

ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ ПОЛУПРОВОДНИКА И ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ТЕХНОЛОГИЈА У БЕОГРАДУ

**Зоран Ђурић,
Милољуб Смиљанић
Жарко Лазић**

Садржај презентације

- Период до 1962
- Период од 1962 до 1967
- Развој планарних силицијумских транзистора 1967
- Развој првих силицијумских интегрисаних кола 1968
- Развој оптоелектронских компонената 1975
- МЕМС: развој сензора притиска 1983 до данас

Период до 1962

(преузето из "Почеци и развој истраживања из области физике чврстог стања код нас", проф. Д. Тјапкин 2005)

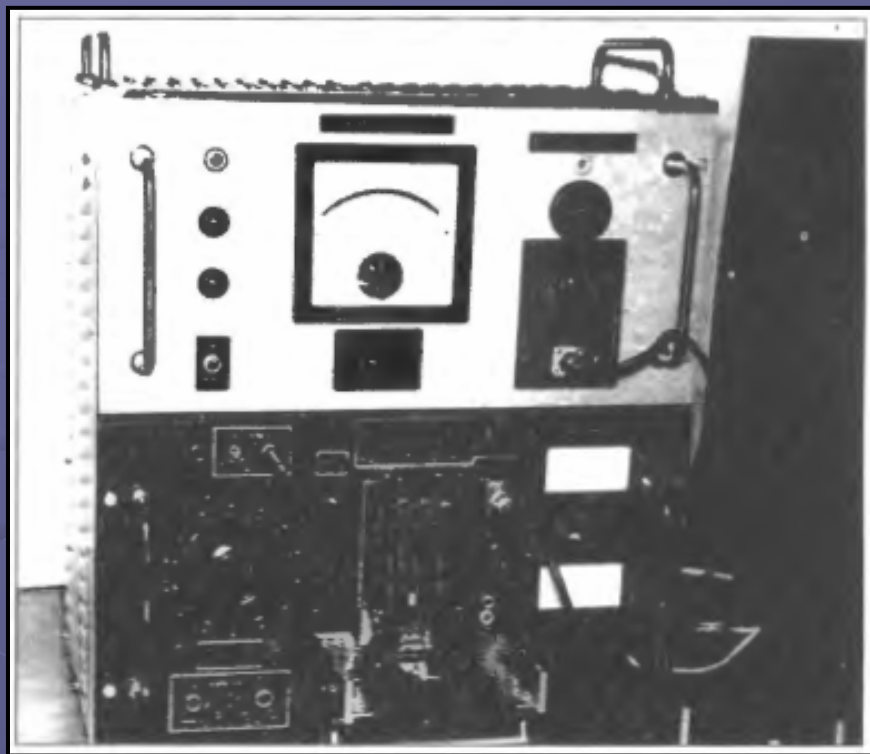
- 1954 Група младих истраживача са ЕТФ-а и ТМФ-а, ентузијаста за примену нових материјала, иницирала је почетна истраживања у области физике и технологије полупроводника и полупроводничких саставних делова (тадашњи асистенти Миодраг Јанчић, Димитрије Тјапкин и Душан Трифуновић).
- 1955 Формирана је **Група за полупроводнике** при ЕТФ-у у Београду. Групом су руководили проф. Радован Марковић (ЕТФ) и проф. Миро Арсенијевић (ТМФ). Циљ рада су била примењена и развојна истраживања на полупроводничким материјалима (монокристали германијума и силицијума) и компонентама (диодима и транзисторима).
- 1955 Први двогодишњи уговор **Група за полупроводнике** потписала је са Савезном индустријском комором, а односио се на освајање силицијумских транзистора. У то време силицијумски транзистори нису били сасвим освојени ни на западу, па такво "обећање" се може објаснити само младалачким заносом предлагача уговора.

Период до 1962

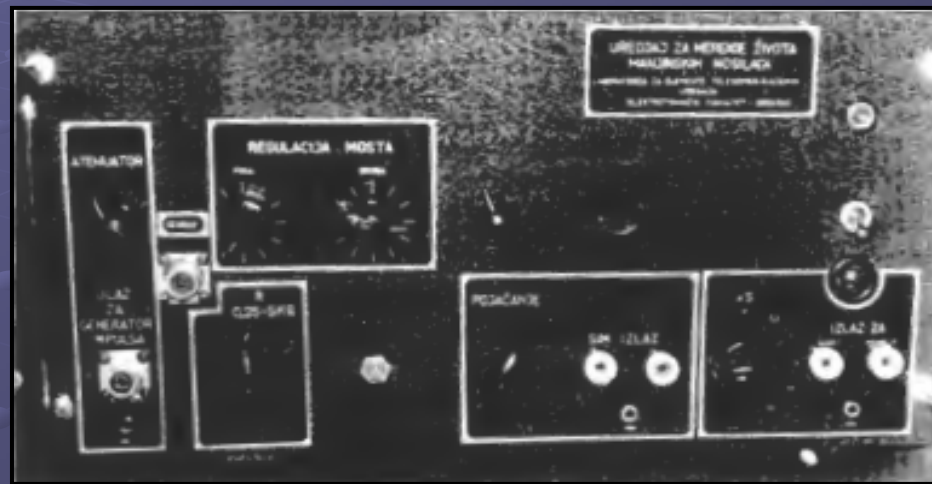
- У високошколској настави полупроводници почињу да се проучавају на ЕТФ-у тек после формирања Одсека за техничку физику и нуклеарну технику 08.11.1955 на 9. седници Савета ЕТФ. Уведени су нови предмети: Физичко техничка мерења и предмет Полупроводници.
- 1957 Започета су дугорочна истраживања са Војно техничким институтом (ВТИ).
- 1958 Групи за полупроводнике прикључују се асистенти П. Николић и А. Валчић, као и В. Цвекић, а касније и инж. Ђорђе Бугариновић. Развијени су прототипови германијумских диода (GD81) и транзистора (GT370), који су касније пренети у РР Заводе (касније ЕИ) - за производњу, а такође и технологија израде монокристала германијума. Започети су и радови на фотодиодама од индијумантимонида.
- Упоредо са горњим активностима, развијана је методика електрофизичких и електронских мерења, јер готових уређаја ни на светском тржишту готово да није ни било. Израђено је преко 20 уређаја.

Требало би нагласити да, **МЕРЕЊИ ОБЈЕКТИВНОМ АРШИНОМ, ОВАЈ РАЗВОЈ НИЈЕ МНОГО ЗАОСТАЈАО ЗА СВЕТСКИМ.**

Период до 1962

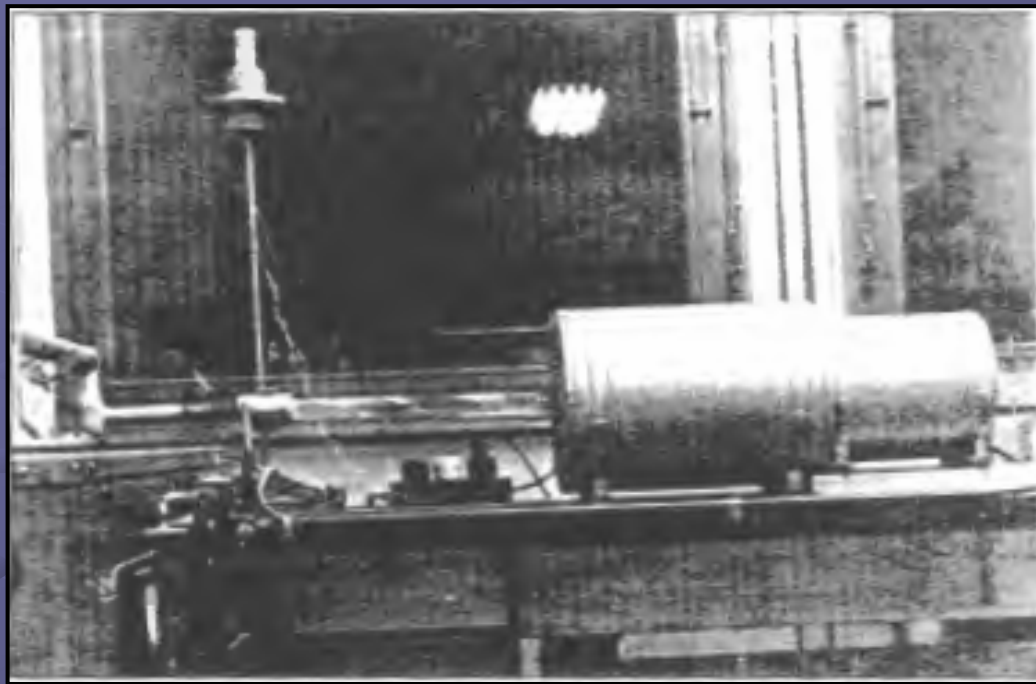


Уређај за мерење специфичне електричне отпорности и Холове константе у полупроводницима. Поред рада са једносмерном струјом, развијан је метод мерења са наизменичном струјом, што има низ предности (1958).

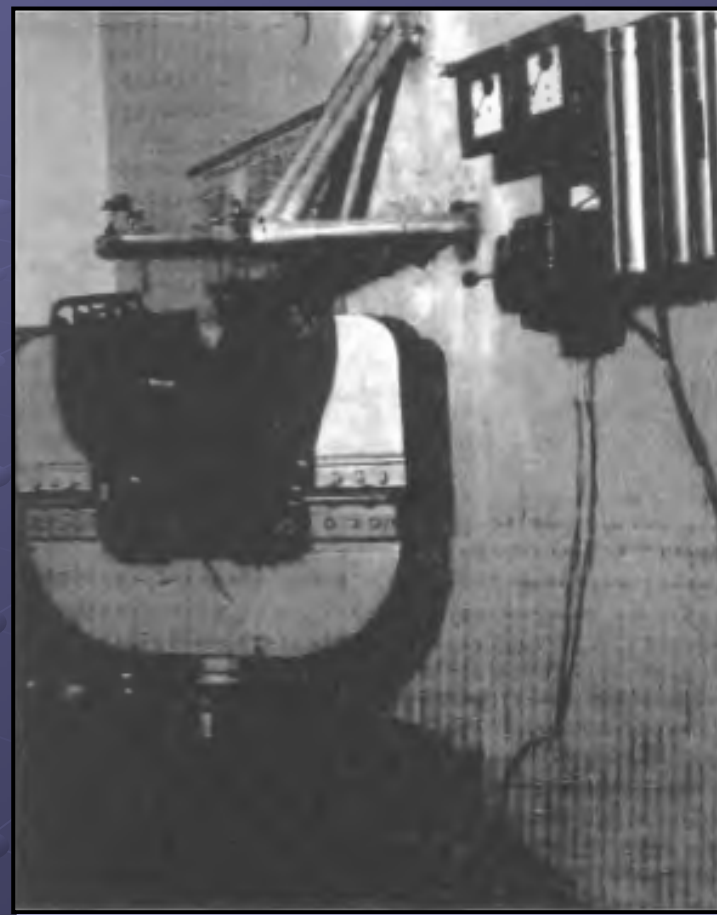


Предња плоча уређаја за мерење времена живота мањинских носилаца развијеног у Групи за полупроводнике (1958)

Период до 1962



Уређај за дифузију арсена у германијум
за израду транзистора GT 370 (1960).



Велики магнет израђен у Заводу за
физику техничких факултета
(асист. Милан Тодоровић, (1965)

Период до 1962

Паралелно развоју технологије, мерних уређаја и полупроводничких елемената, појавили су се први научни радови:

- D. Tjapkin et DJ. Bugarinović, EVOLUTION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES TENSIONS DE CLAQUAGE DANS LES TRANSISTORS, Communic. Du Colloque Int. Sur les Dispositifs Semiconducteurs, livre I, pp. 294-310, Paris 1961
- A. V. Valčić, A PROCESS FOR OBTAINING SINGLE CRYSTALS WITH UNIFORM SOLUTE CONCENTRATION, Solid State Electronics, Vol. 5, pp. 131-134, 1962

Објављен је и први докторат:

А.В. Валчић: "Нова метода за добијање монокристала са сталном концентрацијом примеса", ТМФ, 1962

- 6.маја. 1961 Основан Институт за физику, са директором проф. Александар Милојевић
- 1961 Исте године основан је и Институт за хемију, технологију и металургију (ИХТМ), на челу са доц. Миодрагом Јанчићем.

Период до 1962

- У периоду од 1962 до 1976 у оквиру Одељења за физику полупроводника Института за Физику и Одељења за микроелектронске технологије ИХТМ-а, објављено је око 70 научних радова у домаћим и страним часописима и око 100 у зборницима са научних скупова. Одбрањено је **9 докторских дисертација** и **11 магистарских теза**. Из овог периода требало би истаћи следеће радове:
- Д. Тјапкин, НОВ МЕТОД ОДРЕЂИВАЊА ПРОФИЛА ПРЕЛАЗА, Зборник материјала XIII конференције ЕТАН-а, стр. 503-510, јун 1969.
- Z. Djurić, M. Smiljanić, D. Tjapkin, P-N TRANSITION CAPACITANCE, Solid State Electronics, Vol. 14, pp. 457-466 (1971)
- Z. Djurić, Ž. Spasojević, D. Tjapkin, ELECTRON GROUND STATE IN THE SEMICONDUCTOR INVERSION LAYER AND LOW FREQUENCY MIS CAPACITANCE, Ibid, Vol. 19, pp. 931-934 (1976)

Овај последњи рад је пионирски рад из области квантовања електронских стања у полупроводницима код нас. Он представља зачетак каснијих истраживања из области вештачког формирања зоналне структуре, тј. проблематике суперрешетки, квантних јама итд, код нас.

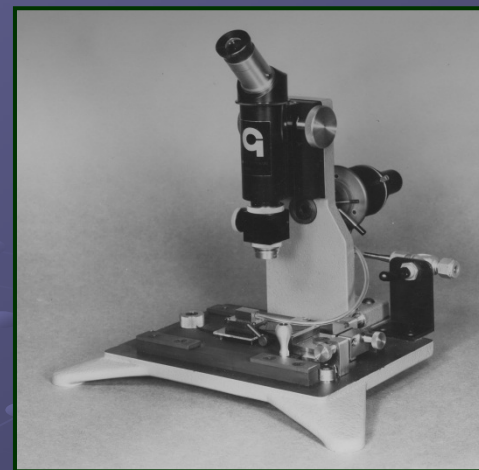
Период после 1962: важнији научно истраживачки пројекти и резултати

- | | |
|---|------|
| ✓ Силицијумске соларне ћелије | 1964 |
| ✓ Високо фреквентни силицијумски планарни транзистори | 1967 |
| ✓ Полупроводнички микрофон | 1968 |
| ✓ Прва силицијумска интегрисана кола | 1968 |
| ✓ MOS транзистор са ефектом поља | 1970 |
| ✓ Загревни слојеви од SnO ₂ | 1972 |
| ✓ Танкослојни атенуатори | 1972 |
| ✓ Si p-i-n фотодетектор | 1975 |
| ✓ Полупроводнички ласер са једним хетероспојем | 1977 |
| ✓ Први МЕМС 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 |
| ✓ МЕМС ИЦ детектори | 2010 |
| ✓ Сензори на бази микро-нано гредица | 2011 |

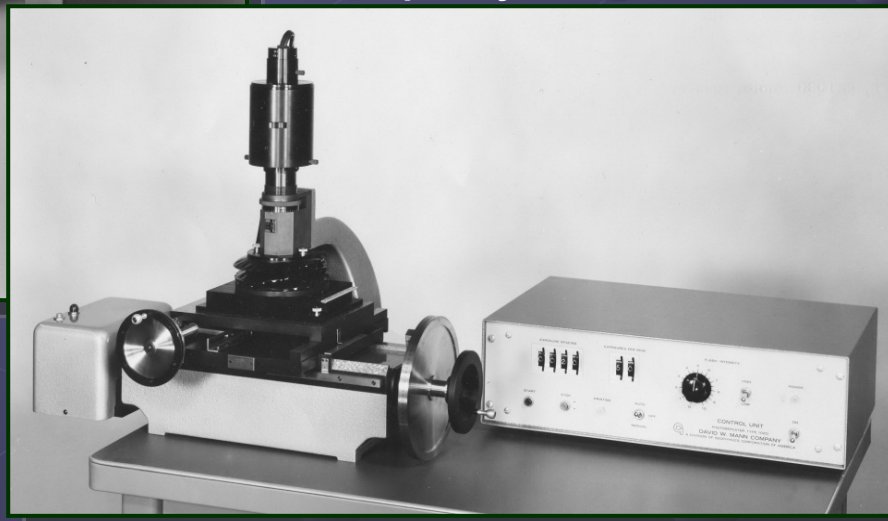
Опрема за израду маски из 1967. године



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 992А



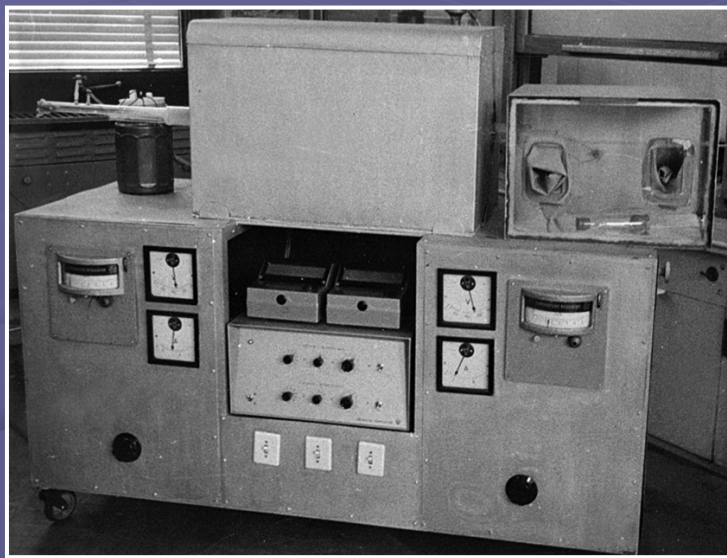
Type 1080 Photorepeater – уређај који израђује коначну фотолитографску маску снимањем и мултиплицирањем првог умањења уз истовремено смањивање 3× и 10×.

