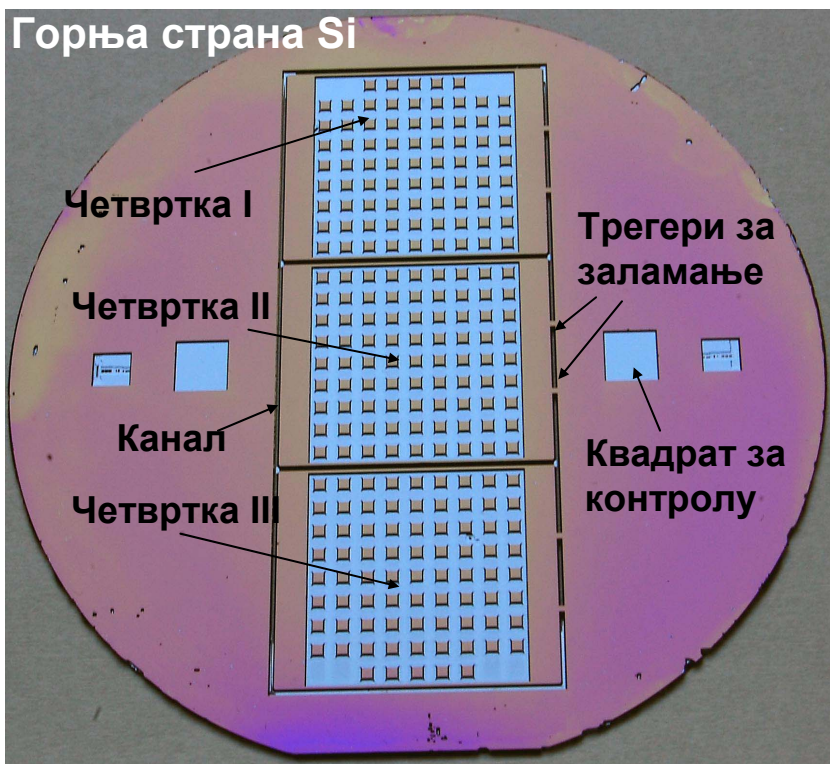
Принцип заштите сензора притиска од преоптерећења



Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења

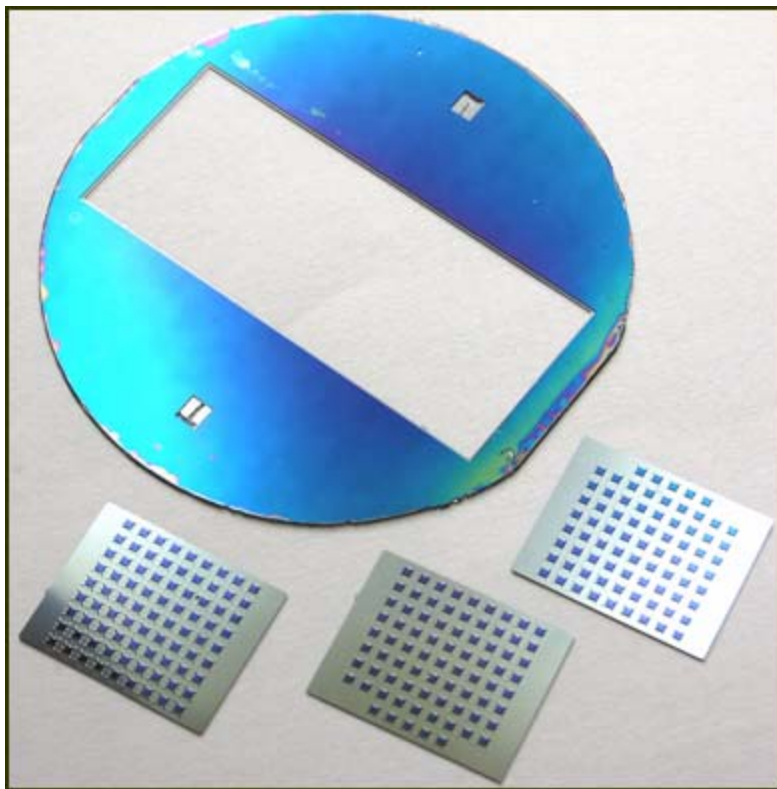
Коришћене технологије

- Двострана фотолитографија
- Нагризање силицијума у 30% КОН



Процесиране плочице од $\varnothing 3''$ (76.2mm)

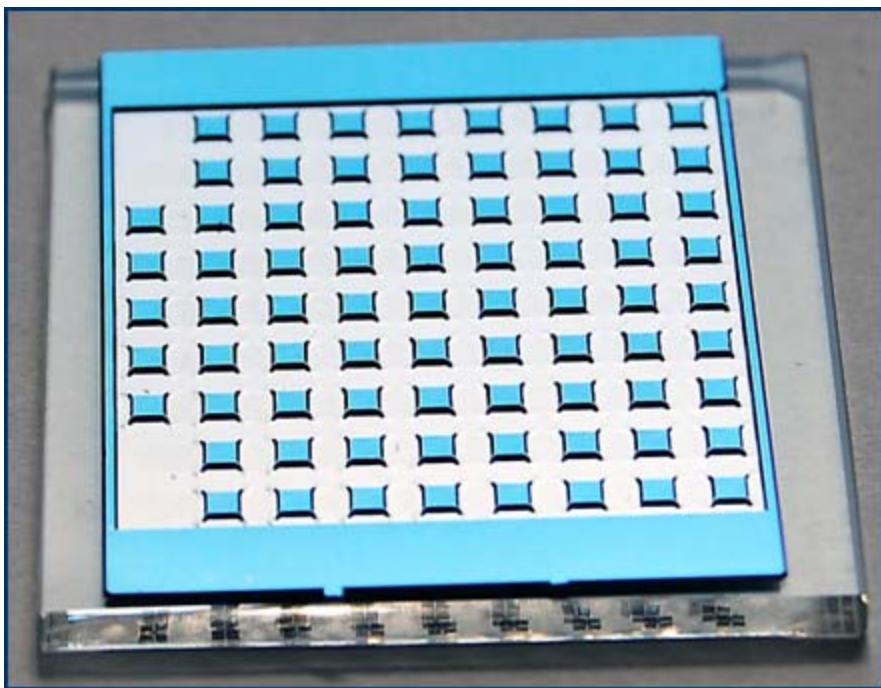
Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења



Три четвртке
димензија $\approx 20 \times 25 \text{ mm}^2$
након заламања

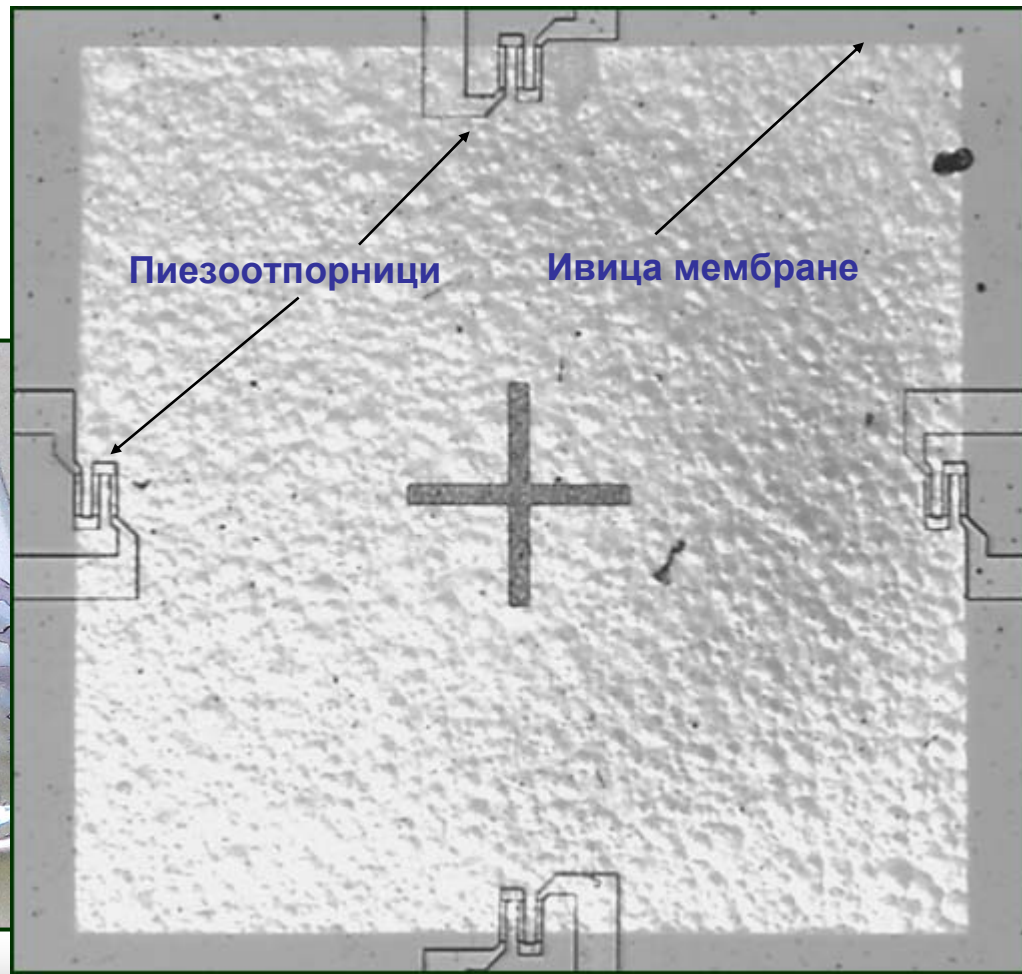
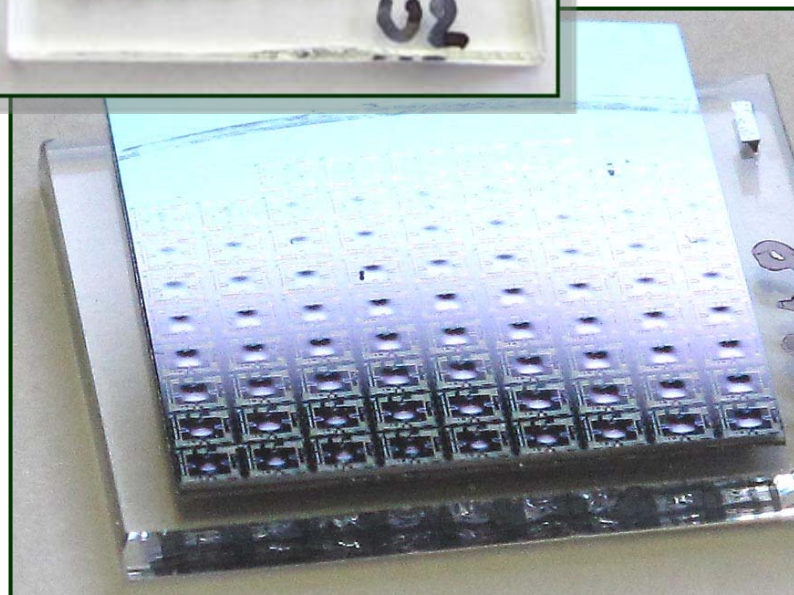
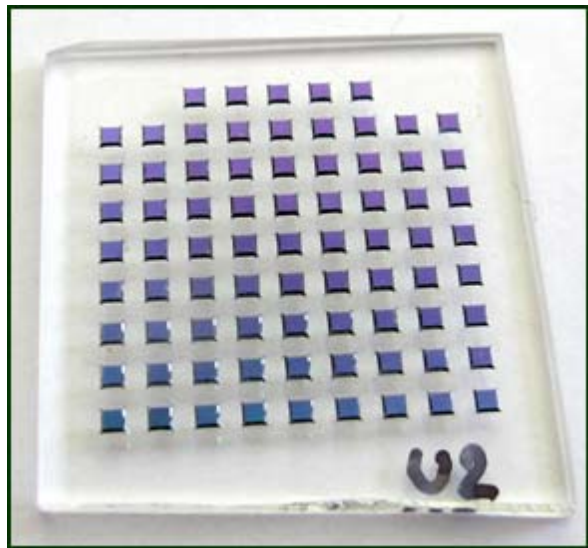


Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења

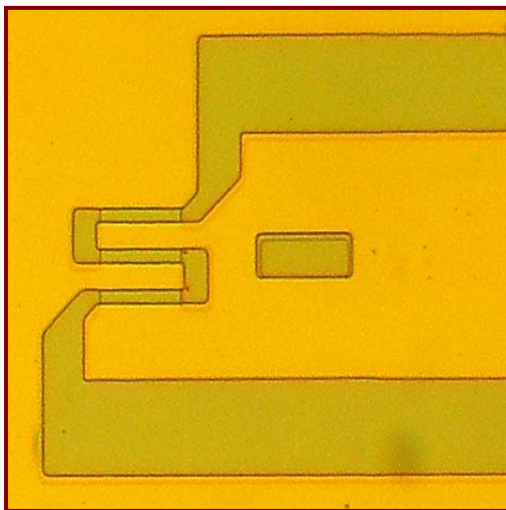


Четвртка са подлошкама спојена са PYREX стаклом технологијом анодног бондовања

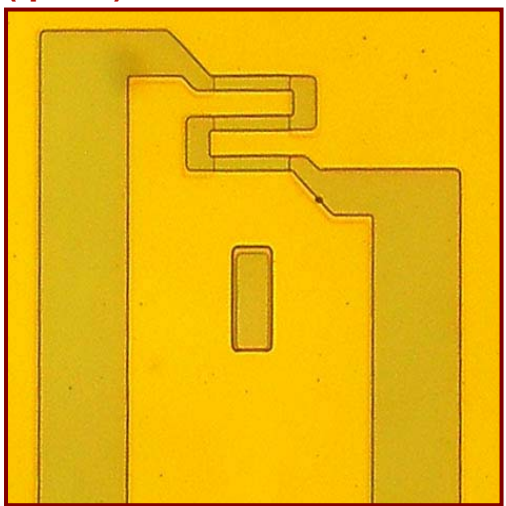
Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења



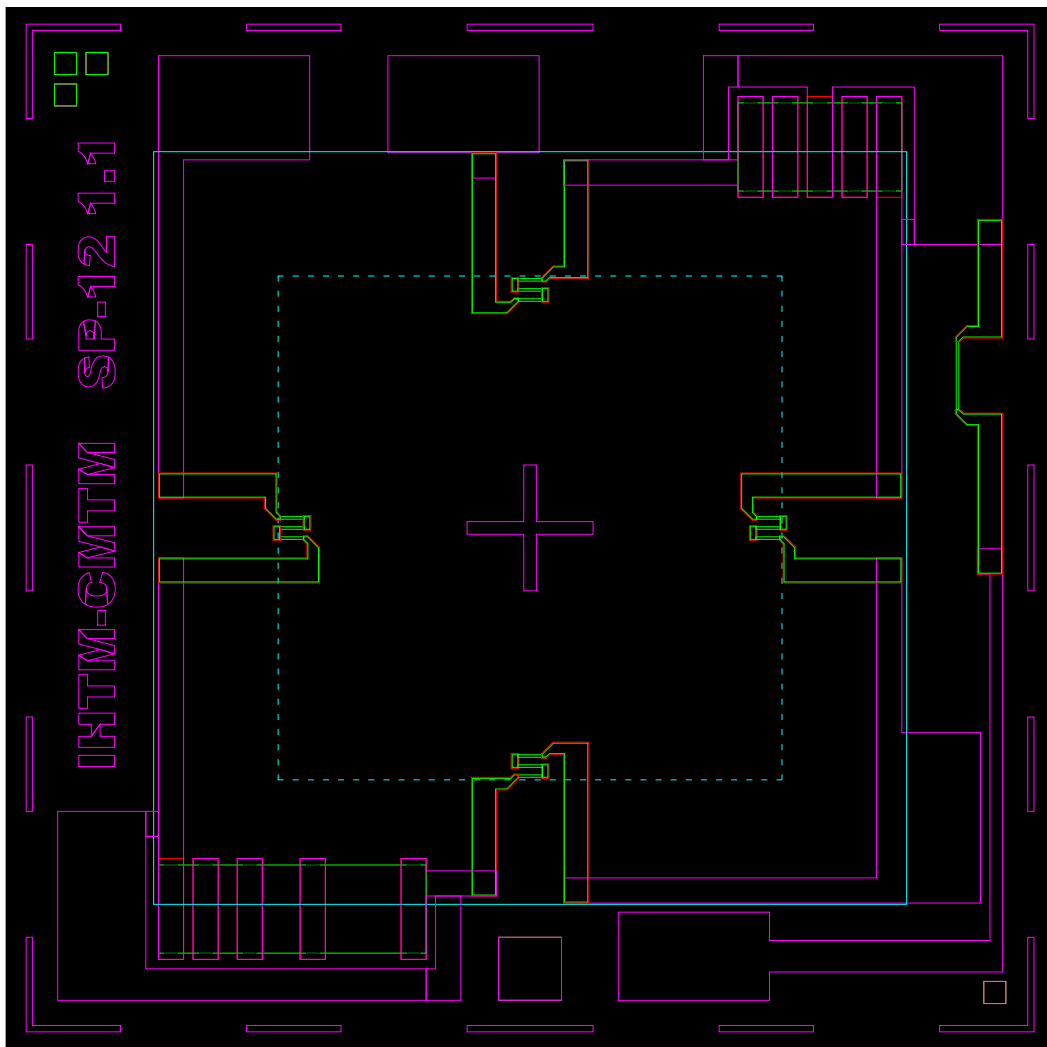
Нова генерација сензора притиска SP-12



Радијални пиезоотпорник
(фото)

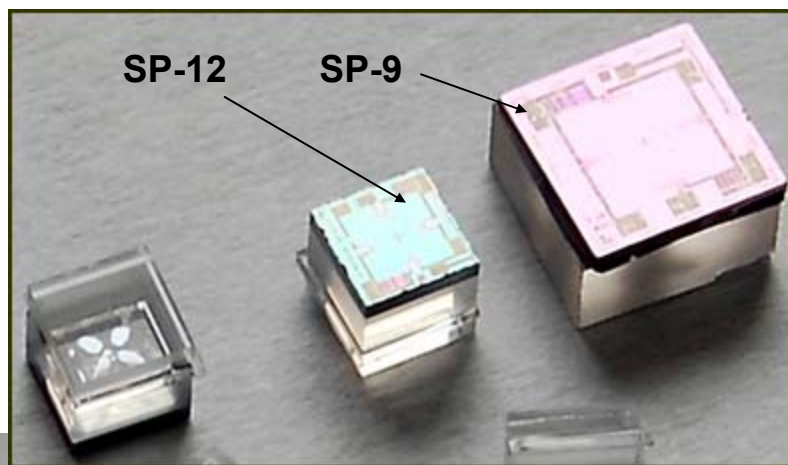


Тангенцијални пиезоотпорник
(фото)

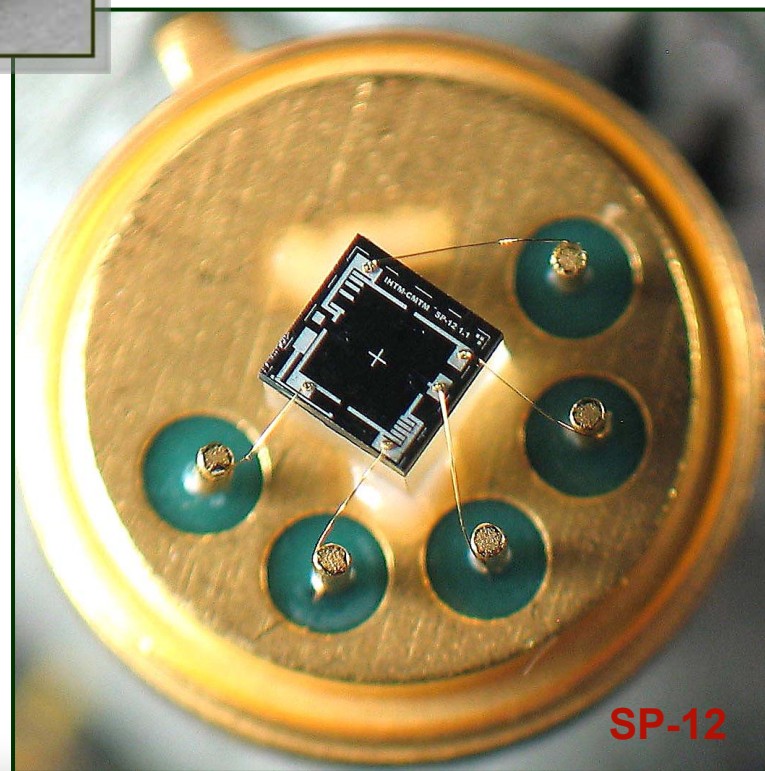
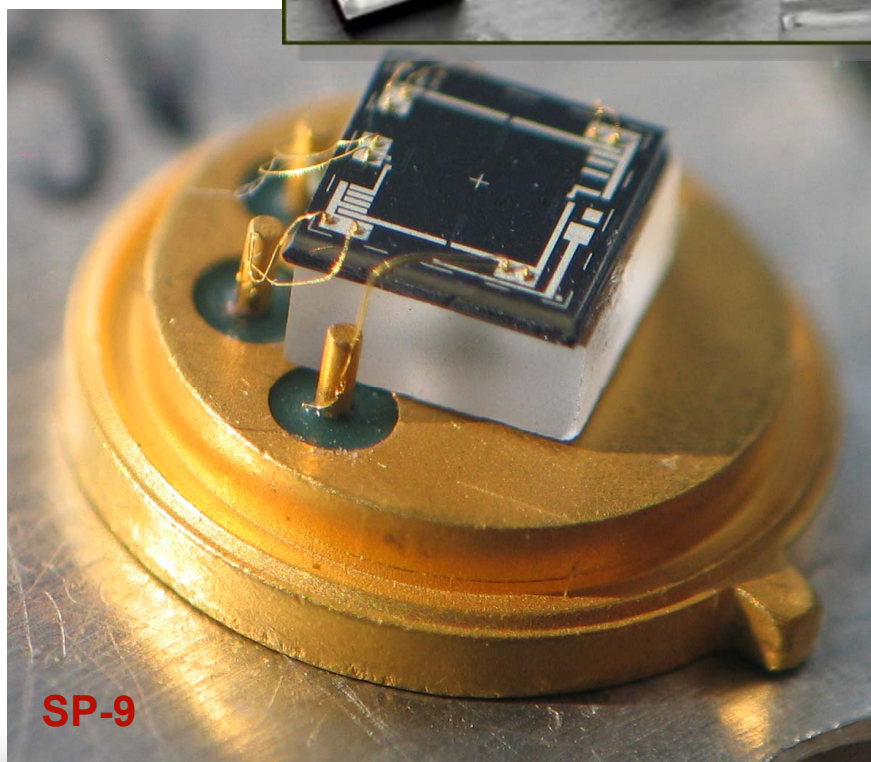


Цртеж фотолитографских маски

Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

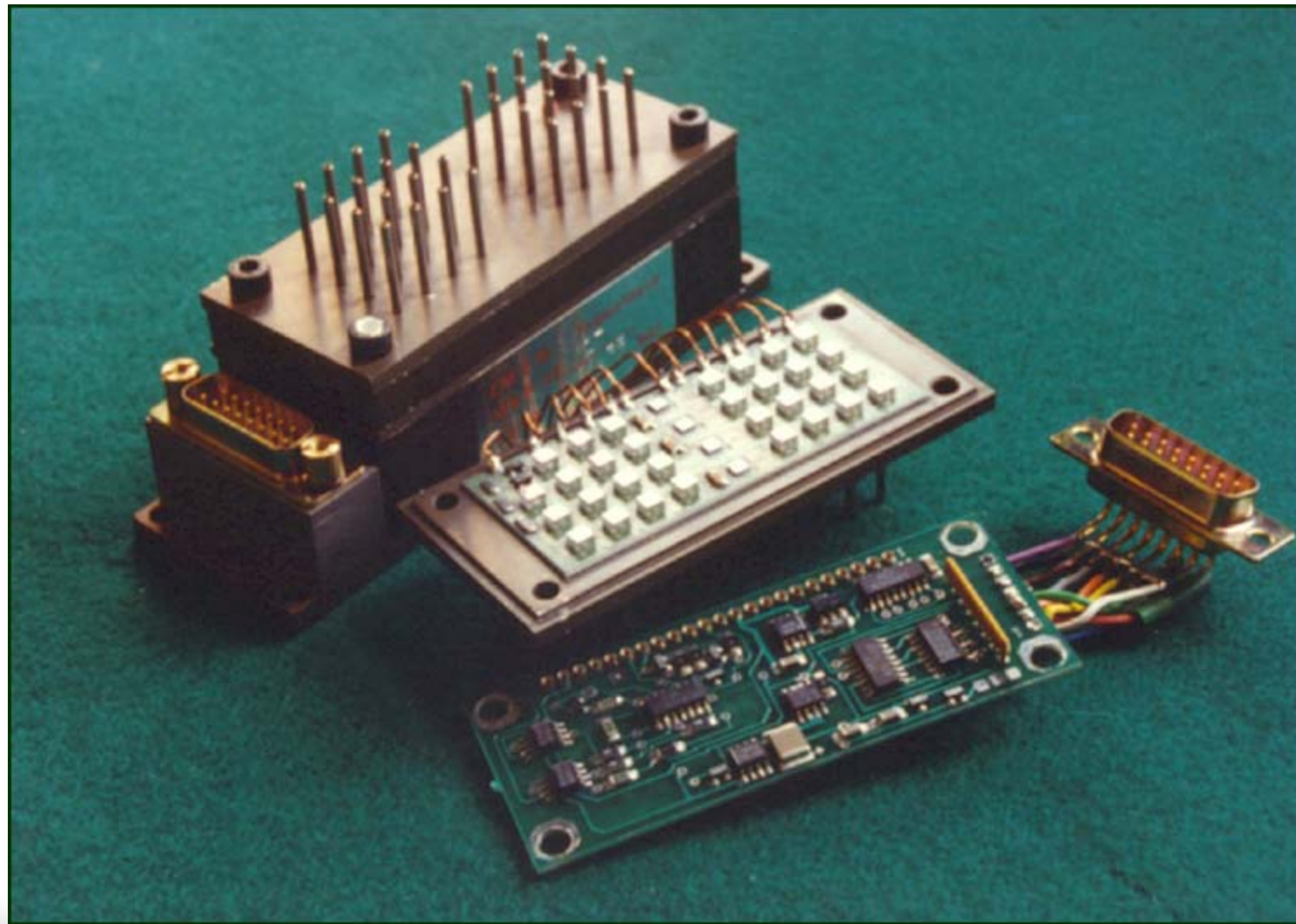


Поређење две генерације сензора притиска: SP-9 и SP-12



Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Матрични сензор притиска за аеро - космичку индустрију



Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Комплетна гама трансмитера притиска и нивоа

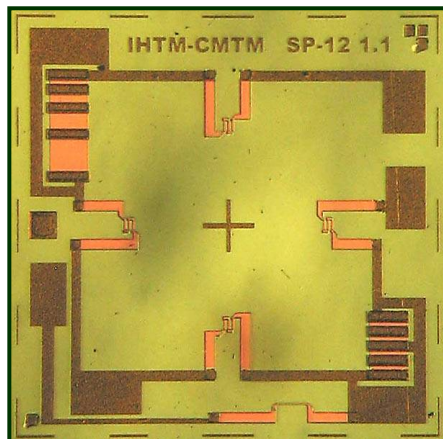


Три генерације трансмитера притиска

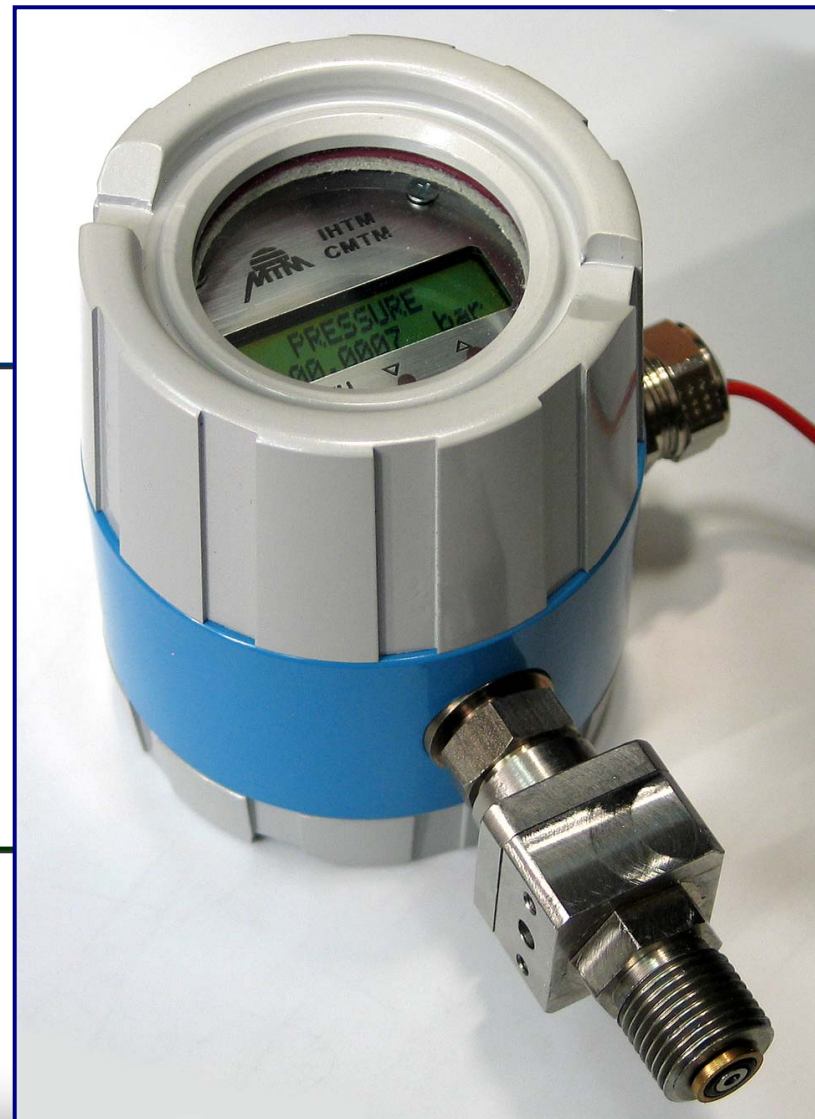
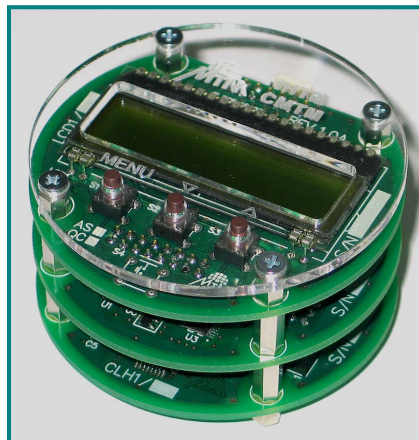