Опрема за планарну технологију из 1967. године



Опрема за планарну технологију из 1967. године

Високотемпературна пећ са температурном регулацијом – сопствена конструкција

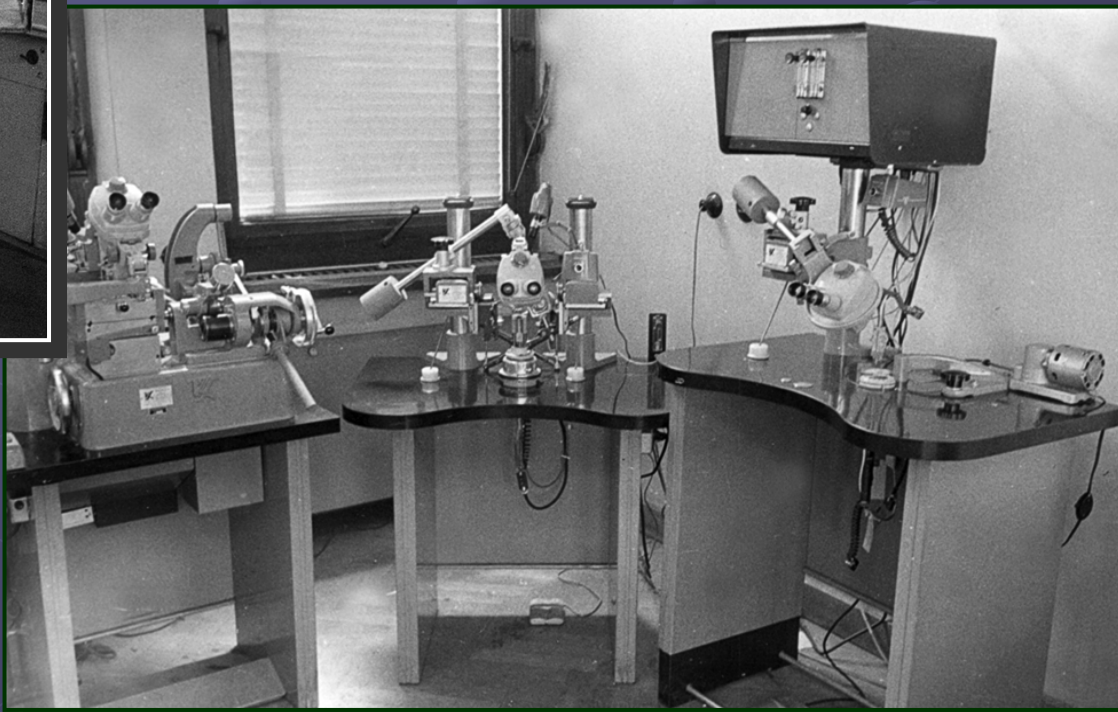


Green line уређаји за завршну монтажу транзистора

ЛЕВО: скрајбер (*scriber*)

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

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



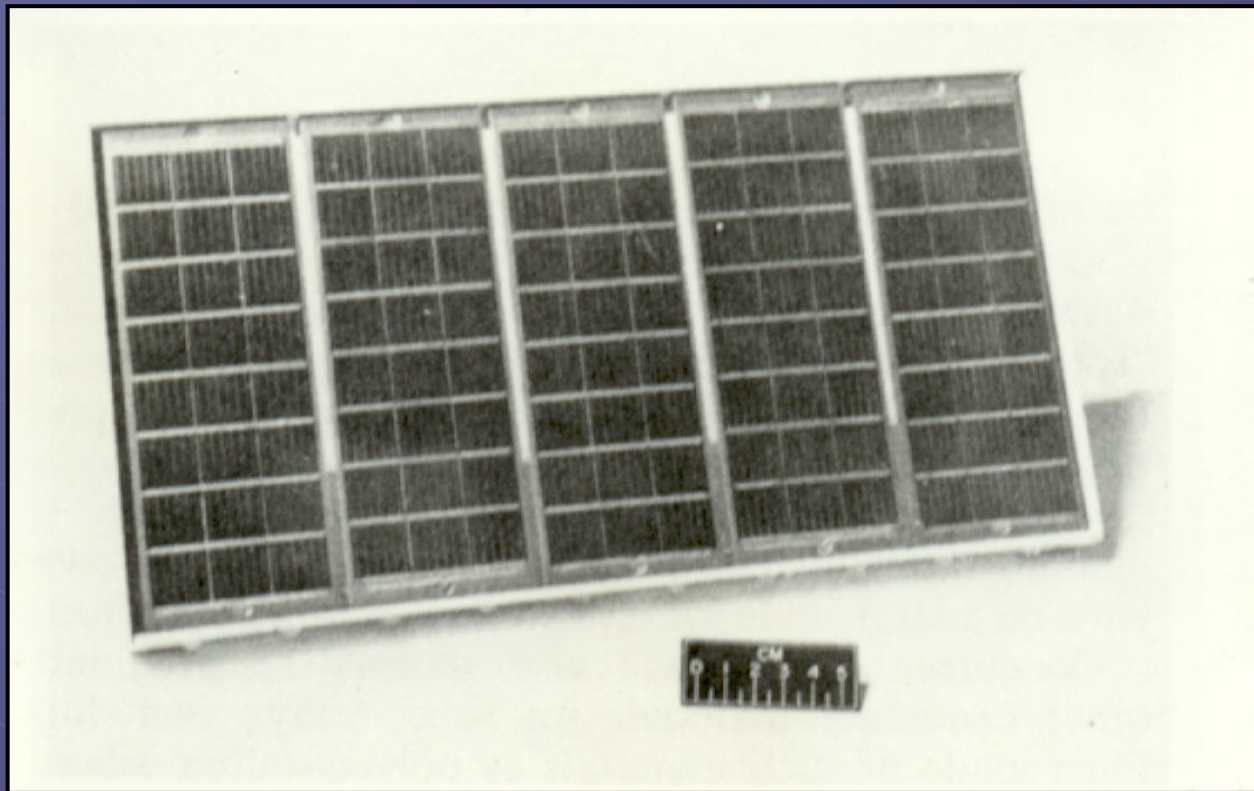
фотоћелија

фотоћелија



Светлосни спот галванометра

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, nanoшење танких слојева, сечење на чипове и завршну монтажу.

- Дијаметар силицијумских плочица ($20 \div 30$) mm
- Специфична отпорност ($1 \div 5$) Ωcm
- Оријентација (111)

Постигнуте карактеристике
планарних транзистора:

- $V_{\text{CBO}} - 100\text{V}$
- $V_{\text{CEO}} - 70\text{V}$
- $H_{21} - 80$
- $f_T - 120\text{MHz}$



Фамилија колекторских карактеристика снимљених
на трасеру транзисторских карактеристика

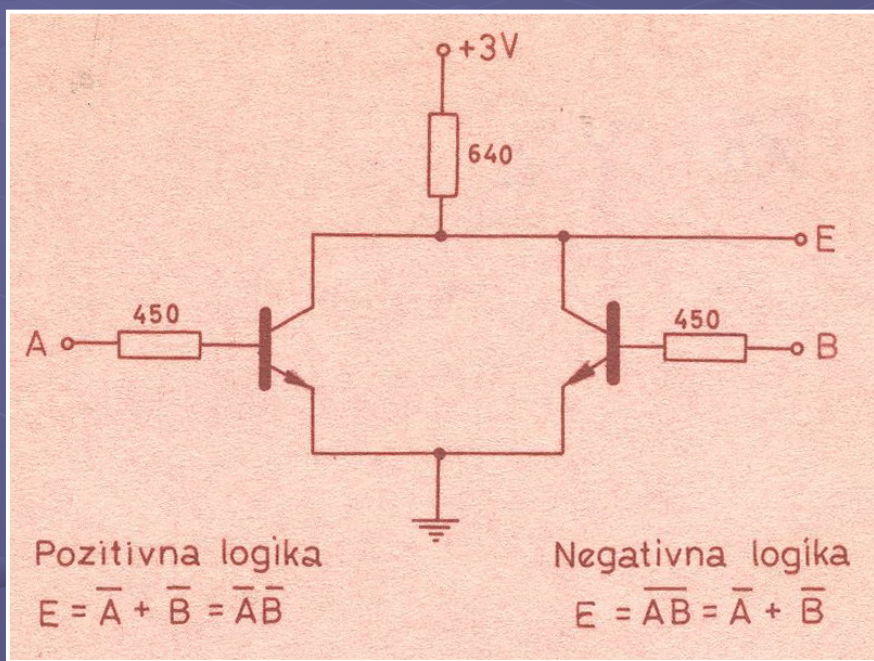
Освојене технологије за планарни транзистор (1967)

- ✓ Механичка обрада силицијума (сечење, брушење, хемијско нагризање и полирање)
- ✓ Израда фотолитографских маски (израда основног увећаног цртежа, снимање, умањење и умножавање ликова)
- ✓ Технологија и производња дејонизоване воде (јоноизмењивачке смоле)
- ✓ Прање силицијумских плочица
- ✓ Термичка оксидација силицијума (сува и влажна)
- ✓ Фотолитографија (наношење фоторезиста, експонирање и развијање)
- ✓ Дифузија примеса р (бор) и п (фосфор) типа из чврстих и течних дифунданата
- ✓ Карактеризација дифундованих слојева (одређивање профила концентрације и дубине дифузије)
- ✓ Вакуумско напаравање алуминијума за електричне контакте, легирање алуминијума и формирање Омског споја
- ✓ Сечење процесираних плочица на појединачне чипове, монтажа на кућиште и извођење електричних контаката (бондовање) златном жицом.

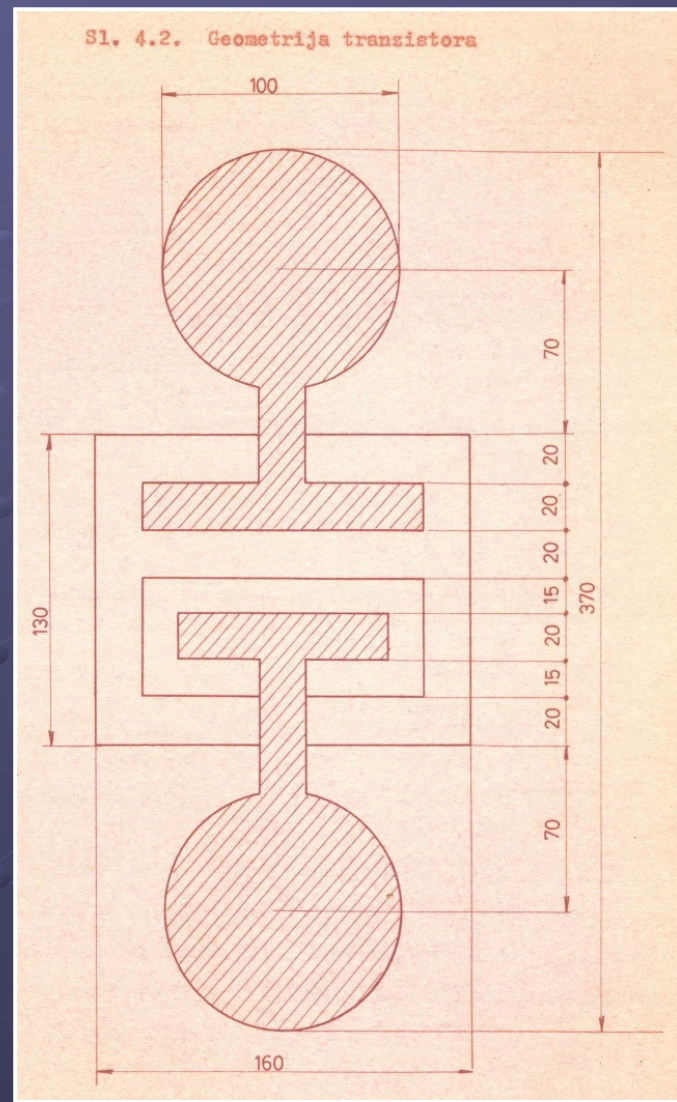
Пројекат: Интегрална кола 1968

Развијена су следећа дигитална интегрална кола:

ILI/I, NI/NI, FLIP-FLOP

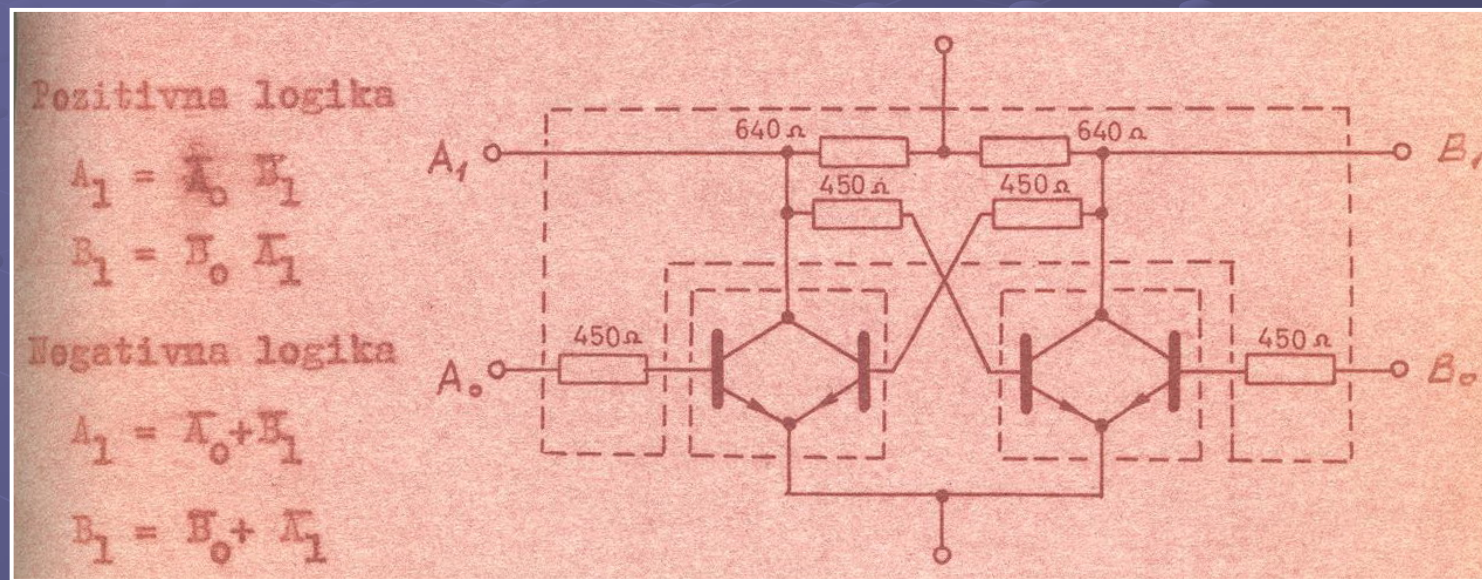


Електрична шема NILI/NI кола



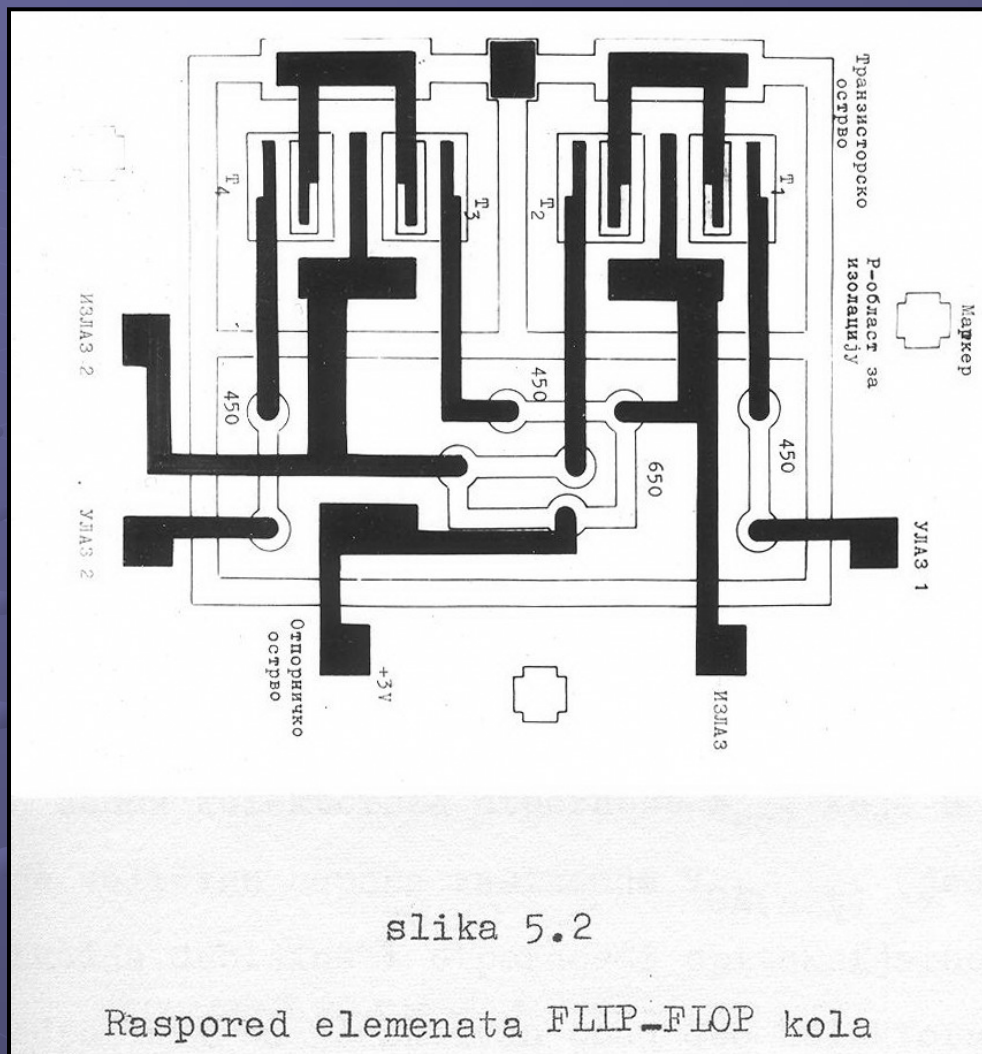
Димензије појединачног транзистора

Пројекат: Интегрална кола 1968



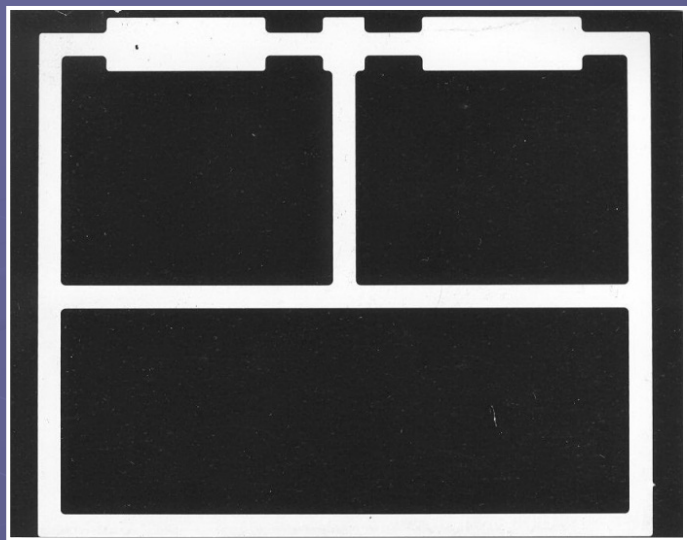
Електрична шема FLIP-FLOP кола

Пројекат: Интегрална кола 1968

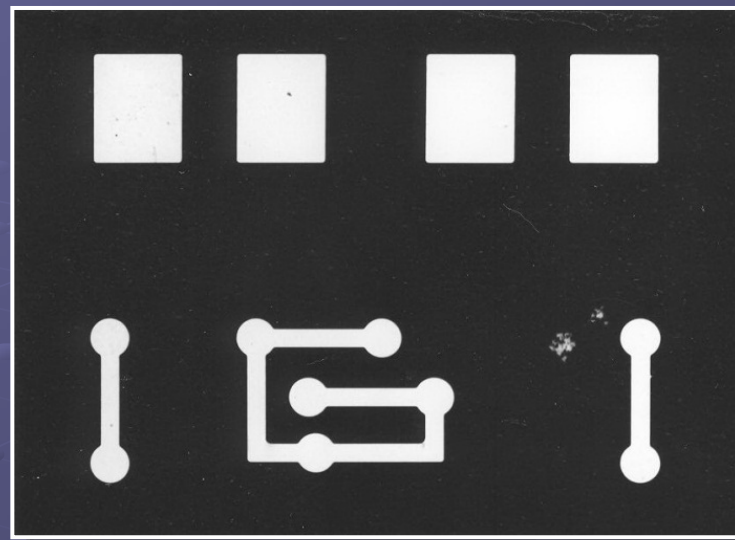


Распоред елемената FLIP-FLOP кола

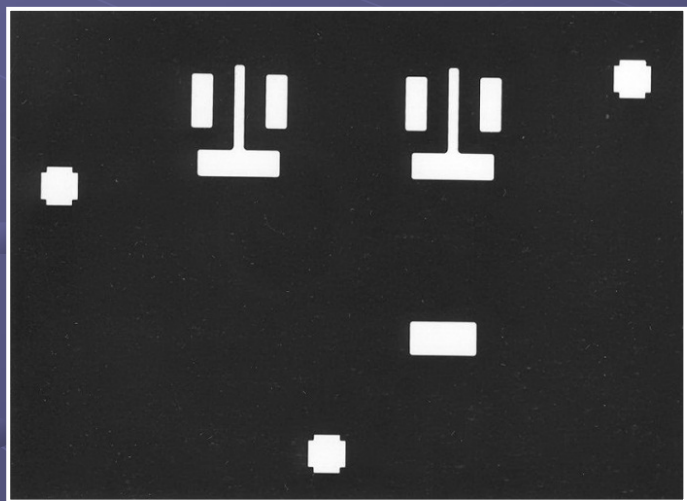
Пројекат: Интегрална кола 1968



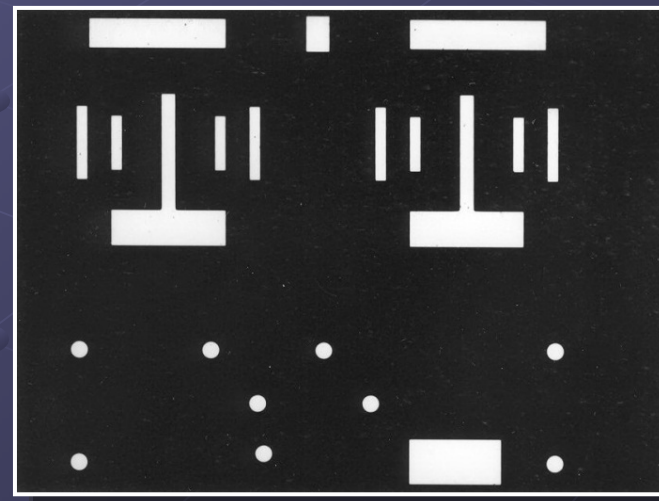
Дубока дифузија



Дифузија фосфора

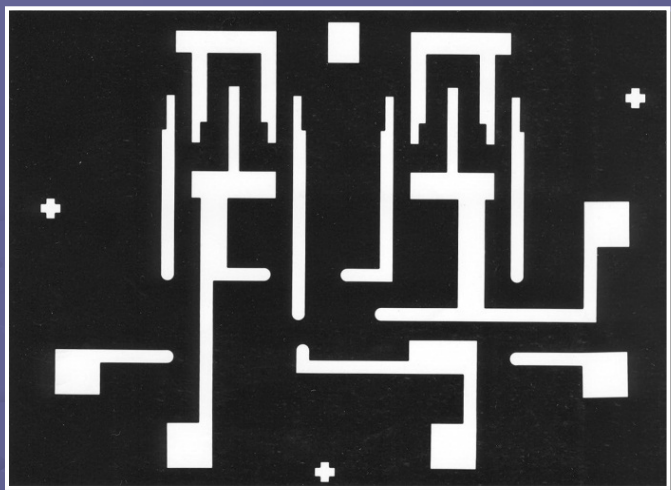


Дифузија бора

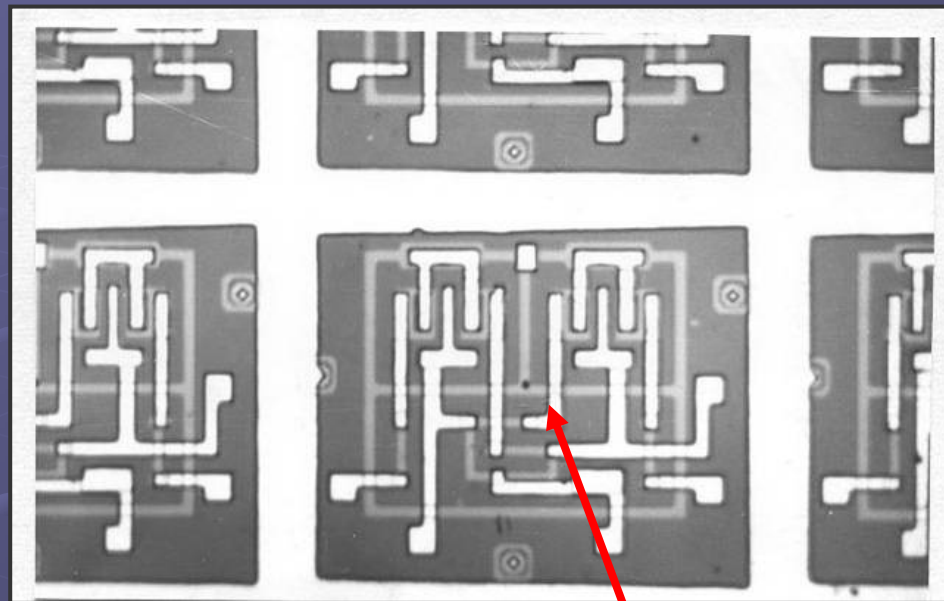


Отвори за контакте

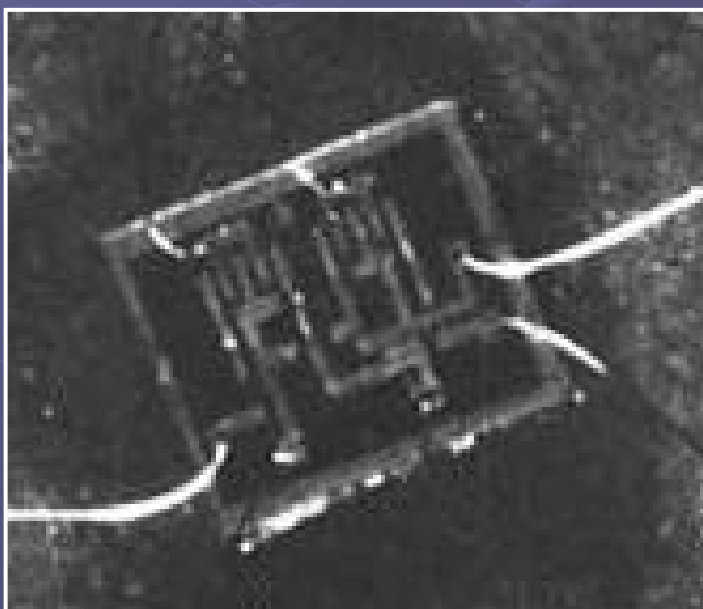
Пројекат: Интегрална кола 1968



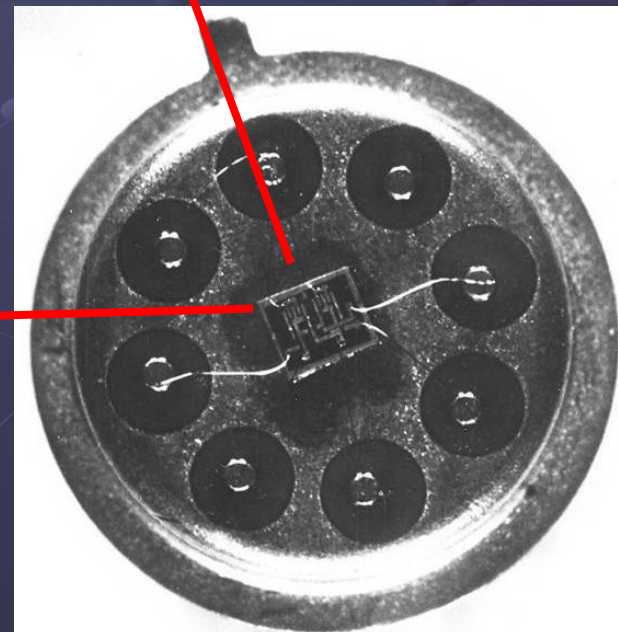
Метализација - алуминијум



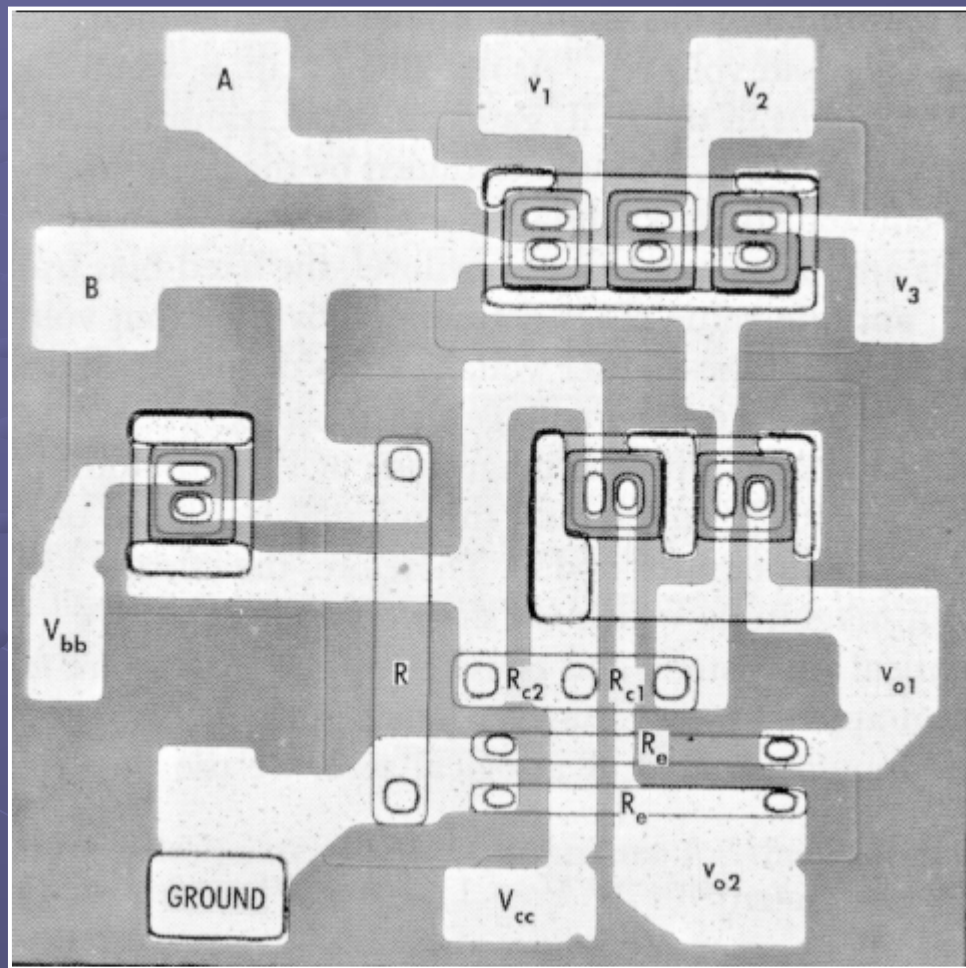
Процесирано коло



Реализовано коло
на ТО-5 кућишту



The First Integrated Circuits

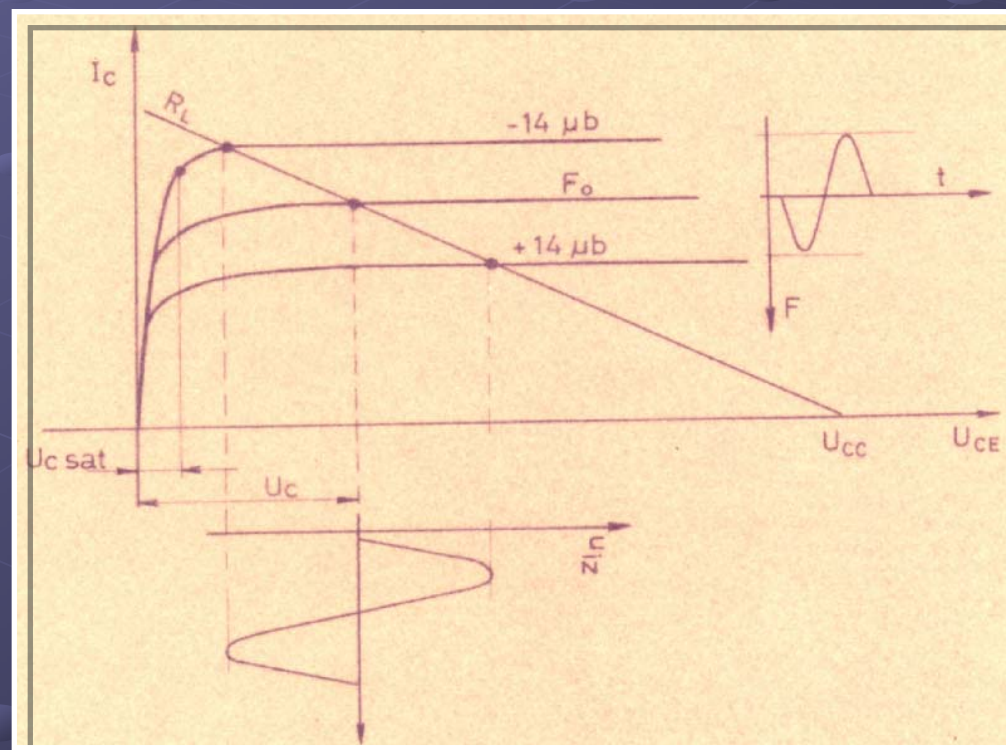
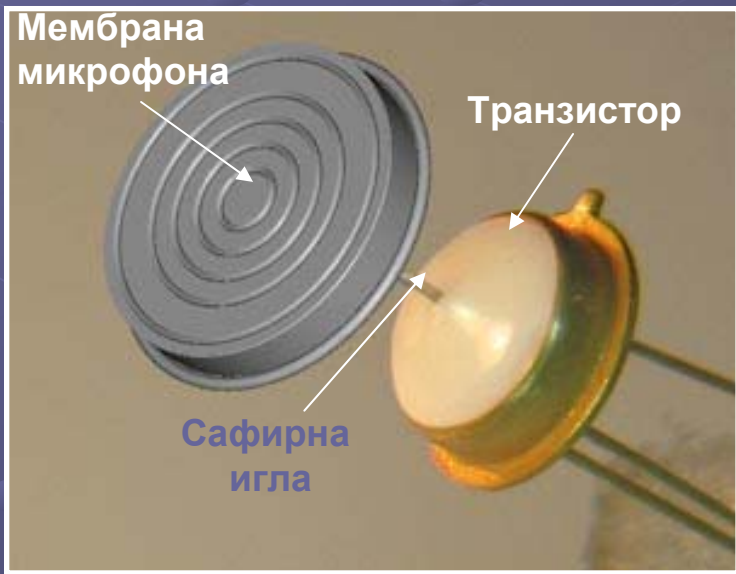
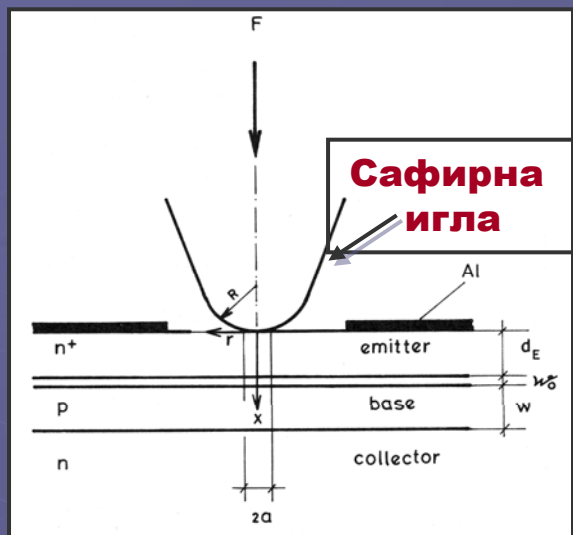


*Bipolar logic
1960's*

ECL 3-input Gate
Motorola 1966

*Преузето од
B. Nikolić, Berkeley 2002*