Склопови „интелигентног” трансмитера притиска

Пиезоотпорни
сензор притиска



Електронски
склоп



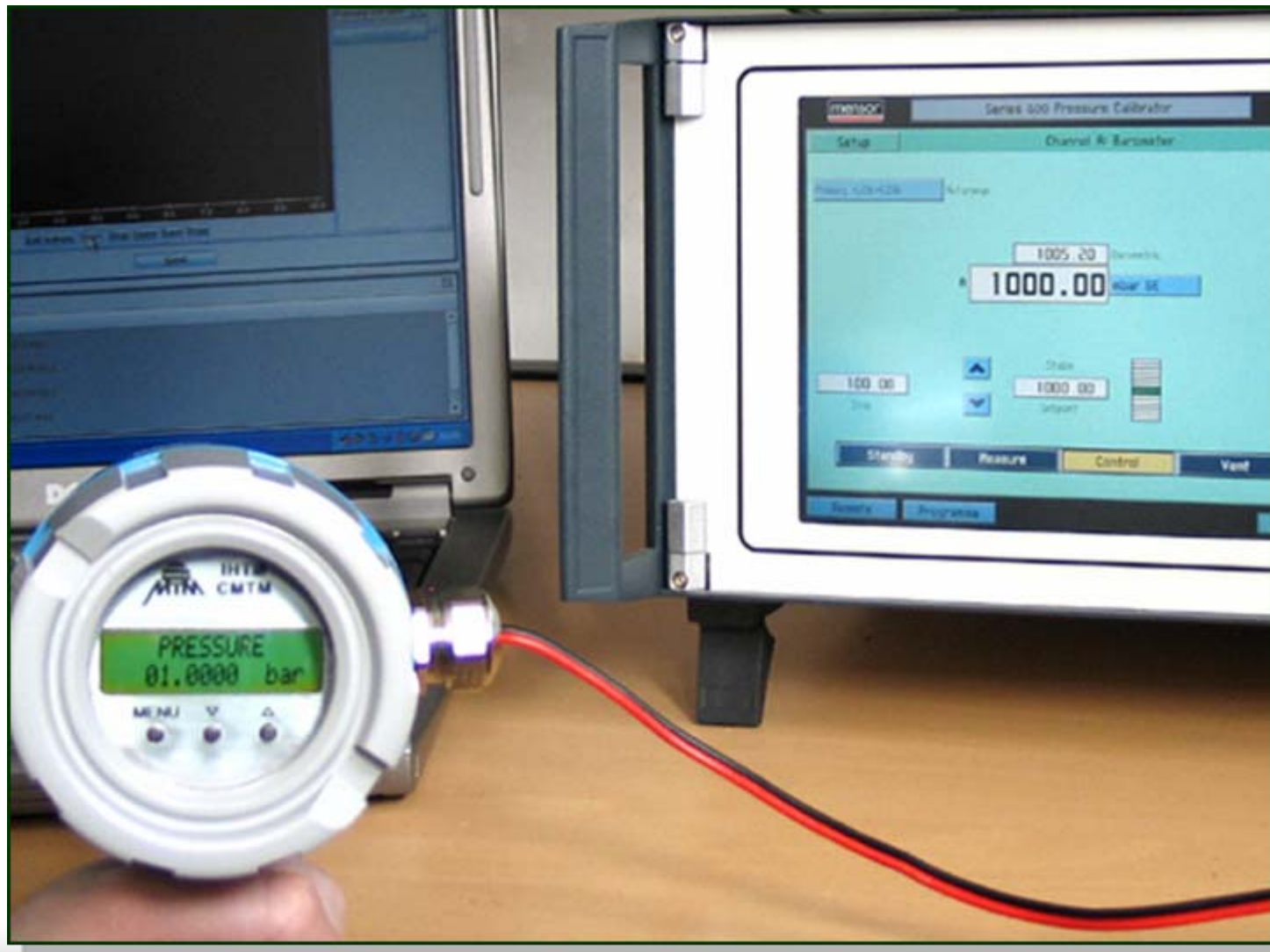
Сензорска “пилула”



Трансдјусер

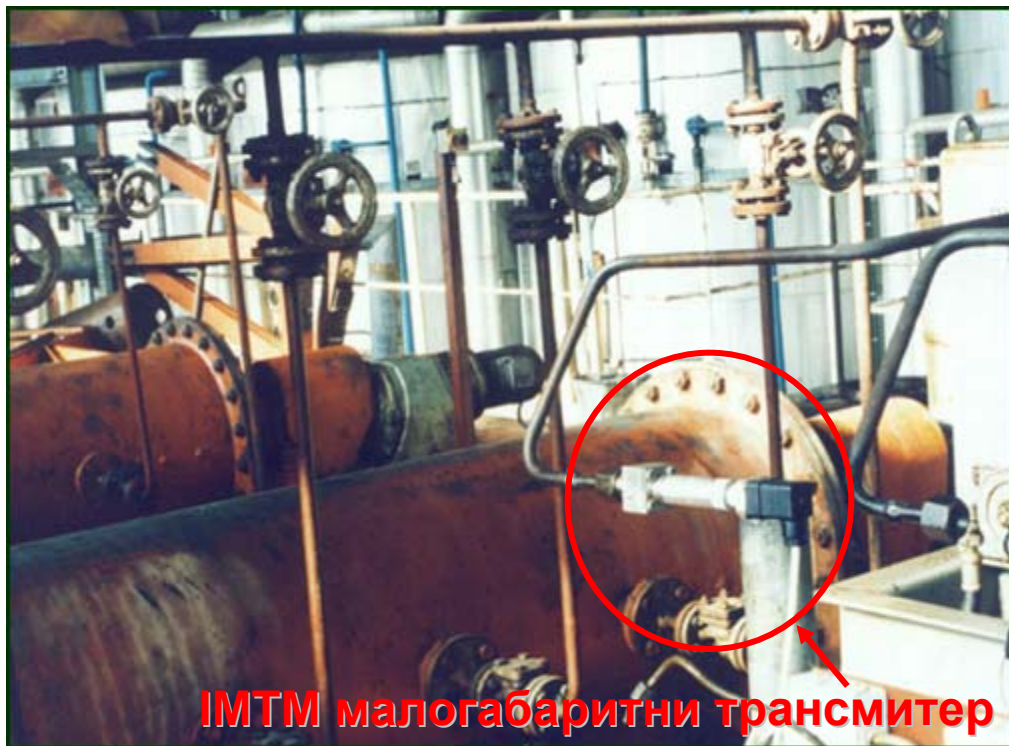
Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Пројекат трансмитера са интелигентном електроником (баждарење)

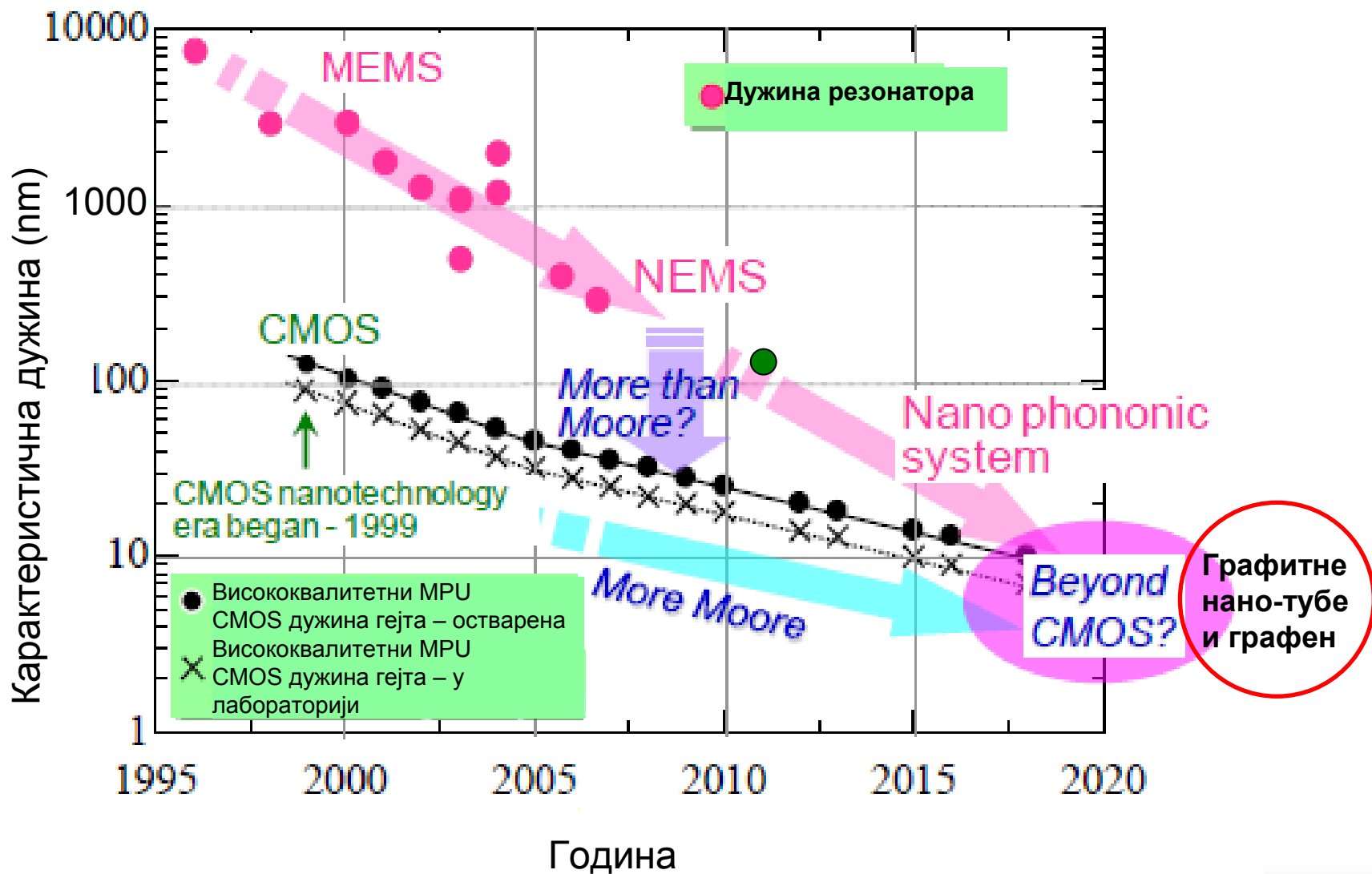


Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Наши трансмитери притиска и нивоа у производним погонима



Графички приказ тренда смањивања димензија MEMS/NEMS-а



Специфичности узроковане смањивањем димензија сензора

Смањивање димензија на нано ниво доводи до:

- ❑ Промене својстава материјала градивних блокова NEMS-а, што подразумева промену електронске зоналне структуре, промену механичких својстава итд. који почињу да зависе од димензија.
- ❑ Пошто са смањењем димензија расте однос површина-запремина расте и осетљивост NEMS структура на површинске ефекте.
- ❑ Скалирање сензорских димензија би требало да доведе до бољих сензорских перформанси, једноставније интеграције, мање потрошње енергије и мање цене.
- ❑ Да би се извео закључак како смањивање димензија утиче на сензоре потребно је наћи како осетљивост и шум сензора зависе од скалирања. Одговор није једноставан, а зависи и од врсте и намене сензора.

Флукуациони феномени

- Стохастичке флукуације параметара (шум) минијатурних MEMS и NEMS структура повећавају се када се њихове физичке димензије смањују.
- Ове флукуације одређују граничне перформансе (минимални детектибилни сигнал) сензора и минималну снагу потребну за прелаз између стања 0 и 1 код дигиталних система.

$$P_{\min} \approx k_B T \omega_0 / Q$$

$$\text{(за } f_0 = 1 \text{ GHz, } Q = 10000: P_{\min} \approx 10^{-16} \text{ W)}$$

- У извесним случајевима, минијатуризација може да деградира перформансе система (смањује однос сигнал/шум). Тај феномен је познат као "the scaling trap". Ово захтева пажљиву анализу осетљивости и шума при смањивању димензија система.

АД процеси код МЕМС/НЕМС

- ❑ АД процеси честица из окружења и њихове стохастичке флукуације се неизбежно дешавају на површини свих чврстих тела
- ❑ Са смањењем димензија утицај АД процеса и флукуација на параметре МЕМС/НЕМС је све израженији
- ❑ Рад велике групе хемијских и биолошких сензора базира се на процесу адсорпције циљних честица (атома, молекула, протеина, вируса итд.)
- ❑ АД флукуације у неким случајевима доминантно одређују граничне перформансе МЕМС/НЕМС

Истраживања у области АД код МЕМС/НЕМС

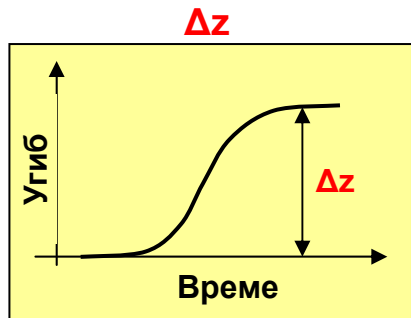
- ✓ Развој сензора заснованих на АД процесима (пројектовање, фабрикација, карактеризација):
 - Сензори са микро/наногредицама
 - Сензори са променом проводности танког слоја
- ✓ Теоријска истраживања АД шума:
 - Развој теоријских модела за различите врсте АД процеса
 - Удео у укупном шуму МЕМС/НЕМС
 - Утицај на граничне перформансе
 - Шумна спектроскопија

Сензори засновани на микро-нано градицама

Статички мод

Хомогена или биматеријална гредица

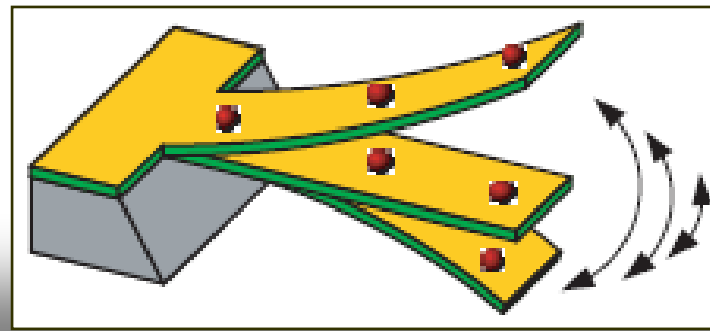
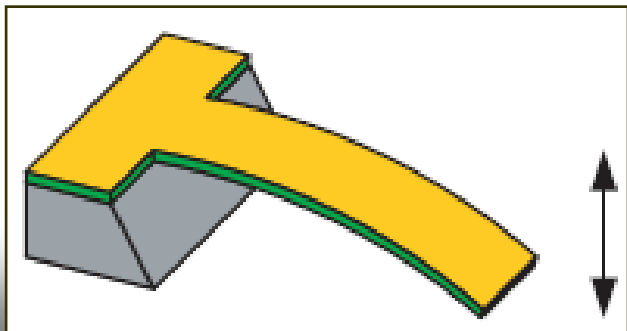
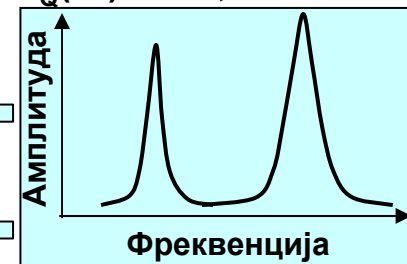
Динамички мод



Технике детекције

- Оптичка
- Пиезорезистивна
- Капацитивна
- Пиезоелектрична

$F_Q(\dots) \rightarrow \Delta f, \Delta A$



Минимална маса која се може детектовати сензорима са микрогредицама



PERGAMON

Microelectronics Reliability 40 (2000) 919–932

MICROELECTRONICS
RELIABILITY

www.elsevier.com/locate/microrel

Introductory invited paper

Mechanisms of noise sources in microelectromechanical systems

Zoran Djurić *

IHTM – Institute of Microelectronic Technologies and Single Crystals, Njegoševa 12, 11000 Belgrade, Yugoslavia

Received 25 November 1999

mechanical systems (MEMS). These miniature systems can in principle replace completely the existing measuring instruments, for instance spectrophotometers, ellipsometers, etc.

In the current development stage, there is an independent interest for miniature sensor and actuator parts for microsystems, and very recently, a great demand arose for miniature microelectromechanical filters, resonator circuits, etc. which could replace quartz resonators and filters with surface acoustical waves. This replacement would result in a complete miniaturization of wireless communication instruments [2].

Characteristic for all these building blocks are their minuscule dimensions. Consider an example, the cantilever for a highly sensitive SPM microscope. According to Ref. [3], to achieve a force resolution of 5.6×10^{-18} N/Hz^{1/2} at 1 Hz in vacuum, a single-crystal silicon cantilever only about 600 Å thick, 100 μm long and 10 μm wide. The weight of this cantilever was of the order of about 10^{-13} kg.

A similar situation is encountered in micromechanical actuators [4], where a resonant frequency in the GHz range is required. For instance, the approximate length of a clamped-clamped beam resonator with a frequency of 1 GHz are a length of the order of 2 μm and a thickness of 2 μm. The mass of this cantilever is only 3.5×10^{-14} kg.

The author of this work, who has been very active in the field of infrared detectors, has been able to achieve a high detection sensitivity. For an infrared detector, it is

nature
nanotechnology

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 1 APRIL 2012 | DOI: 10.1038/NNANO.2012.42

A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution

J. Chaste¹, A. Eichler¹, J. Moser¹, G. Ceballos¹, R. Rurali² and A. Bachtold^{1*}

$$\langle \delta f_0 \rangle = - \frac{\delta m}{2m_{NT}} f_0 \quad (S3)$$

The nanotube in Fig. 1-3 has a length L_{NT} of ~150 nm and a diameter d of 1.7 nm.

We calculate that the mass of the nanotube is $m_{NT} = 6 \cdot 10^{-19}$ g using

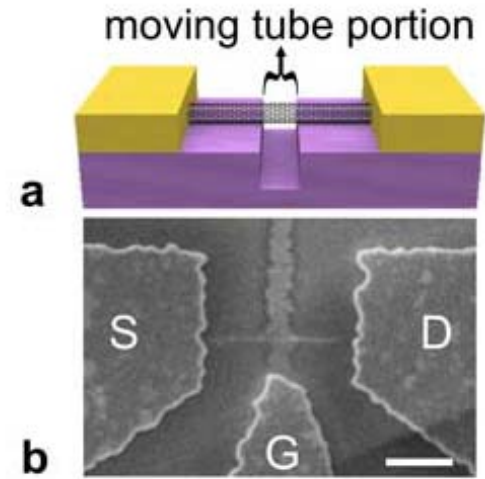
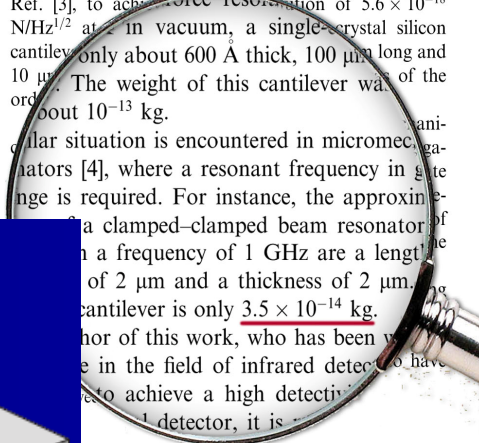
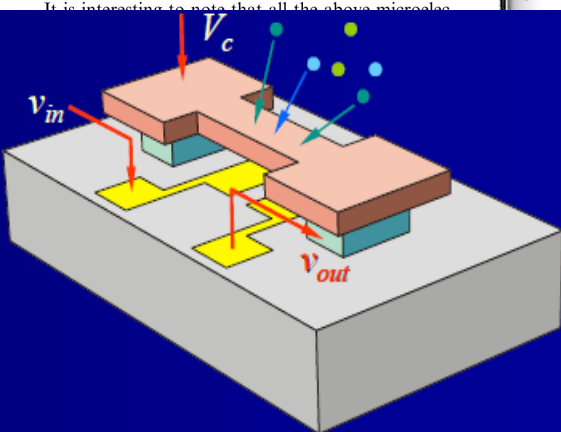
$m_{NT} = 2m_c \cdot (\pi d L_{NT}) / A$ with m_c the mass of a carbon atom and $A = 5.2 \cdot 10^{-20}$ m² the

surface of the hexagon in the honeycomb lattice of graphene. The effective mass is

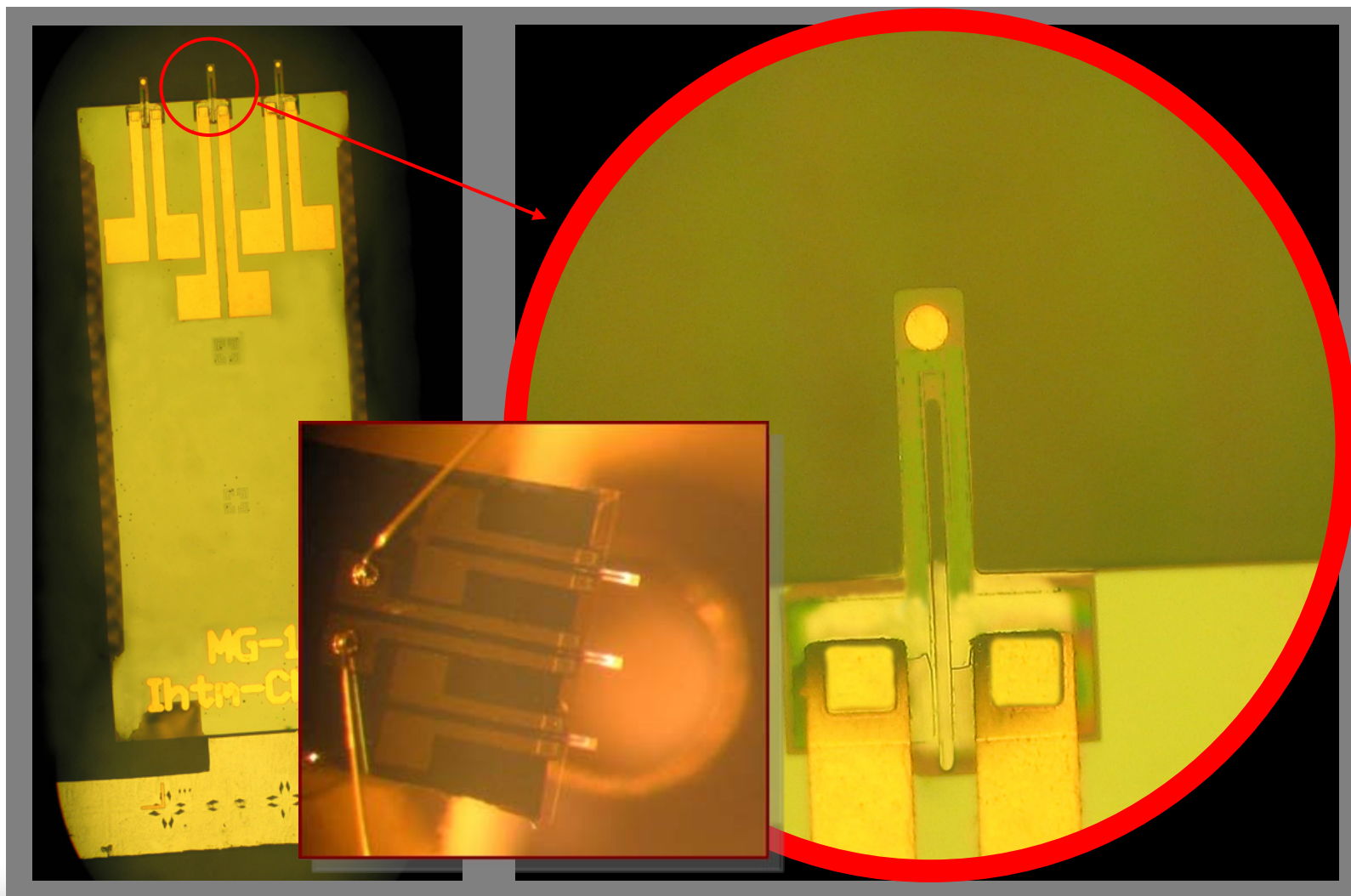
$m_{eff} = 3 \cdot 10^{-19}$ g since the nanotube is under tension (which is induced by applying a