Полупроводнички микрофон (1968)



Принцип рада

Београд 1964-1968

Силицијумске фотодиоде 1975

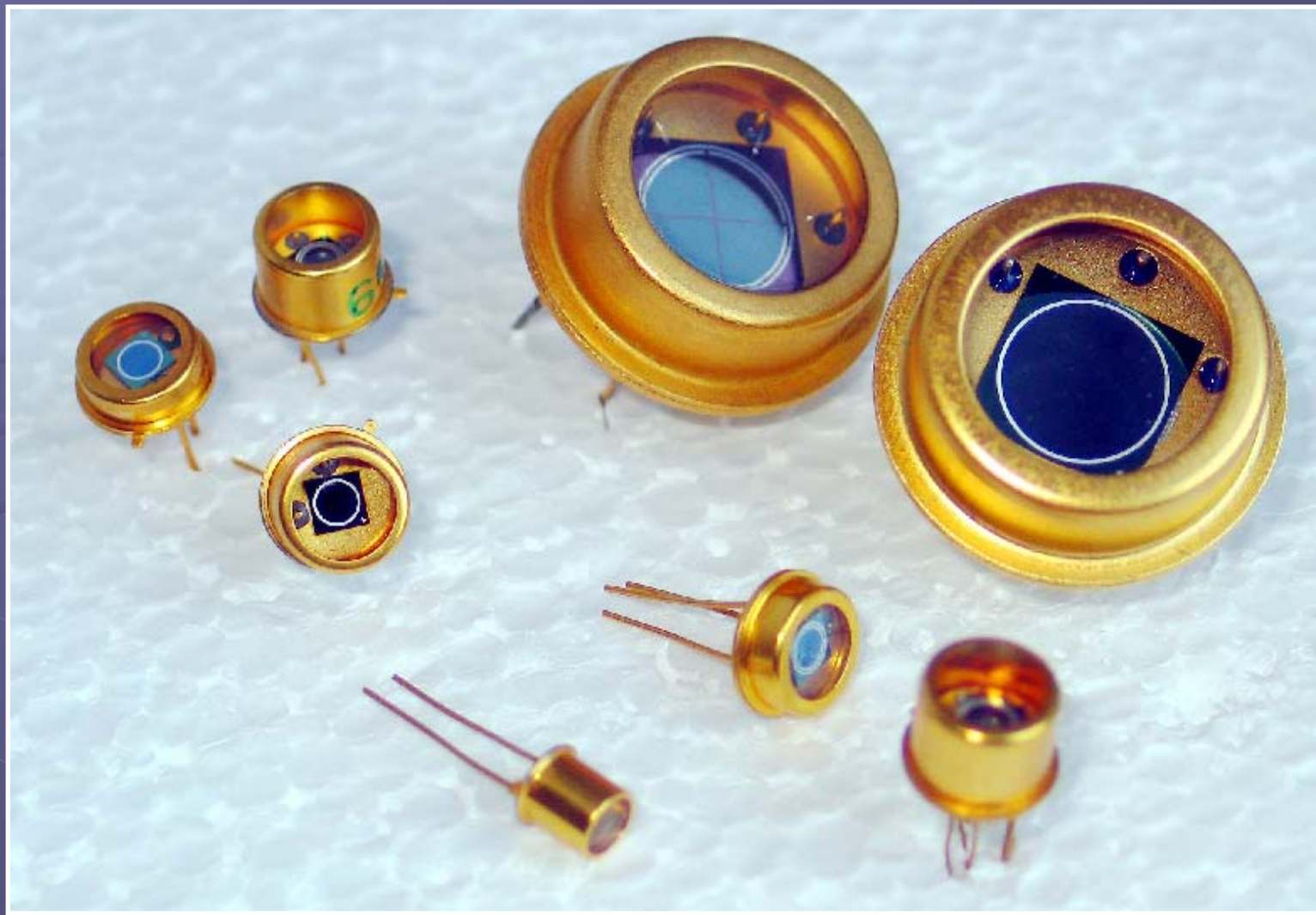
Рад у Србији (ИХТМ) у овој области започео је 1975. године и врло интензивно трајао десетак година, а и данас је веома актуелан.

Ради се о фотодиодама PIN типа.

ПРИМЕНЕ:

- ❖ Војне (ласерски вођене бомбе, даљиномери, детектори ласерског озрачења итд.)
- ❖ Оптичке (wireless) комуникације

Једно-елементне и квадрантне Si PIN фотодиоде



Све диоде су атестиране по војним стандардима

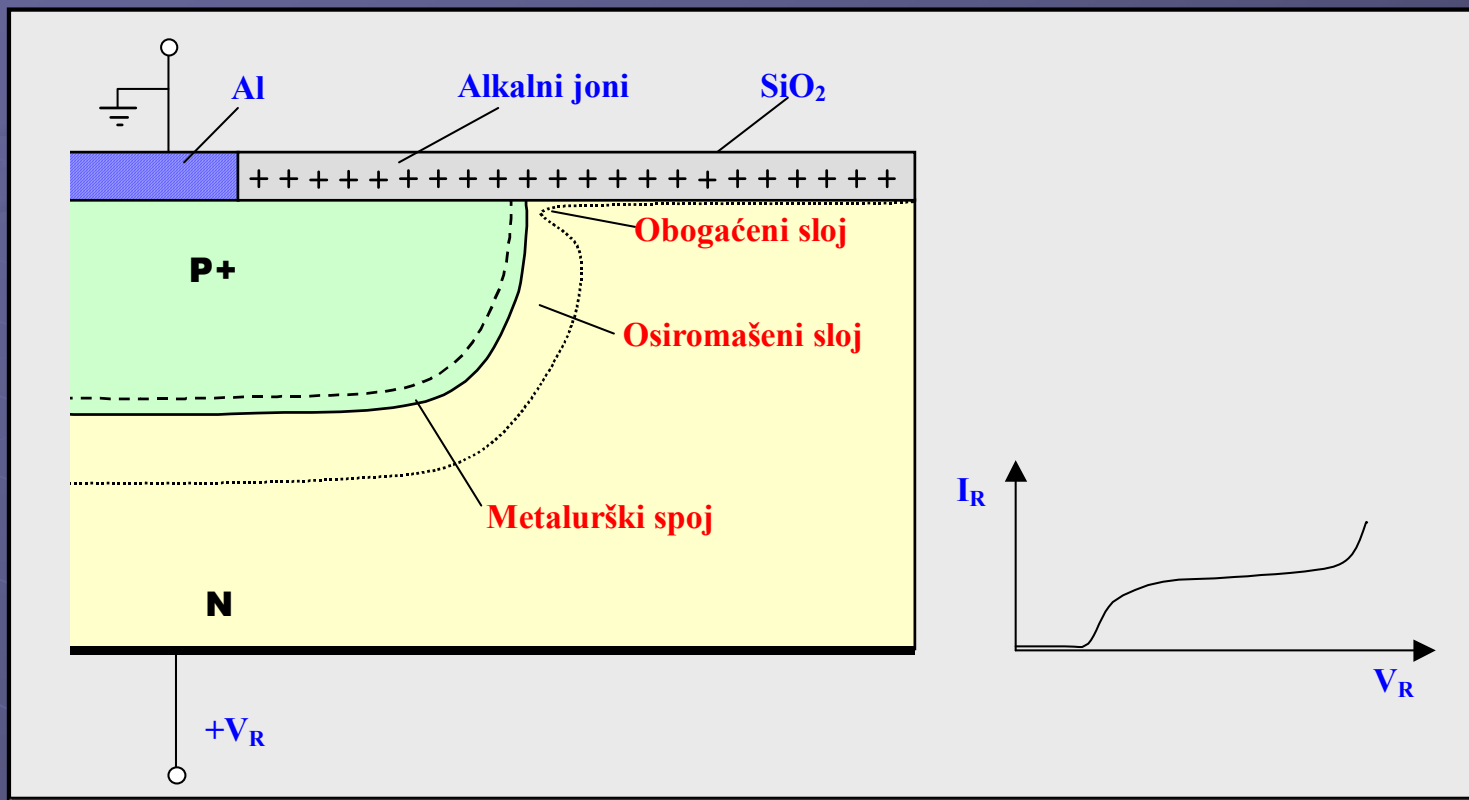
Фотодиоде P и N типа

Si фотодетектори раде у подручју таласних дужина од 200 nm до 1100 nm. У ИХТМ су развијена два типа фотодетектора:

- ❑ Фотодиоде на N-типу силицијума за детекцију од GaAs и GaAlAs емитера светлости (LD и LED) са таласном дужином максималне осетљивости између 800 nm и 900 nm
- ❑ Фотодиоде на високоомском P-типу силицијума са повећаном осетљивошћу на зрачење Nd-YaG ласера (1064 nm)

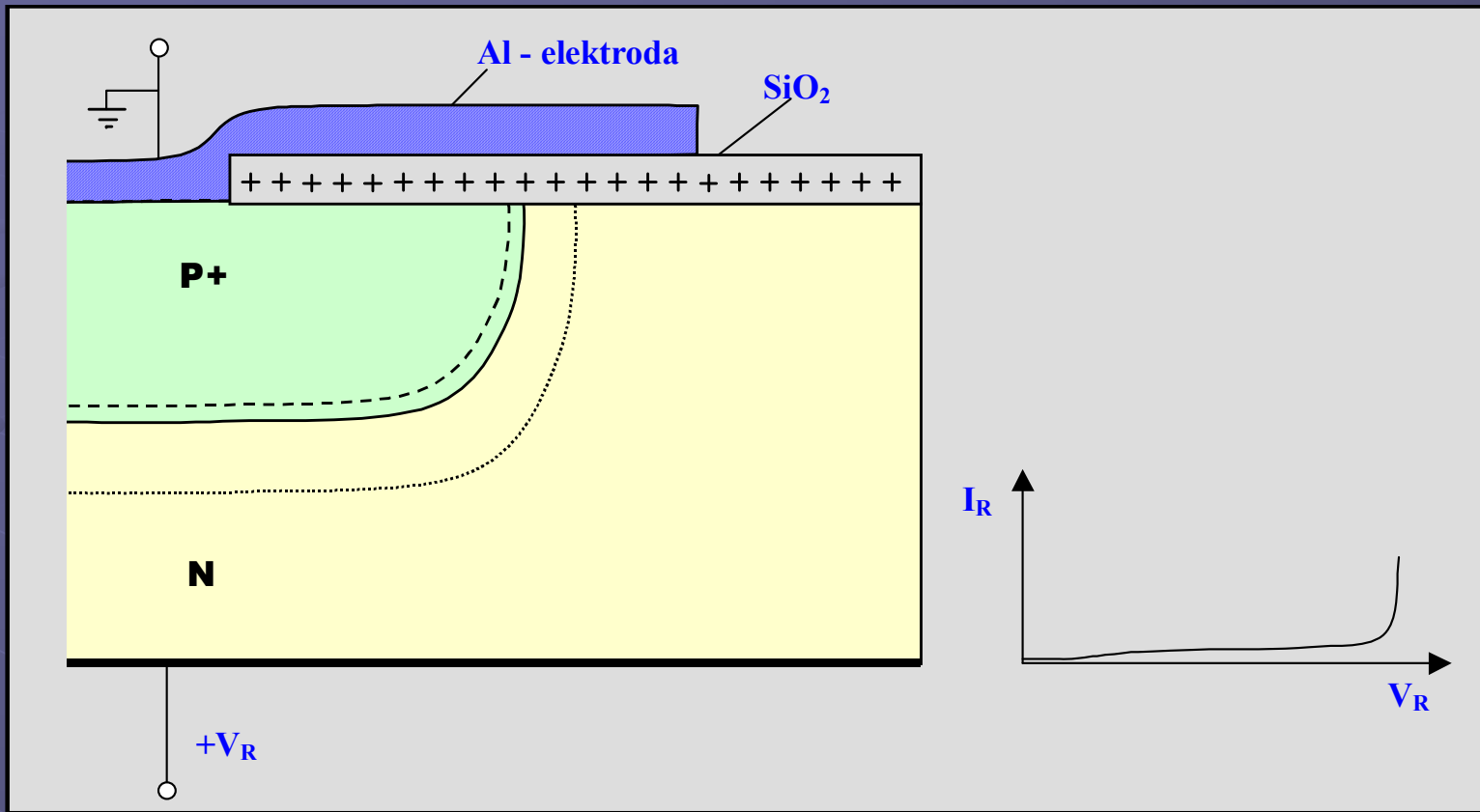
Развијено је и по војним стандардима атестирано шест типова фотодиода са параметрима као код најбољих светских произвођача.

Акумулациони слој



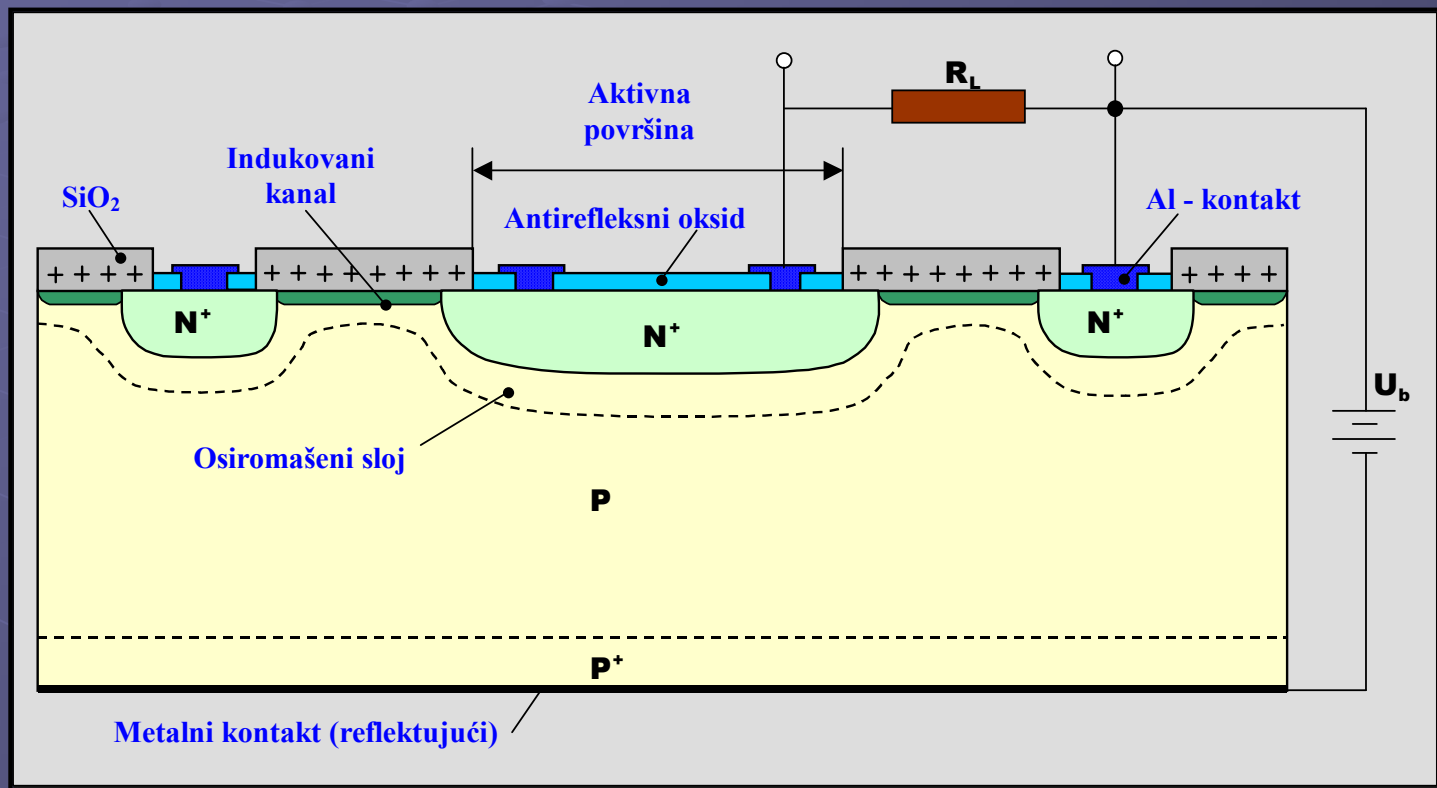
Формирање акумулационог слоја на површини Si индукованог алкалним јонима у SiO₂ код фотодиода на n-типу подлоге

Прекривајућа електрода



Прекривајућа електрода (field-plate) код фотодиода на n-типу подлоге

Заштитни прстен

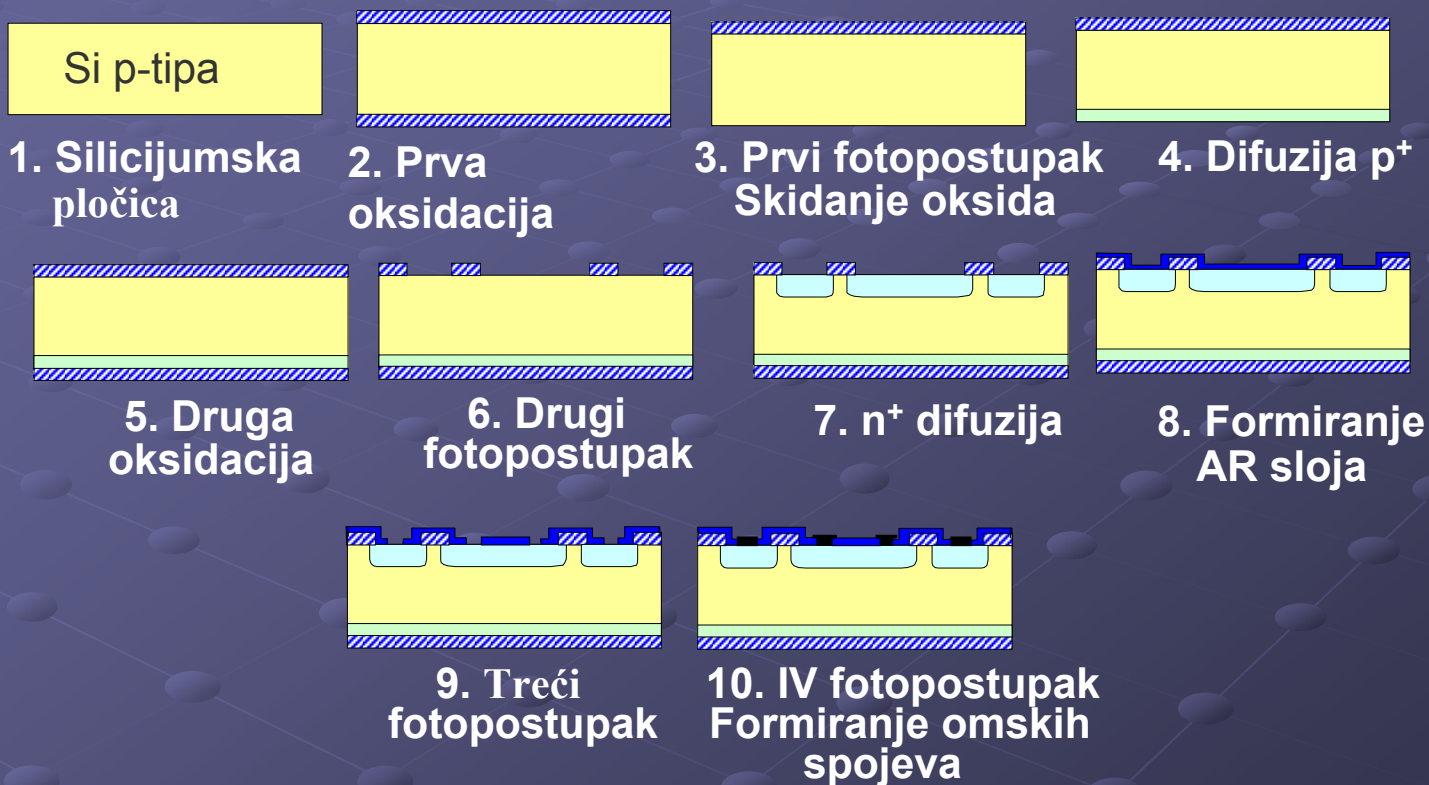


Заштитни прстен формиран дифузијом фосфора прекида инверзиони канал на површини Si, формиран због присуства алкалних јона у SiO₂ код фотодиода на P – типу подлоге.

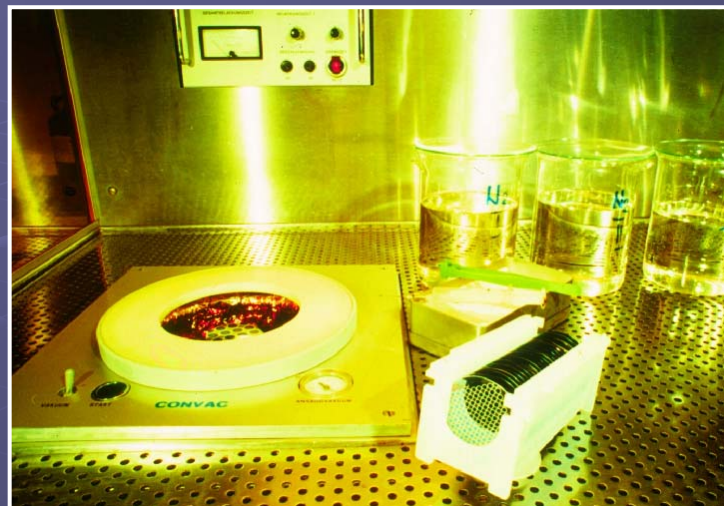
Технологија израде PIN диода

- ❑ Велике технолошке тешкоће настају због неопходности коришћења високоомског силицијума (неколико $k\Omega\text{cm}$, а код интегрисаних кола неколико Ωcm). Ово условљава низ проблема везаних за међуповршину Si - SiO₂. Да би се они спречили потребна је висока технолошка хигијена, али савремена технологија интегрисаних кола то не обезбеђује.
- ❑ До решења проблема долази се преко тзв. заштитних прстенова:
- ❑ На N-типу подлоге користи се заштитни прстен у облику металне електроде преко оксида на местима где p-n спој излази на површину силицијума.
- ❑ На P-типу подлоге користе се дифузиони заштитни прстенови n-типа којима се прекида инверзија око главне диоде.

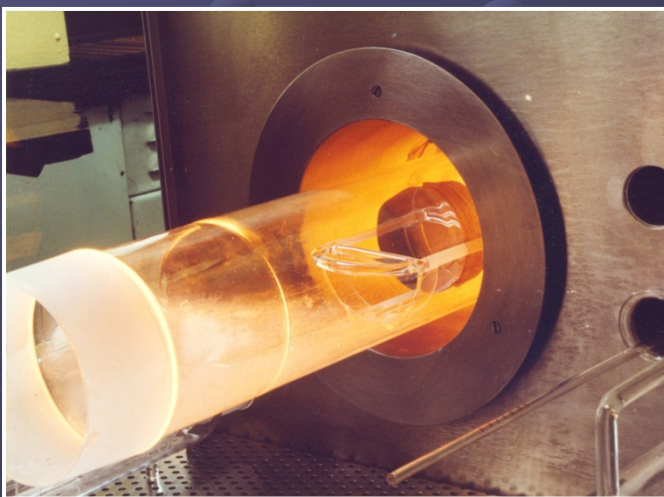
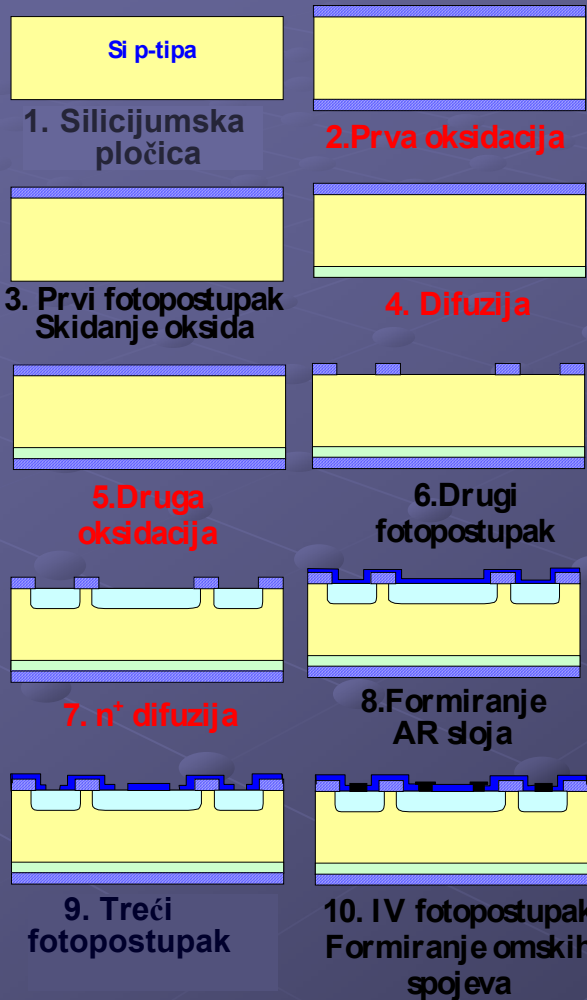
Технолошки поступци



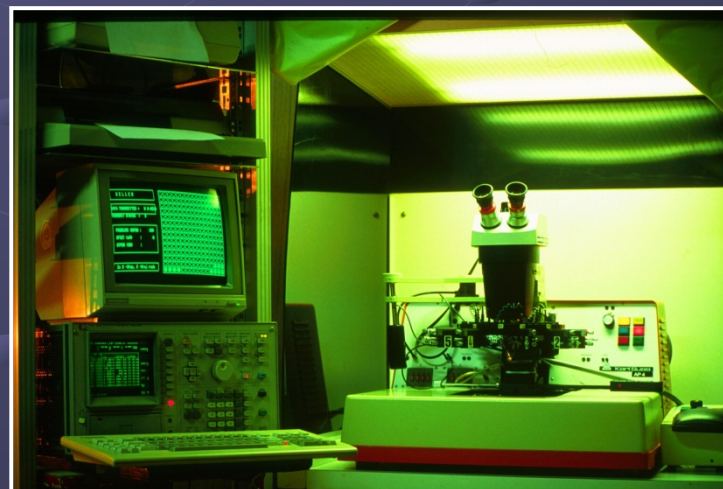
Технолошки поступци



Технолошки поступци

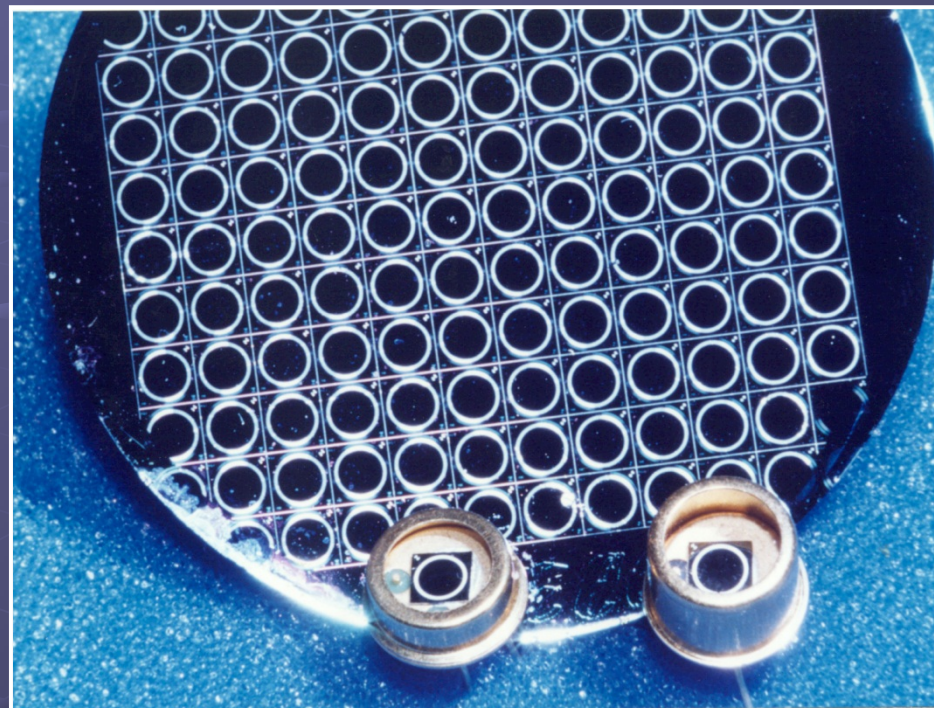


Технолошки поступци



Технолошки поступци

Монтажа пелета фотодиода на ТО-5
кућиште и инкапсулација



Si PIN ФОТОДИОДЕ FD5N

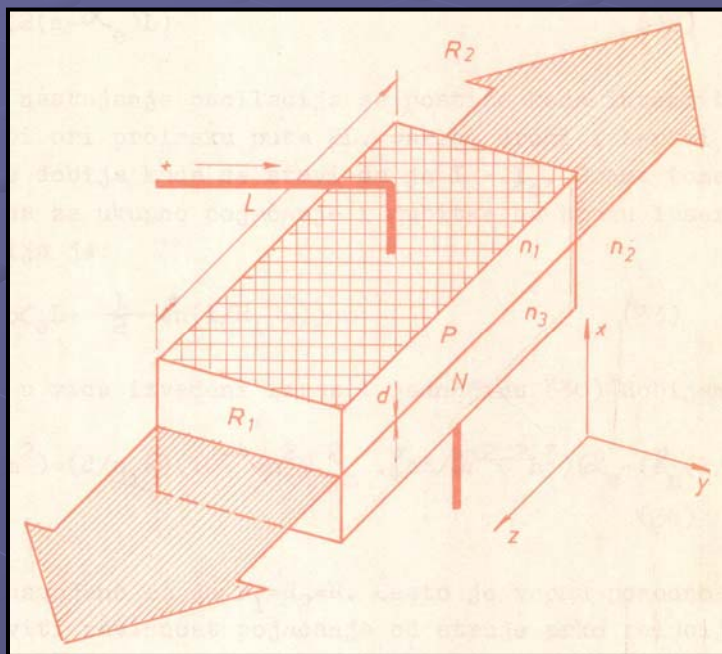
Комплетна процесирана
силицијумска плочица и готове
фотодиоде у ТО-5 кућишту

Силицијумске фотодиоде 1975

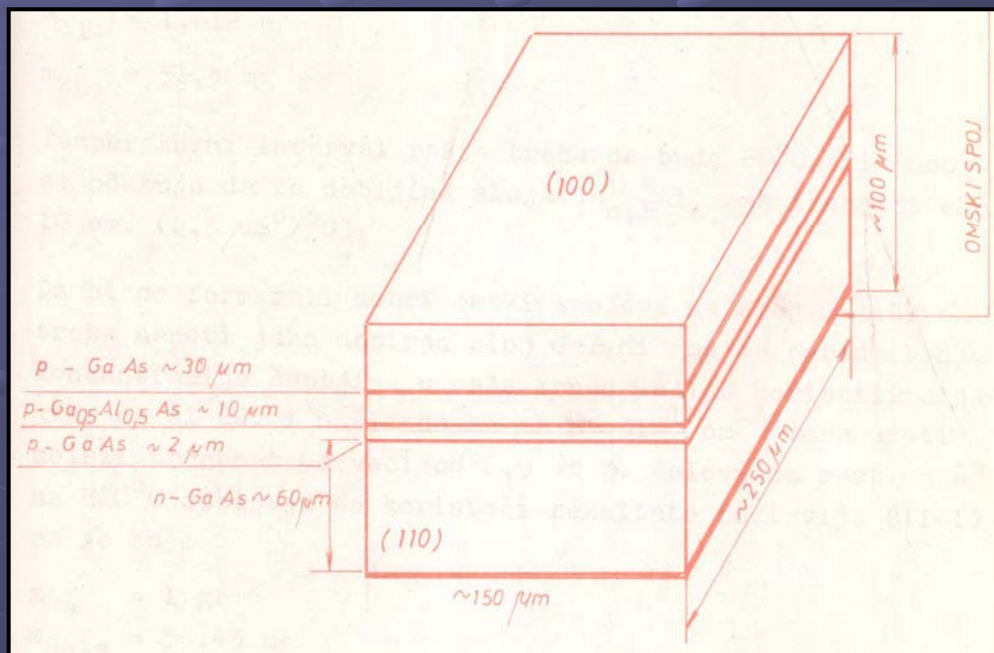


Полупроводнички ласери са једним хетероспојем (1977)