voltage to the gate electrode) and that the shape of the eigenmode can be

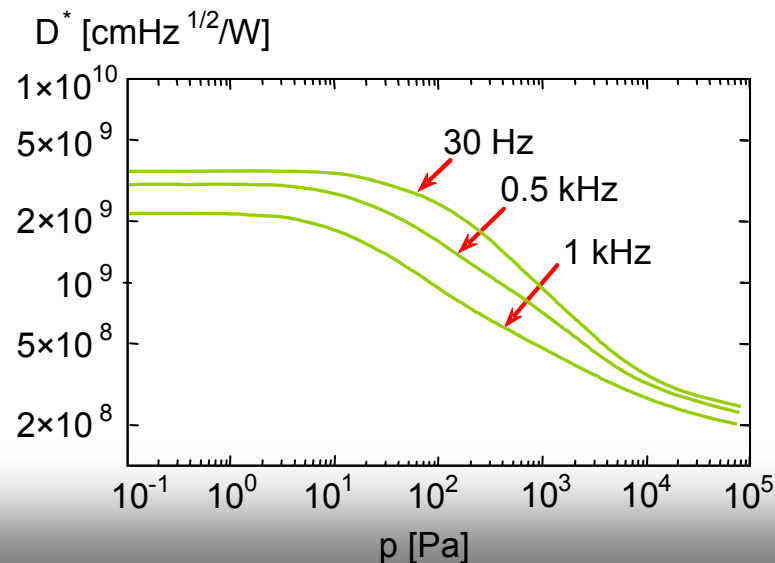
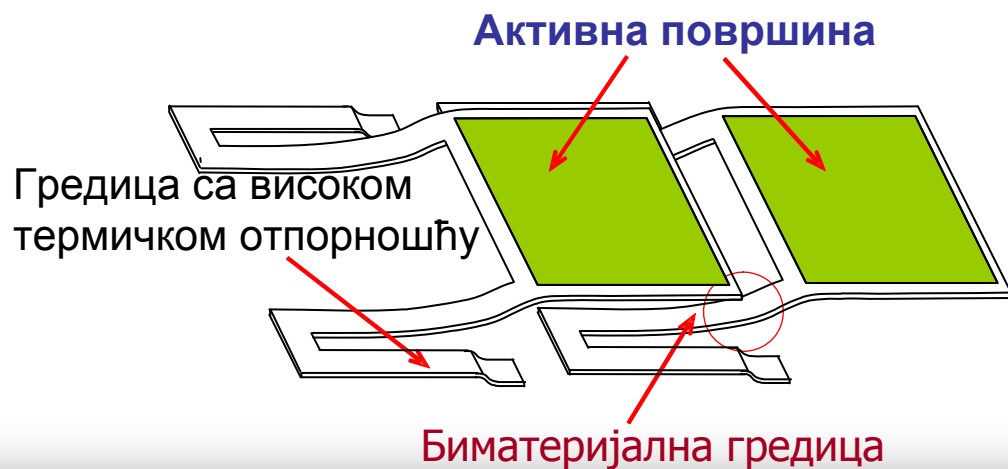
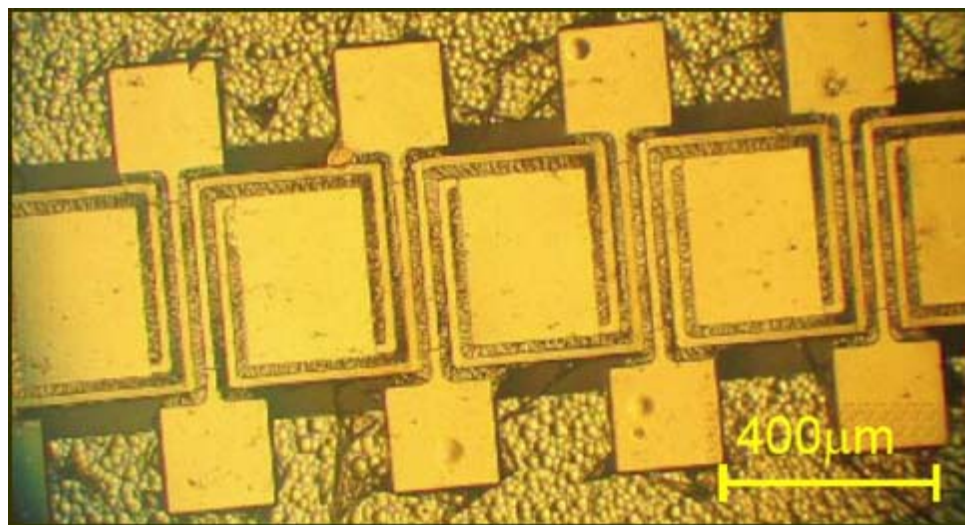
approximated by $\varphi(x) = \sin(\pi x / L_{NT})$.



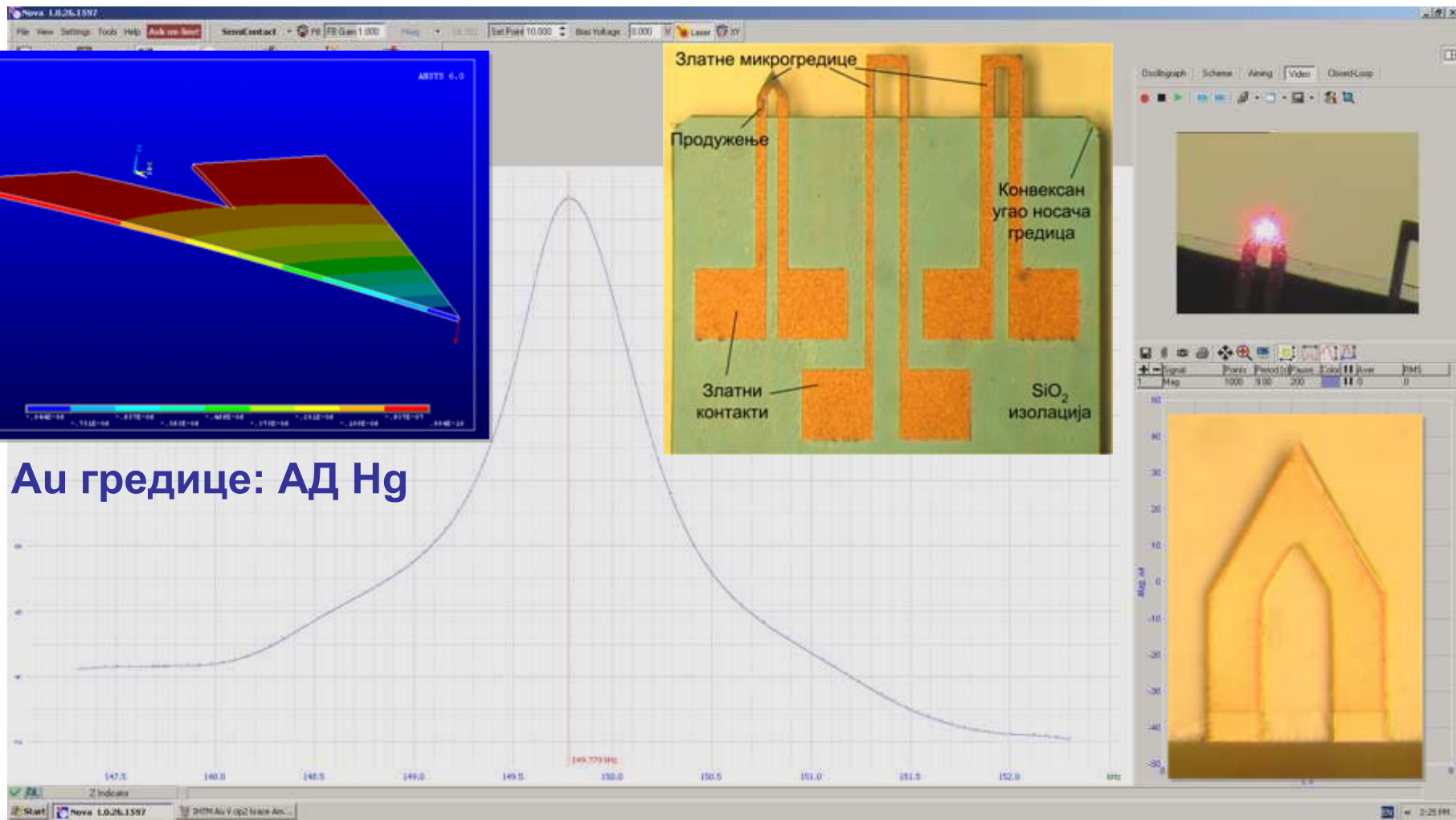
**Пиезоотпорна микрогредица
(тест - структура за сензорску примену)**



Сензори инфрацрвеног зрачења са биматеријалном гредицом



Развој сензора живе (Hg) са микрогредицом



Ау гредице: Ад Нг

Развој танкослојног сензора живе (Hg)

Намена: детекција живиних пара у ваздуху

Мерни опсег:

0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 10 mg/m^3

Тачност: 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

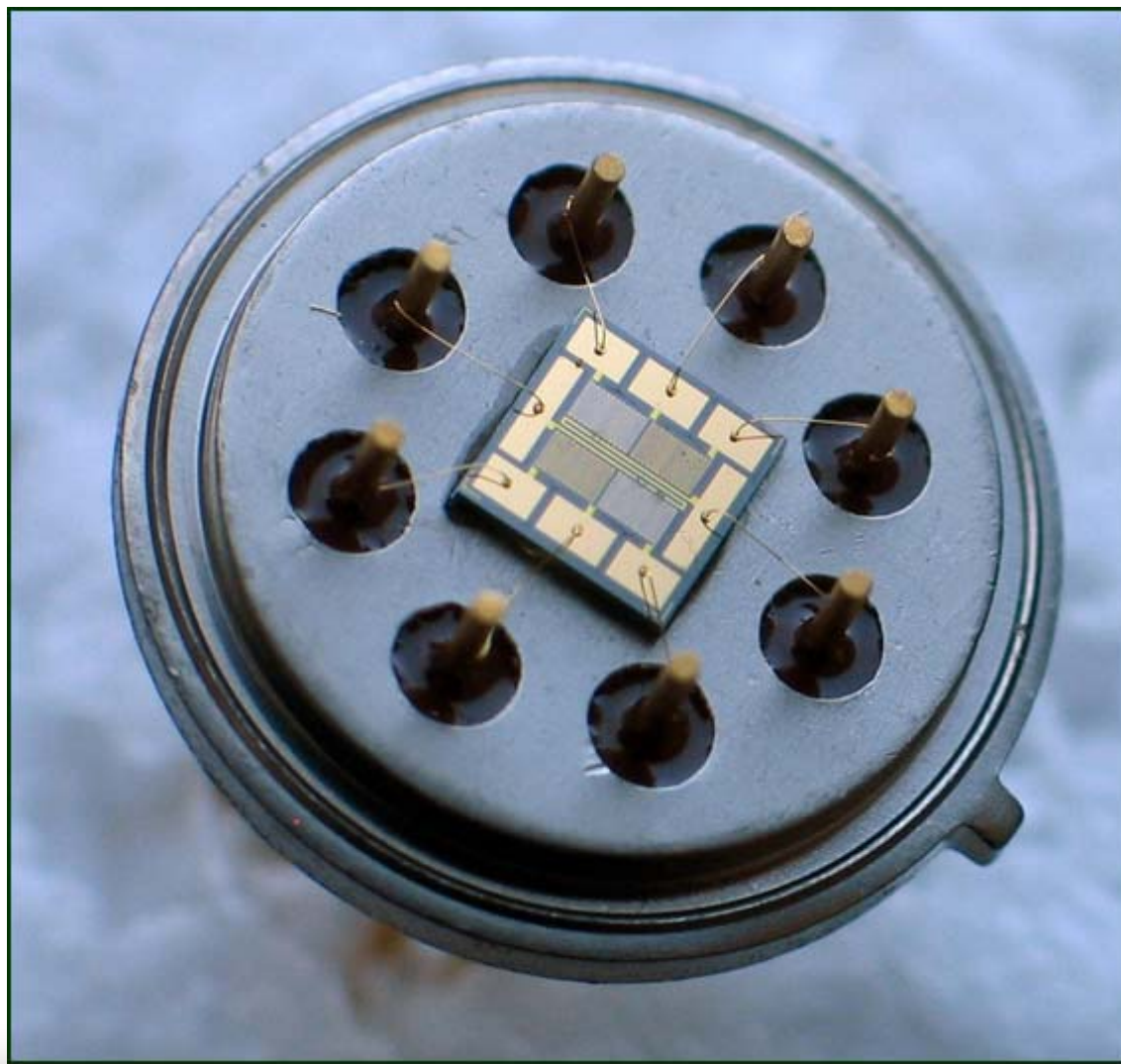
Напајање Вистоновог моста:
константна струја 10mA

Радни напон: 5V

Дисипација: 0,05W

Снага грејача: 5,75W при 24V
напајања

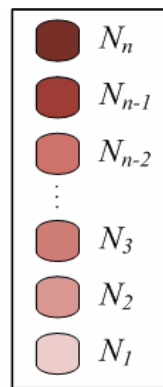
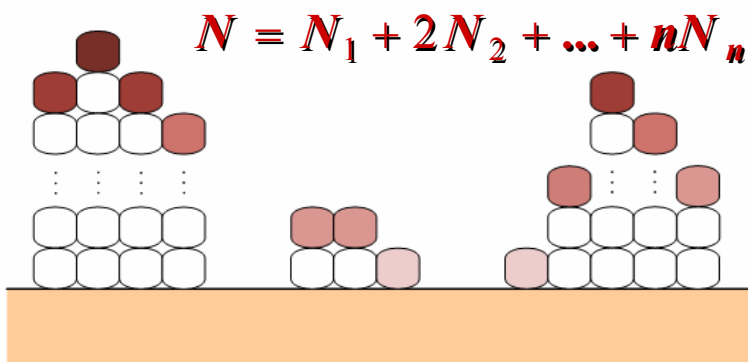
Дозвољена концентрација:
50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Развој теоријских модела АД шума

Адсорпција из гасне фазе:

- Једнослојна адсорпција једне врсте честица
- Једнослојна адсорпција произвољног броја врста честица
- Вишеслојна адсорпција



Адсорпција из течне фазе:

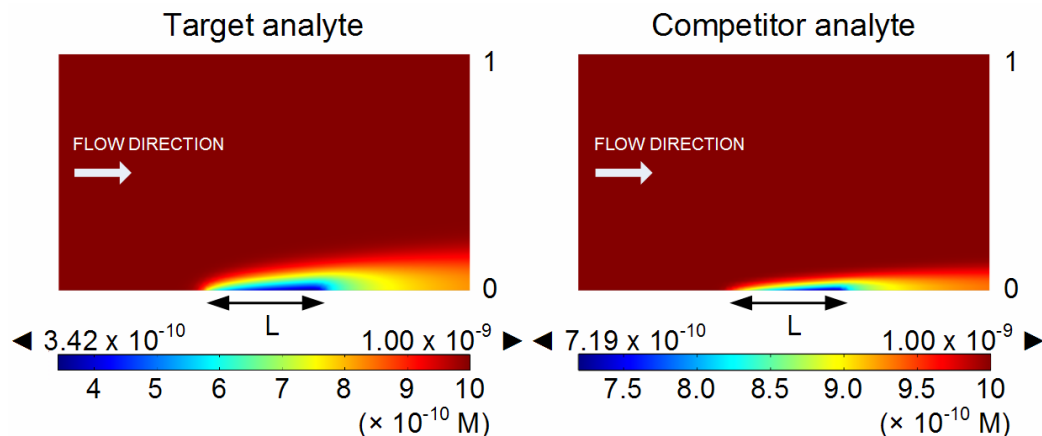
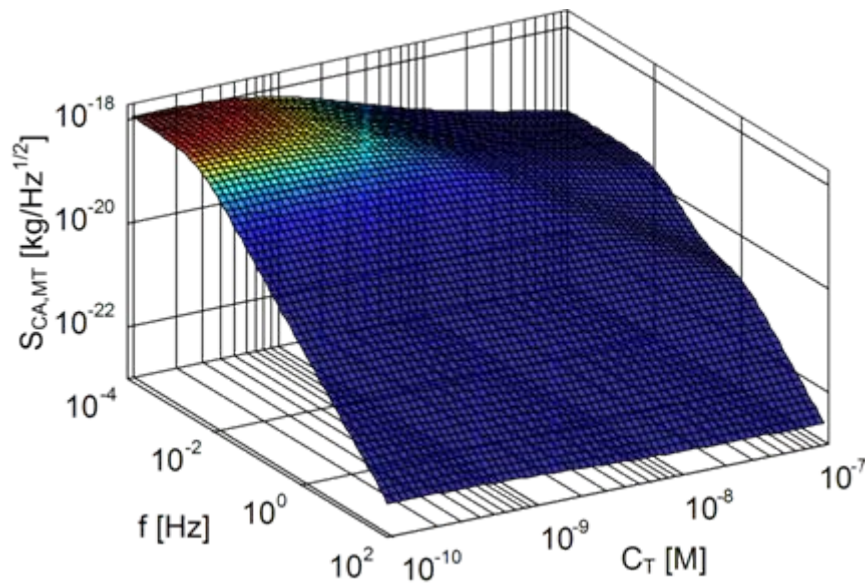
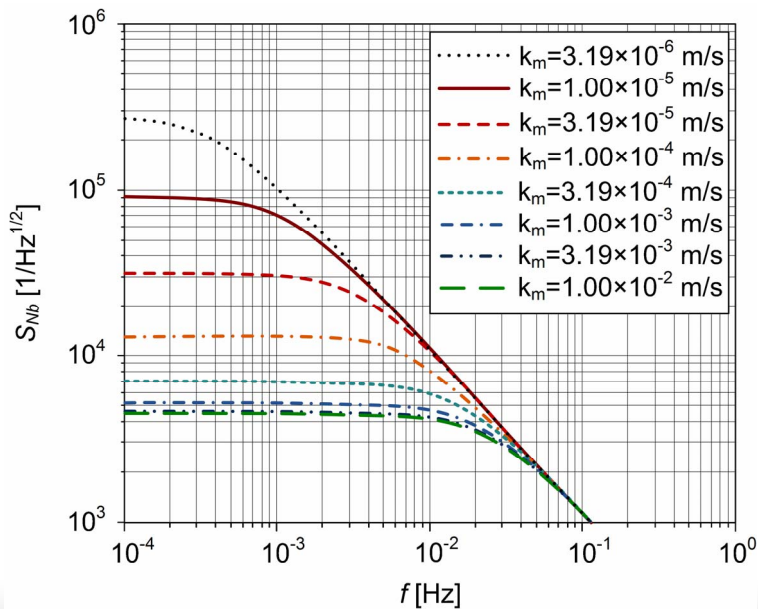
- Утицај преноса масе и неспецифичне адсорпције
- Утицај преноса масе и површинске дифузије