- ❖ Ласери су израђени сопственом технологијом епитаксије из течне фазе за бинарни (GaAs) и тернарни ($\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$) систем.
- ❖ Сопствени дизајн и израда графитне лађице

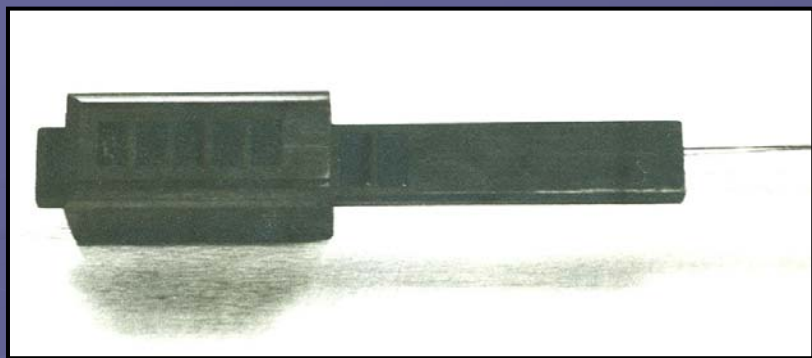


Ласерска диода са Фабри-Перо резонатором дужине L , активна област ширине (таласовод дебљине d) и индексима преламања n_1 , n_2 и n_3



Шематски приказ ласера са једним хетероспојем који је пројектован и на чијој технологији су обављена истраживања

Полупроводнички ласери са једним хетероспојем (1977)



Пројектована и израђена графитна лађица

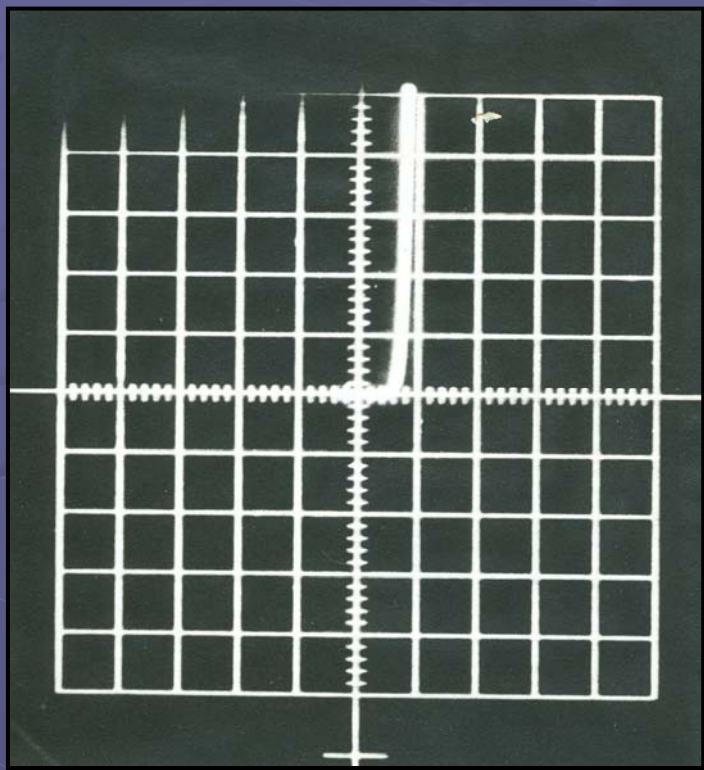


Попречни пресек хетероструктуре

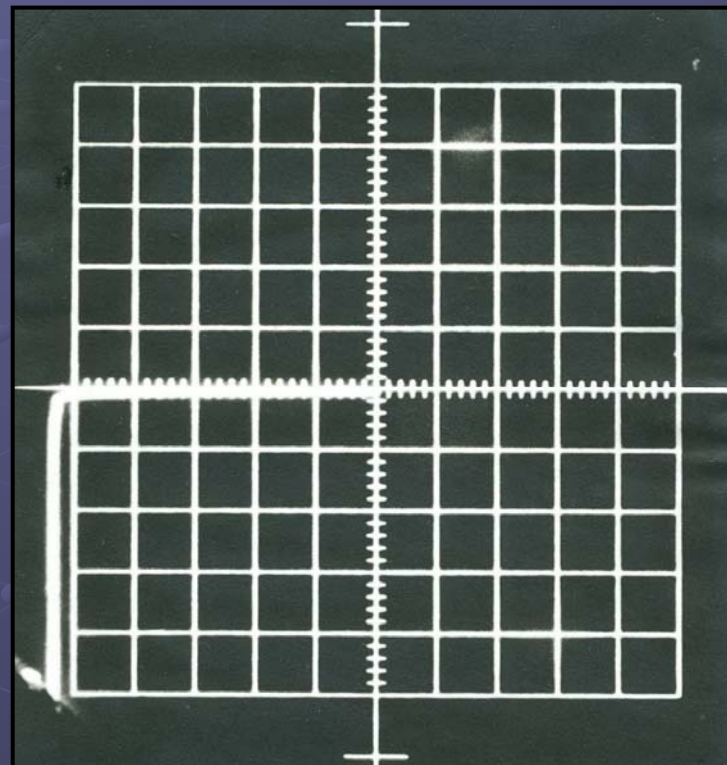


Попречни пресек хомоструктуре

Полупроводнички ласери са једним хетероспојем (1977)

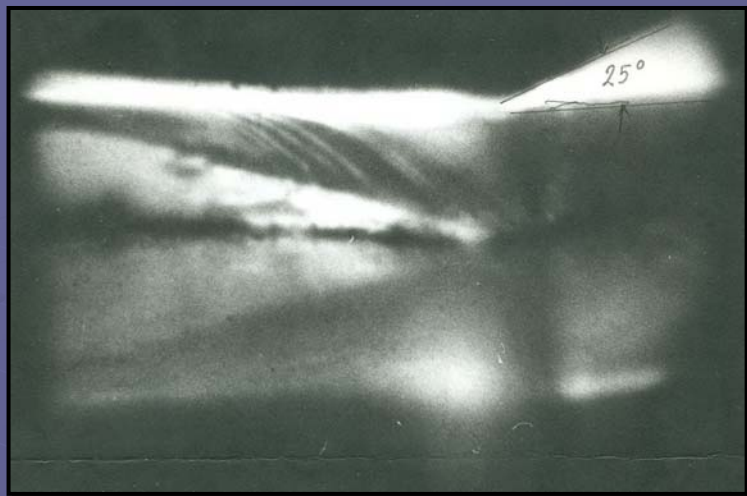


U-I карактеристика:
директни смер

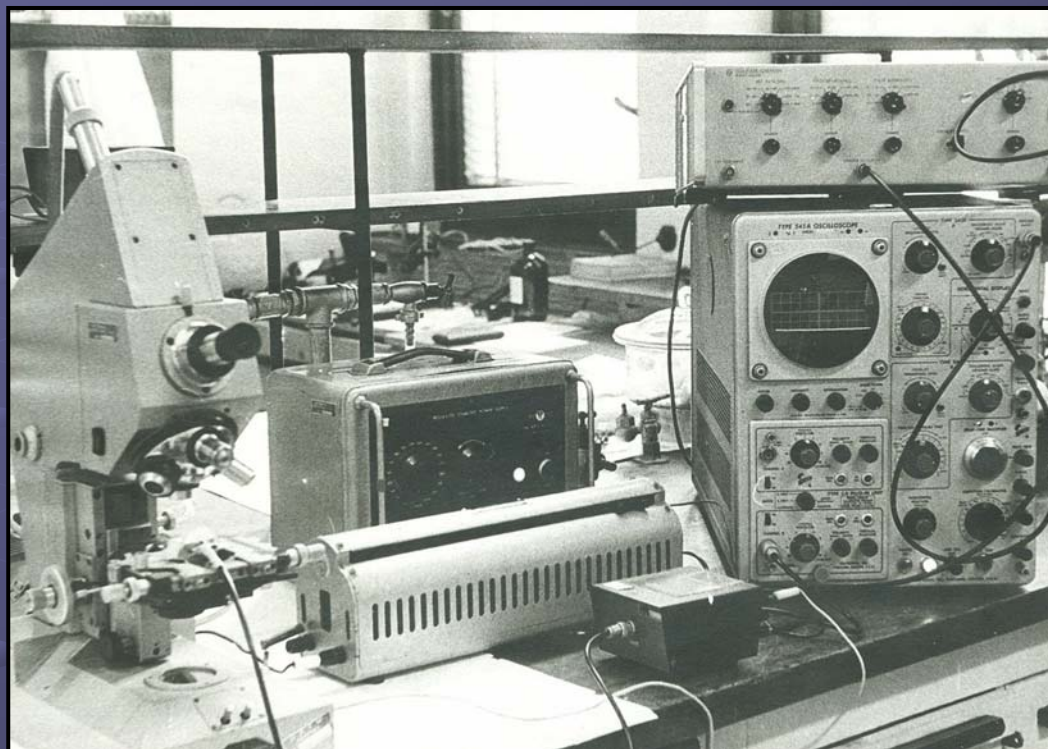


U-I карактеристика:
инверзни смер

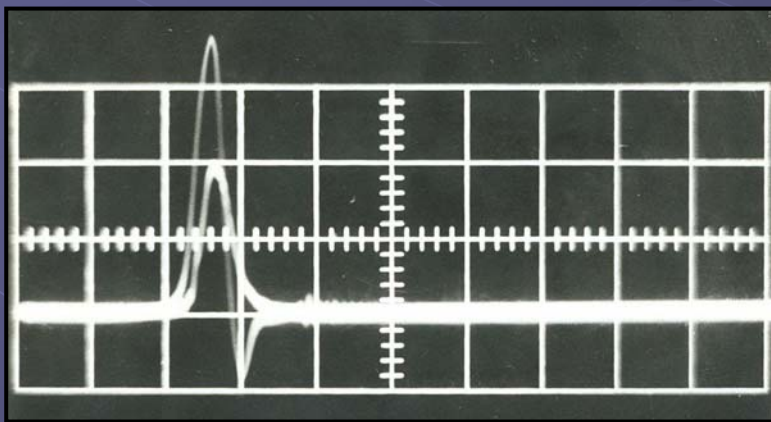
Полупроводнички ласери са једним хетероспојем (1977)



Тренутак отпочињања ласерских осцилација снимљен на инфрацрвеном микроскопу



Апаратура за мерење излазне снаге у функцији струје кроз р-п спој

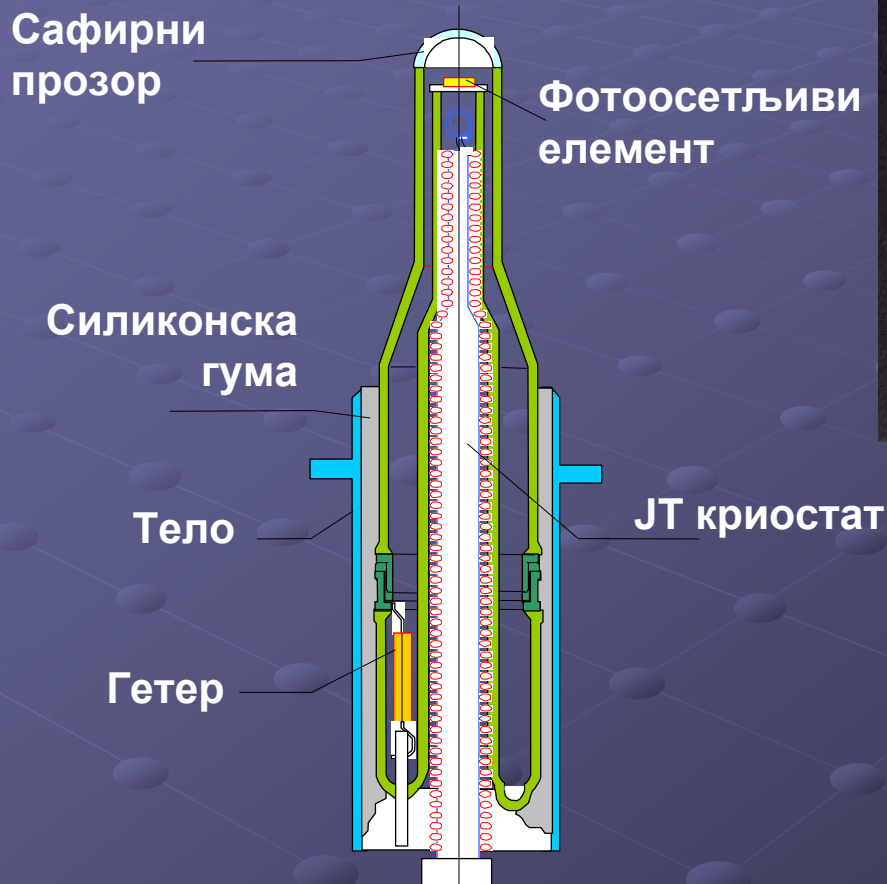


Изглед струјног импулса кроз р-п спој и напонског импулса фотодетектора који мери ласерско зрачење

InSb ФОТОНАПОНСКИ ДЕТЕКТОРИ 1979

- ❖ Употреба у војне сврхе – навођење на топле циљеве и ноћно осматрање (термовизија).
- ❖ Истраживања код нас започета су 1979. и завршена предајом прототипске партије са комплетном документацијом за производњу 1986.
- ❖ На пројекту је радило 20 сарадника ИХТМ у сарадњи са Институтом за физику, Београд и Институтом Zoran Rant, Slovenija
- ❖ Коришћењем Moss-Bursteinovog ефекта постигнуто је самофилтрирање нежељеног ИС зрачења
- ❖ Постигнута је потпуна заштита од статичког пробоја (иначе велики проблем свих произвођача ових детектора)

InSb инфрацрвени детектор (1986)



Жељена детективност (D^*)

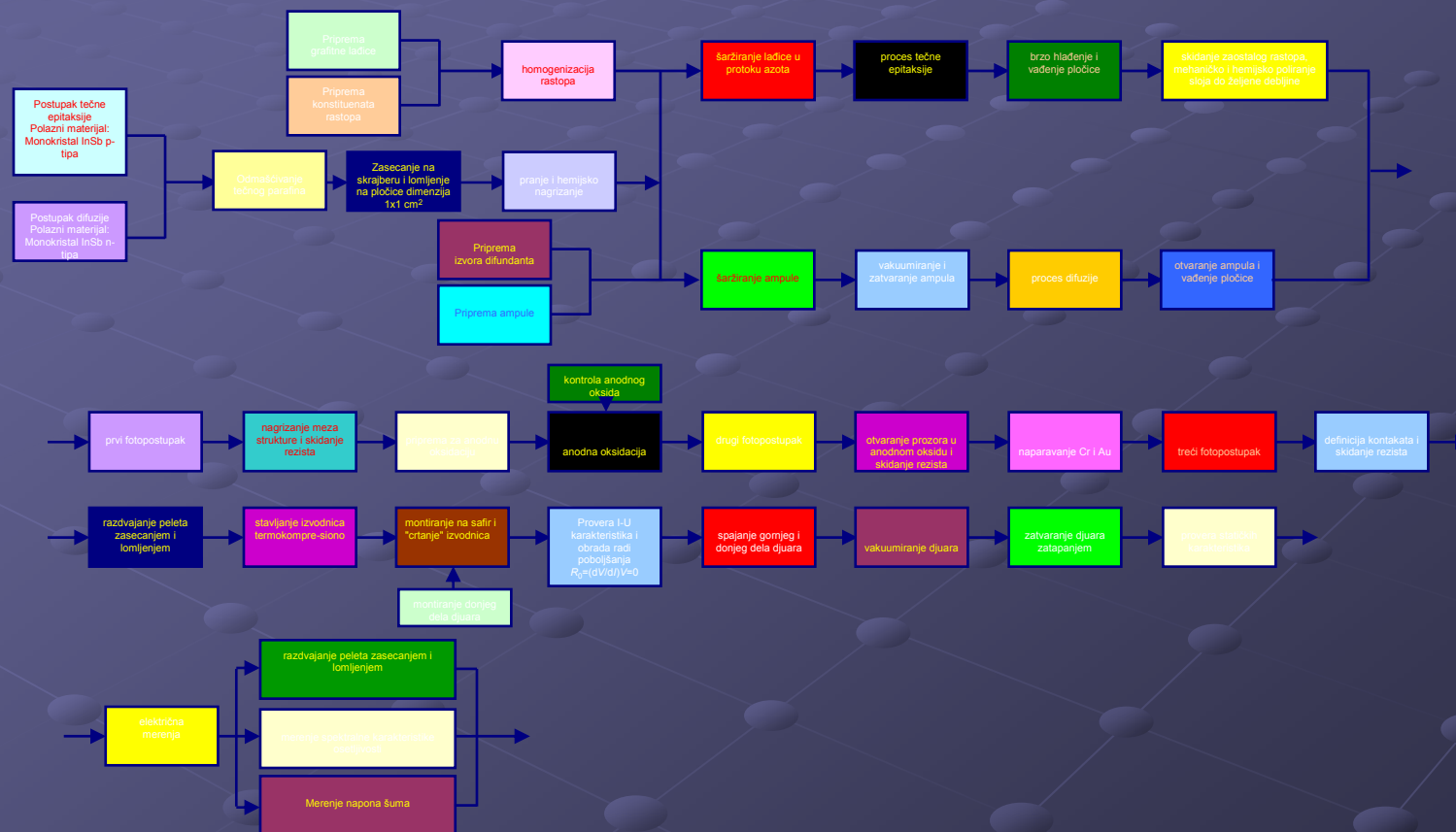


- Постизање жељених перформанси InSb детектора могуће је на основу врло комплексног технолошког ланца

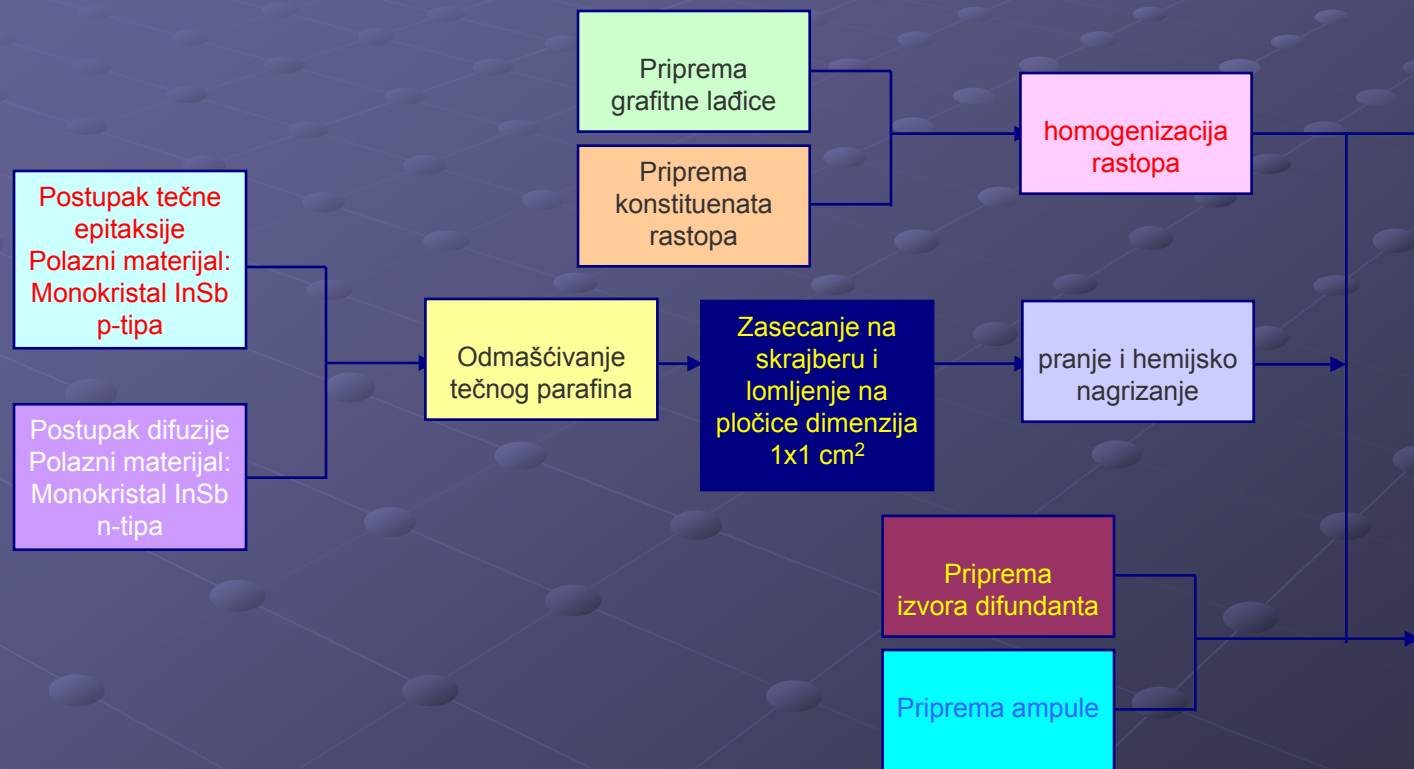


Технолошки
поступци

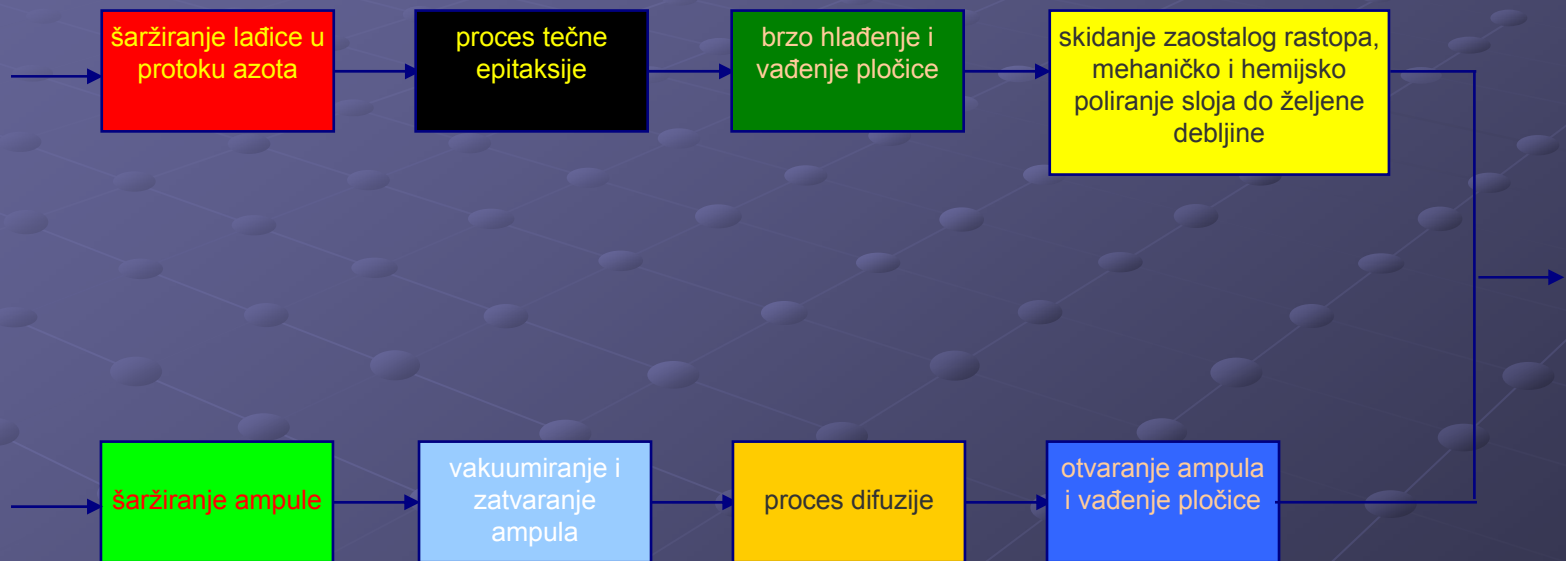
Неки технолошки поступци израде фотонапонског InSb детектора



Технологија 1



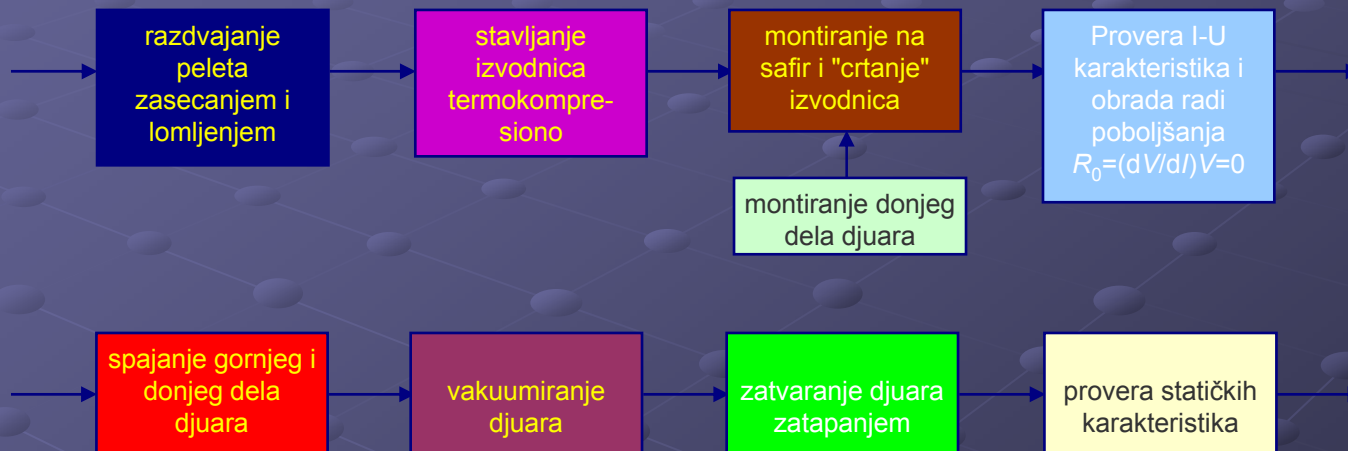
Технологија 2



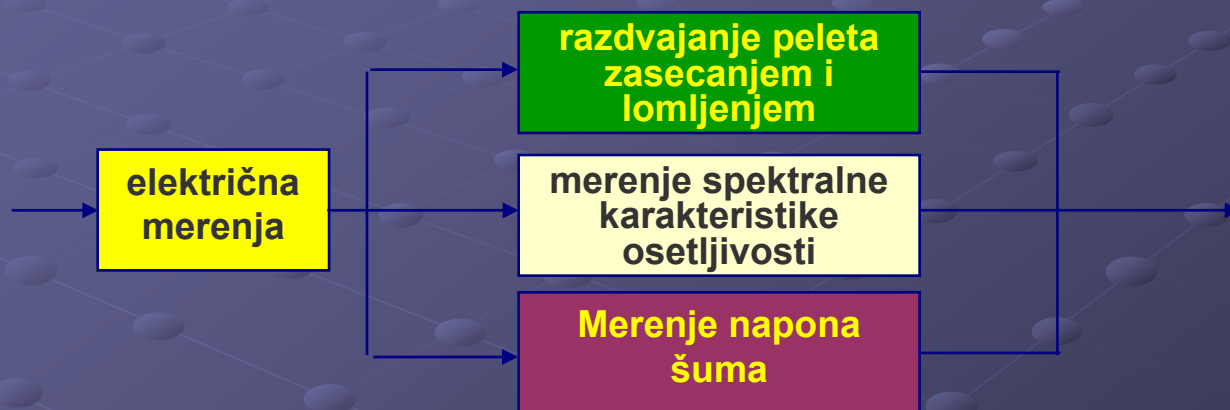
Технологија 3



Технологија 4



Технологија 5



Жељена детективност је освојена...



MEMS ТЕХНОЛОГИЈЕ

- Мемс 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, дуге 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.

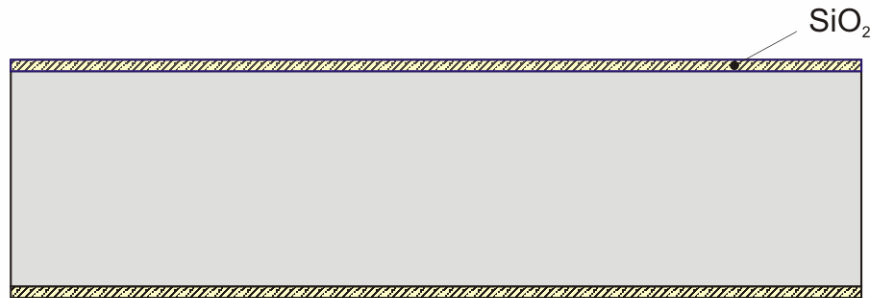
Први МЕМС силицијумски сензори притиска 1983

❑ Полазни материјал: Si, специфична отпорност $3\pm 5\Omega\text{cm}$, оријентација(100)



❑ Прва термичка оксидација

B)



❑ Фотопоступак за маркере за двострану фотолитографију

C)



❑ Скидање оксида са горње стране

D)



Први МЕМС силицијумски сензори притиска 1983

Друга термичка оксидација

E)



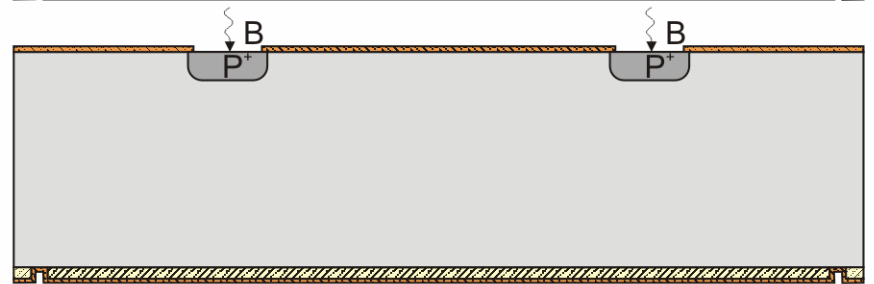
Двострани фотопоступак

F)



Дифузија бора за контактну област ("дубока" дифузија)

G)



Трећа термичка оксидација

H)



Први МЕМС силицијумски сензори притиска 1983

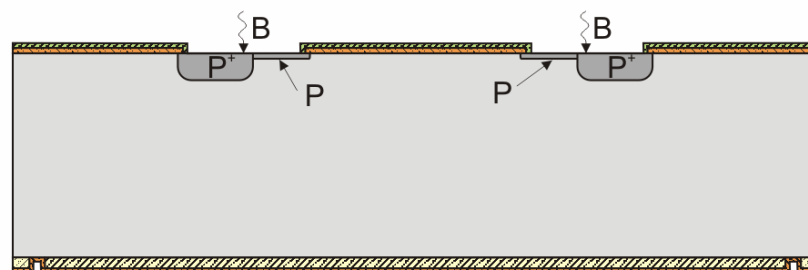
❑ Фотопоступак

I)



❑ Дифузија бора за пиезоотпорнике ("плитка дифузија")

J)



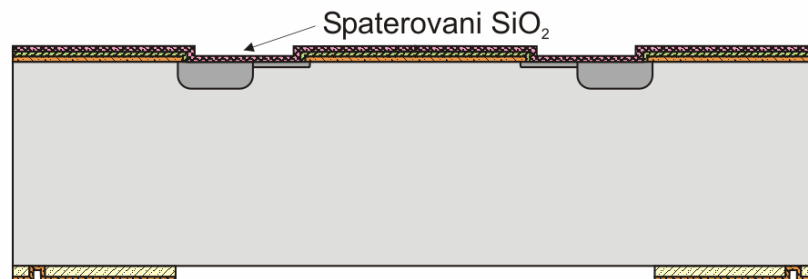
❑ Фотопоступак за мембране

K)



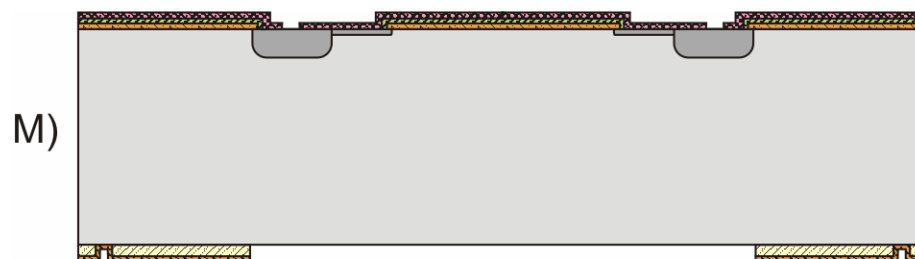
❑ Спатеровање заштитиног оксида

L)