Примери примене теоријских модела код биолошких сензора

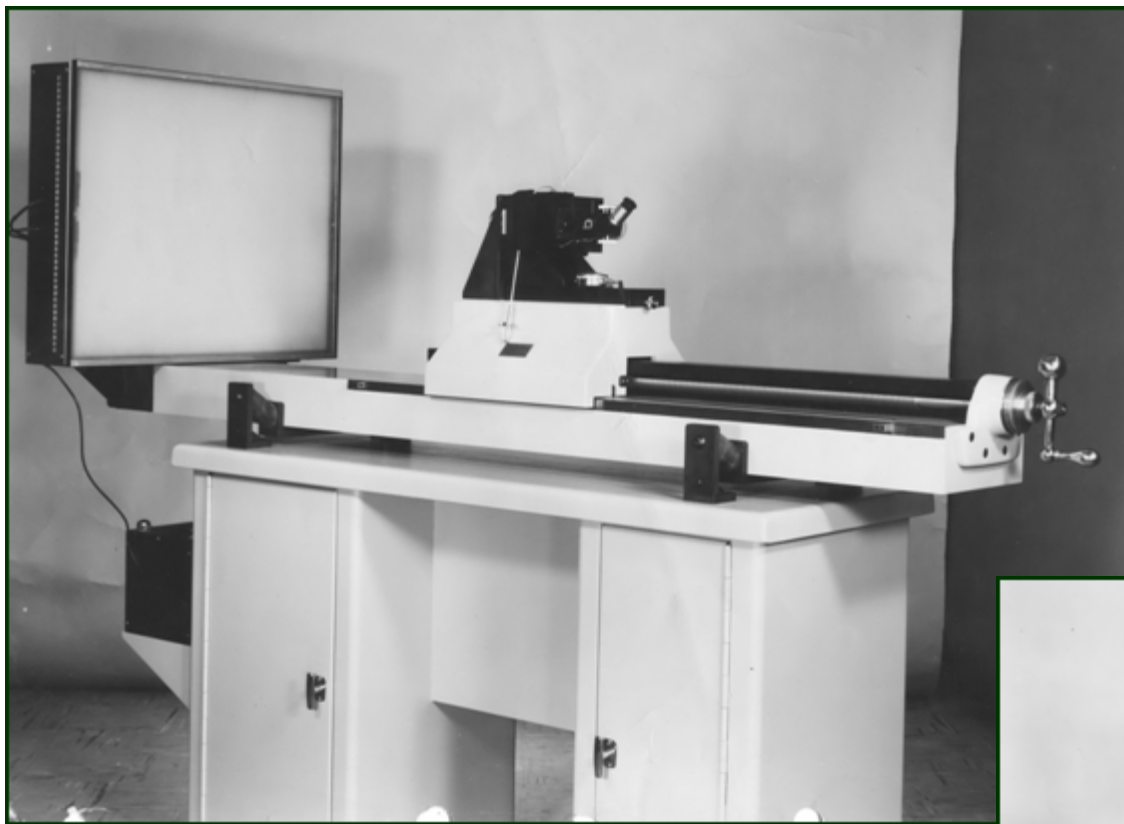
Спектар флукуација броја адсорбованих честица:

- АД процес спрегнут са преносом масе (лево)
- Компетитивна адсорпција са преносом масе

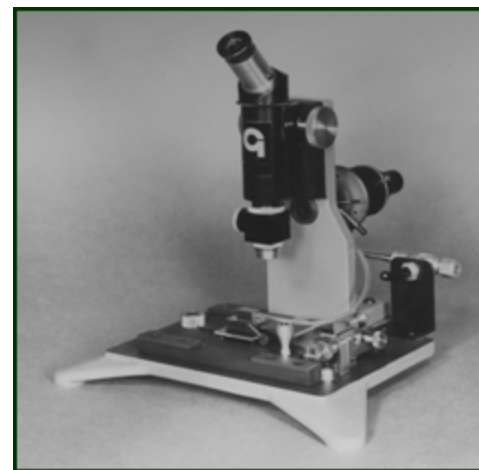


Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

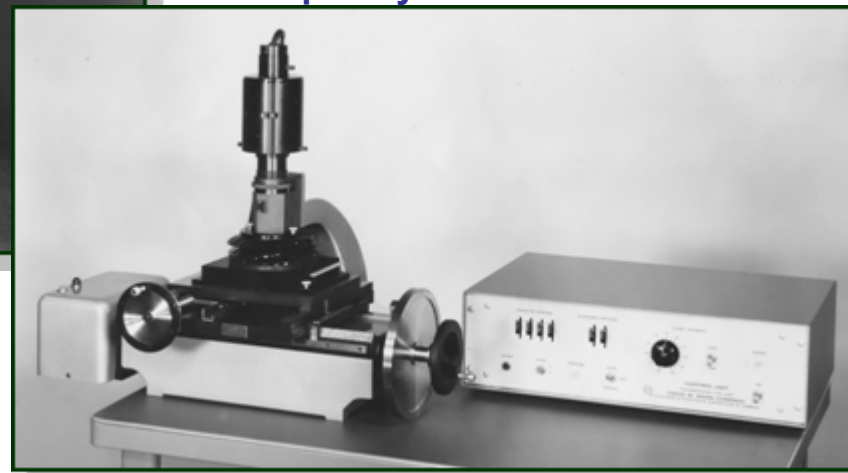
Опрема за израду маски из 1967. године



Уређај Mann Type 1003 Reduction Camera за снимање првог умањења (оригинални цртеж се снима и умањује 20× до 40×)



Микроскоп за центрирање првог умањења Mann 992A



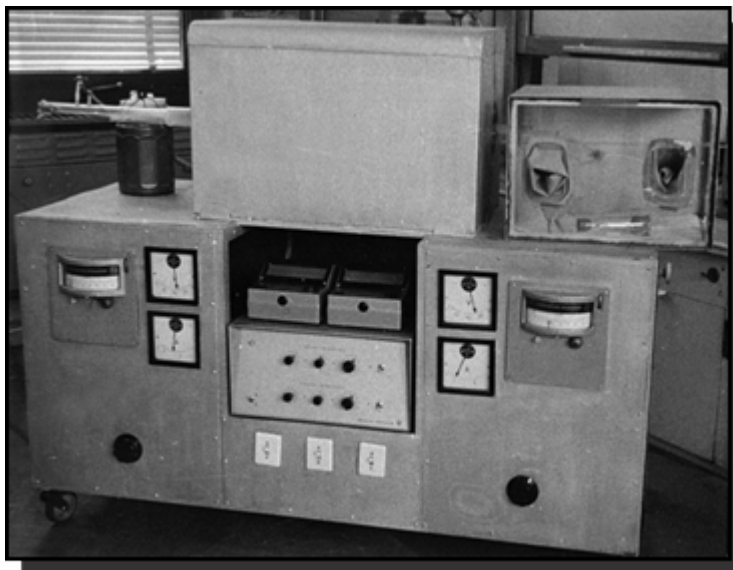
Type 1080 Photorepeater – уређај који израђује коначну фотолитографску маску снимањем и мултиплицирањем првог умањења уз истовремено смањивање 3× и 10×.

Опрема за планарну технологију из 1967. године



Опрема за планарну технологију из 1967. године

Високотемпературна пећ са температурном регулацијом – сопствена конструкција



Green line уређаји за завршну монтажу транзистора

ЛЕВО: скрајбер (*scriber*)

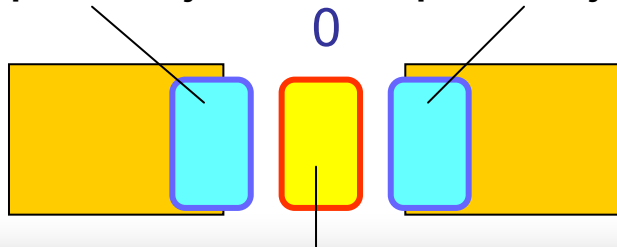
У СРЕДИНИ: уређај за термокомпресионо заваривање изводница (*wire bonder*)

ДЕСНО: уређај за позиционирање и заваривање транзистора за кућиште (*dice bonder*)

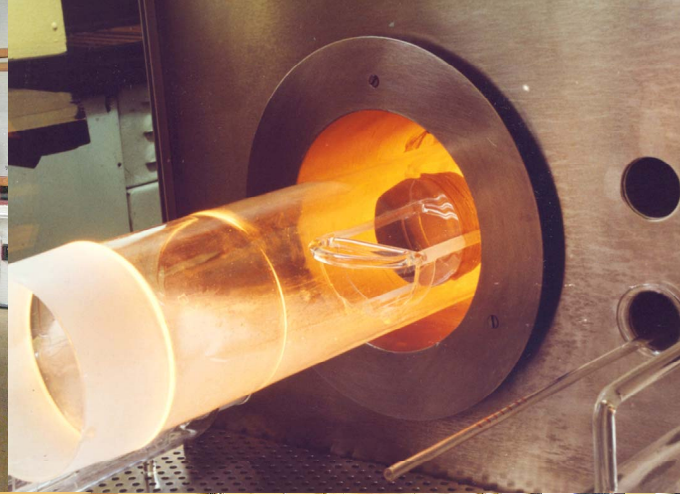


фотоћелија

фотоћелија



Светлосни спот галванометра



Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Нова опрема у чистој соби



Микро и нано електромеханички системи (MEMS - NEMS) и сензори

Нова опрема за карактеризацију



**iN10 Integrated IR Microscope
(Thermo Scientific Nicolet)**



**FT-IR 6700 Spectrometer
(Thermo Scientific Nicolet)**



**Scanning Probe Microscope
SPM Ntegra (NT-MDT)**

Научно наставна делатност

- Паралелно са научно-истраживачким радом из испред наведене проблематике, на Електротехничком факултету у Београду су формиран и одржавани курсеви на редовним студијама из предмета:

Полупроводници и полупроводничке направе
Оптоелектронске направе (дуже од 20 година)
Сензори и претварачи

- Експерименталне вежбе су организоване и одржаване у нашим лабораторијама и на нашој опреми (дуже од 15 година).
- Урађен је велики број дипломских и магистарских (мастер) теза и десетак докторских дисертација.

Закључак

Као што из претходног излагања произилази, моји сарадници и ја успели смо да код нас формирамо једну актуелну научно-истраживачку проблематику (област) и створимо потребне услове (опрема, кадрови) који омогућавају да се она и даље развија и прати светске трендове.

О актуелности проблематике најбоље сведочи чињеница да од укупних истраживања у нанотехнологијама око 30% чине истраживања посвећена сензорима.

Највећи број научно-истраживачких пројеката резултовао је компонентама и уређајима који су пласирани на нашем и светском тржишту.

И најзад, лабораторије о којима је била реч у овој презентацији, колико је мени познато, су данас једино место у Србији где се могу израдити полупроводничке и МЕМС-НЕМС сензорске компоненте (чипови) и системи.

Захвалност

У овом заједничком подухвату о коме сам до сада говорио, учествовао је велики број мојих колега и пријатеља којима дугујем захвалност.

Пре свих, то је проф. Димитрије Тјапкин, код кога сам одбранио дипломски, магистарски и докторски рад.

Посебну захвалност дугујем мојим колегама и вршњацима Милољубу Смиљанићу и Милану Матићу, који су са мном остали до краја.

Захвалност дугујем свим садашњим и бившим сарадницима Центра за микроелектроске технологије и монокристале ИХТМ-а, а посебно Жарку, Ивани, Катарини и Драгану који су заслужни (или криви) што ова презентација изгледа како изгледа.

И на крају, велику захвалност дугујем мојим родитељима и члановима моје породице:

Ниди, Драгани и Ивану.

SPEED BUMP **DAVE COVERLY**