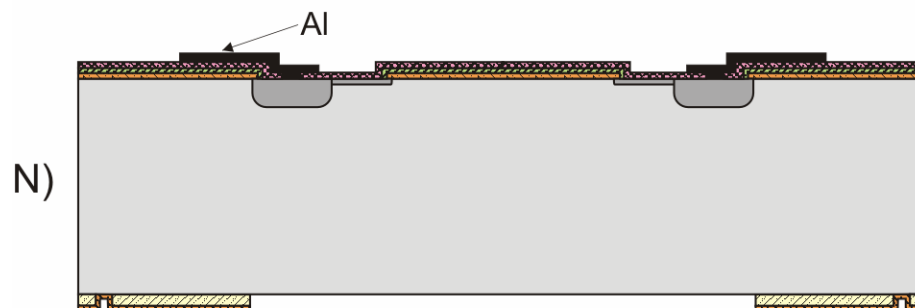


Први МЕМС силицијумски сензори притиска 1983

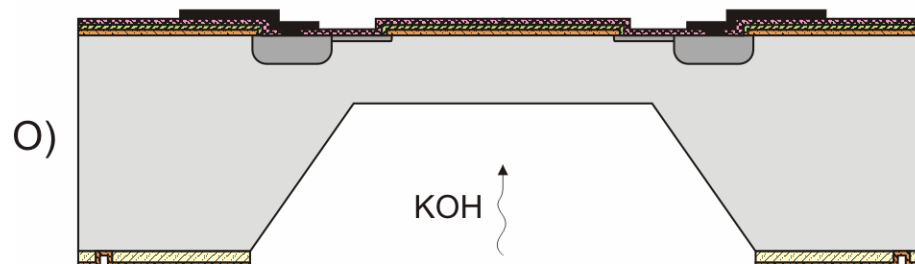
☐ Фотопоступак за контакте



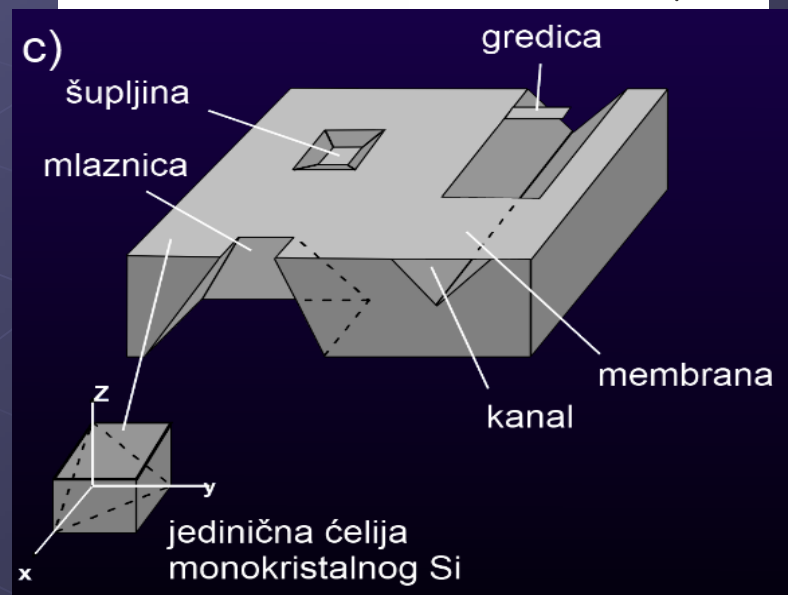
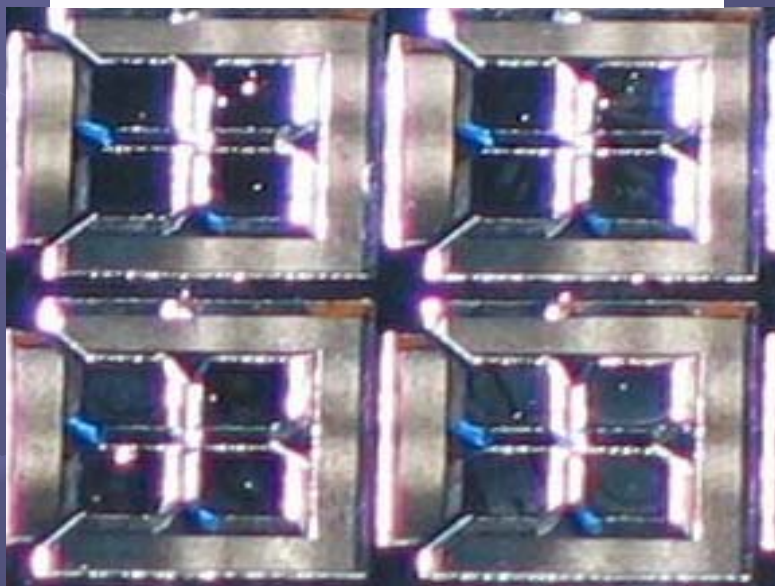
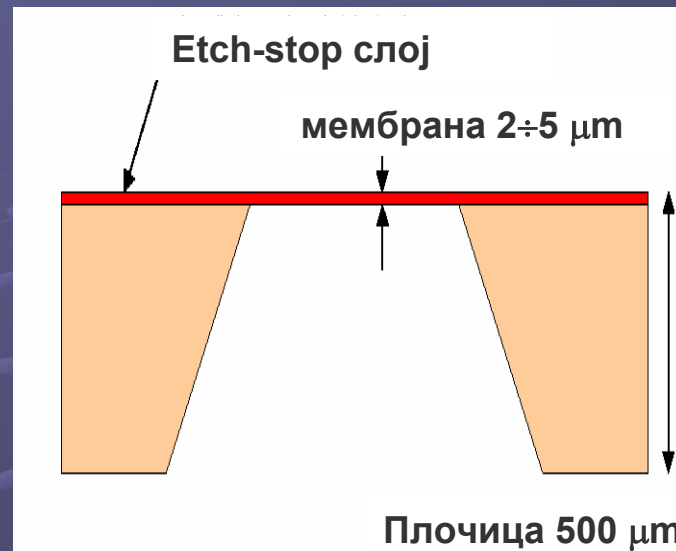
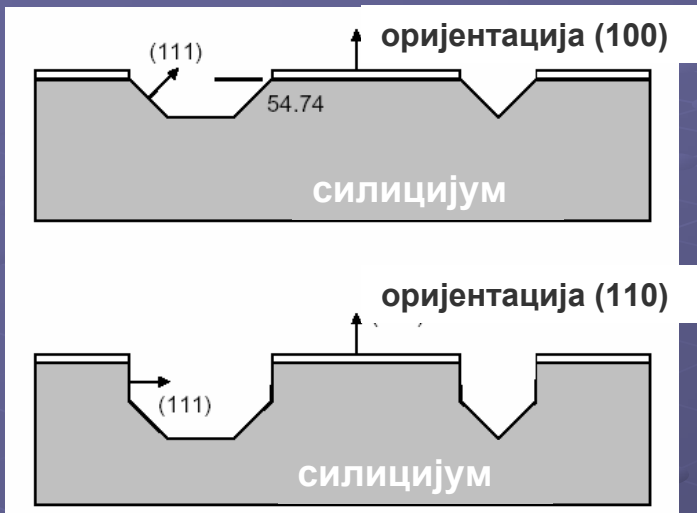
☐ Метализација (спатеровање Al)



☐ Нагризање силицијума за формирање дијафрагме



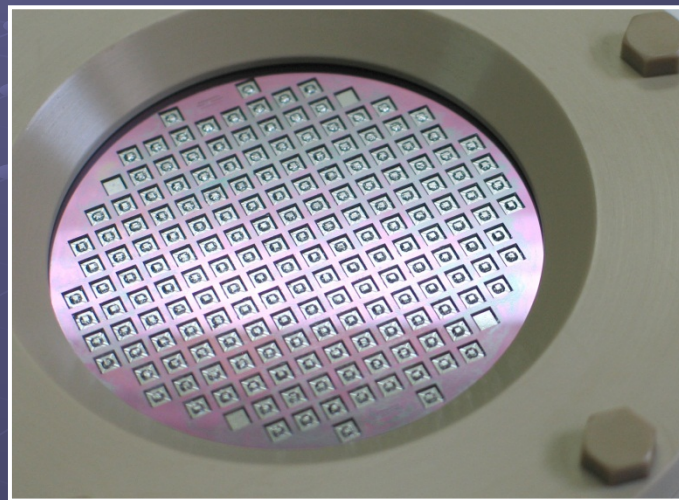
Пример запреминског микромашинства



Основни поступци у МЕМС-у



Анизотропно нагризање мембрана



Термичка оксидација

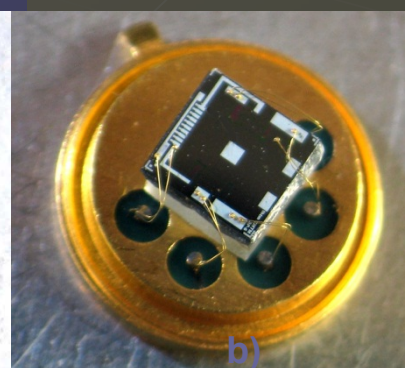
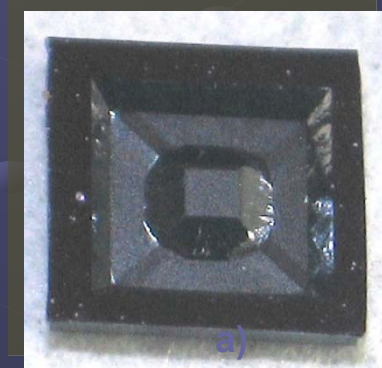


p^{++} дифузија

Термичка оксидација

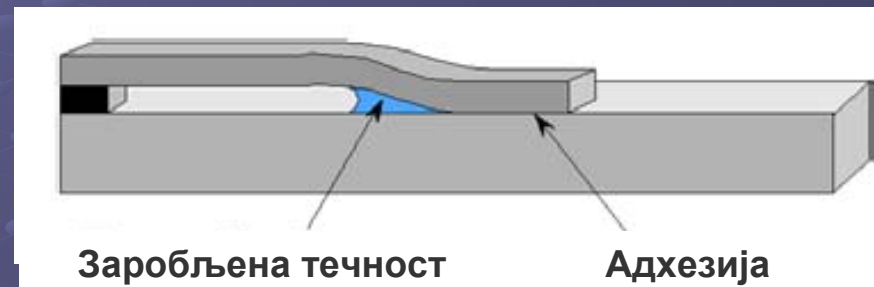
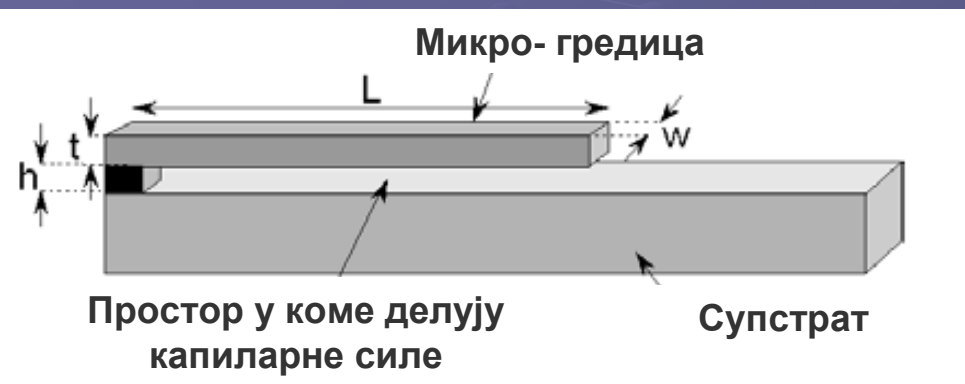


Спатованње SiO_2

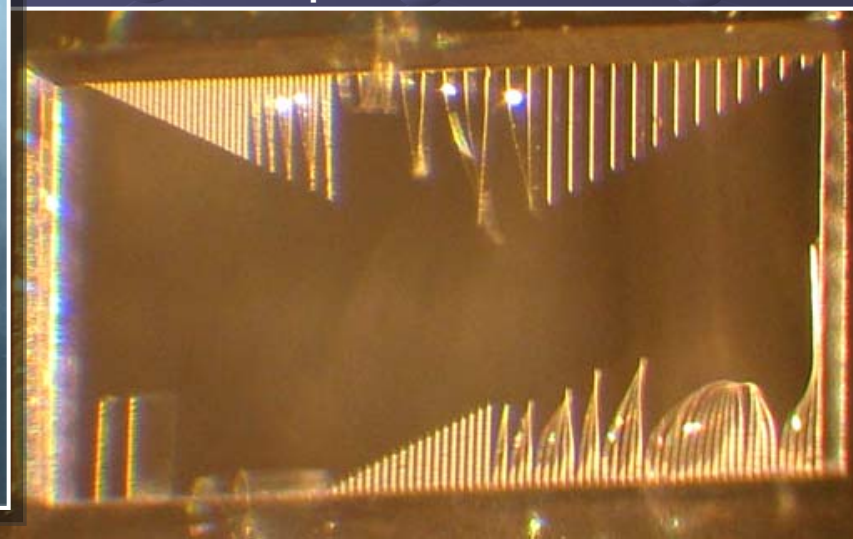


SP6 сензорски чип:
Доња страна (a),
Монтиран чип на кућишту(b)

Површински напони и МЕМС структуре



Тест структура за испитивање утицаја површинског напона

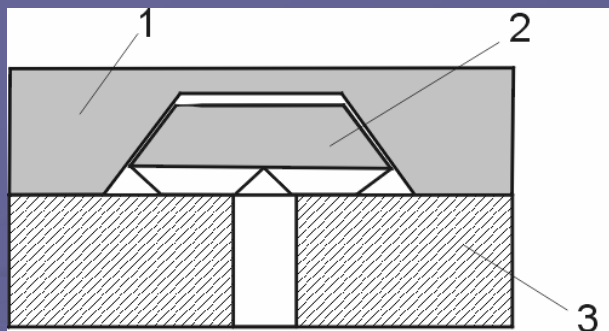


Неоподна знања и поступци за израду чипа сензора притиска

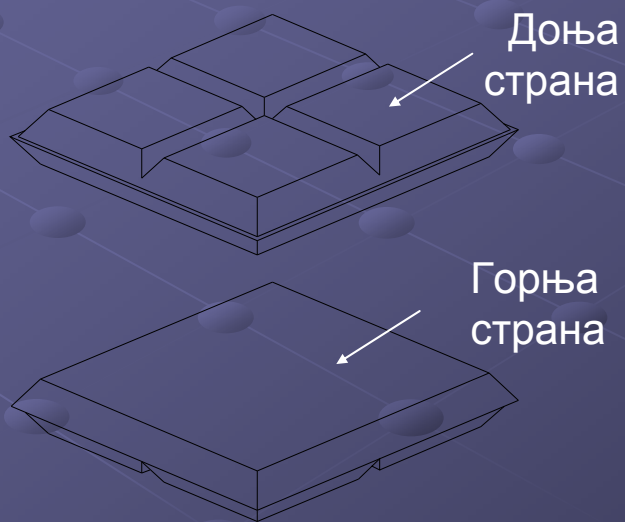
Параметар сензора	Неопходна знања
Осетљивост	Пиезоотпорни ефекат, зависност од кристалографске оријентације, концентрације дифузионих примеса и њихова расподела, напони у дијафрагми и њихова веза са притиском, механичка својства силицијума-теорија еластичности
Температурна зависност	Зависност отпорности 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 р-п споја, ефекти инверзије и обогаћења, C-V карактеристике, омски спојеви, утицај температуре на миграцију покретних јона

Неоподна знања и поступци за израду чипа сензора притиска

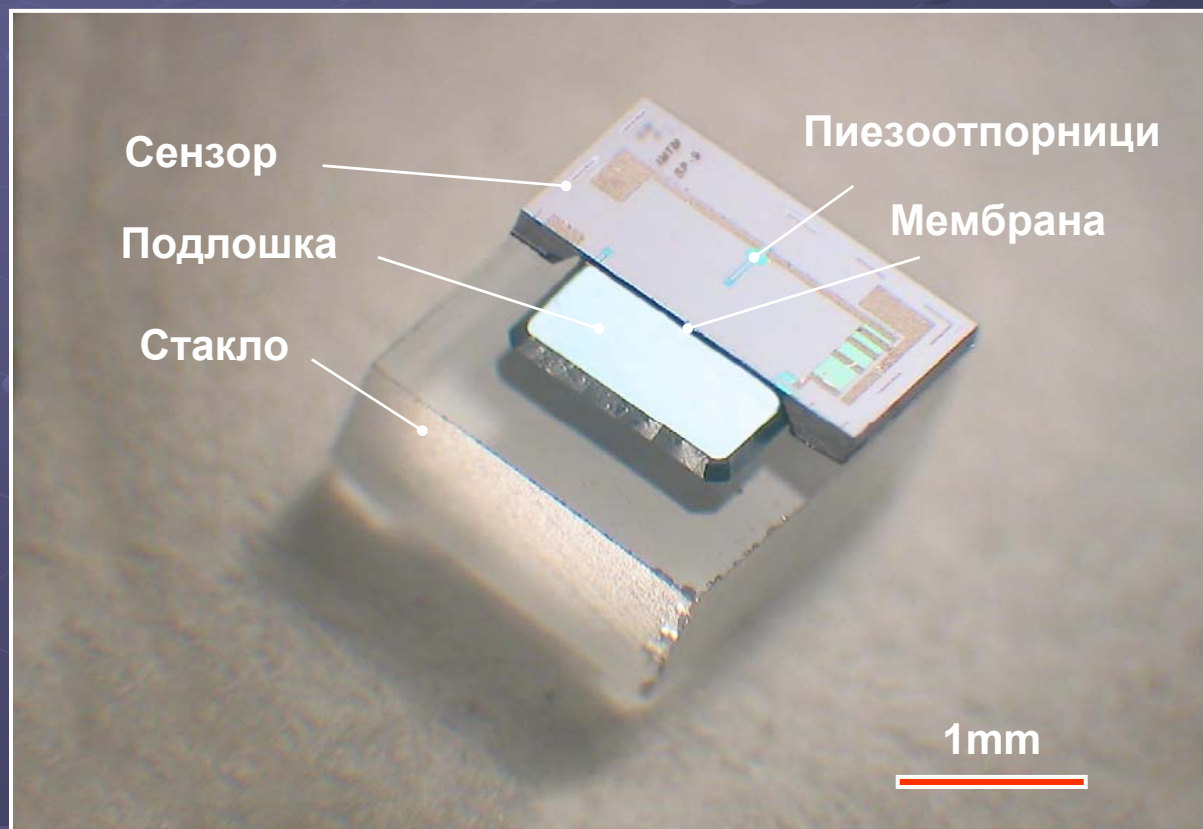
Поступак	Резултат
Класична планарна технологија	Пиезоотпорник одређене оријентације на дијафрагми
Селективно нагризање силицијума (микромашинство)	Израда дијафрагме прецизних димензија са унапред пројектованим положајима пиезоотпорника; двострана фотолитографија
Спајање сензорског чипа са носачем	Спајање 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



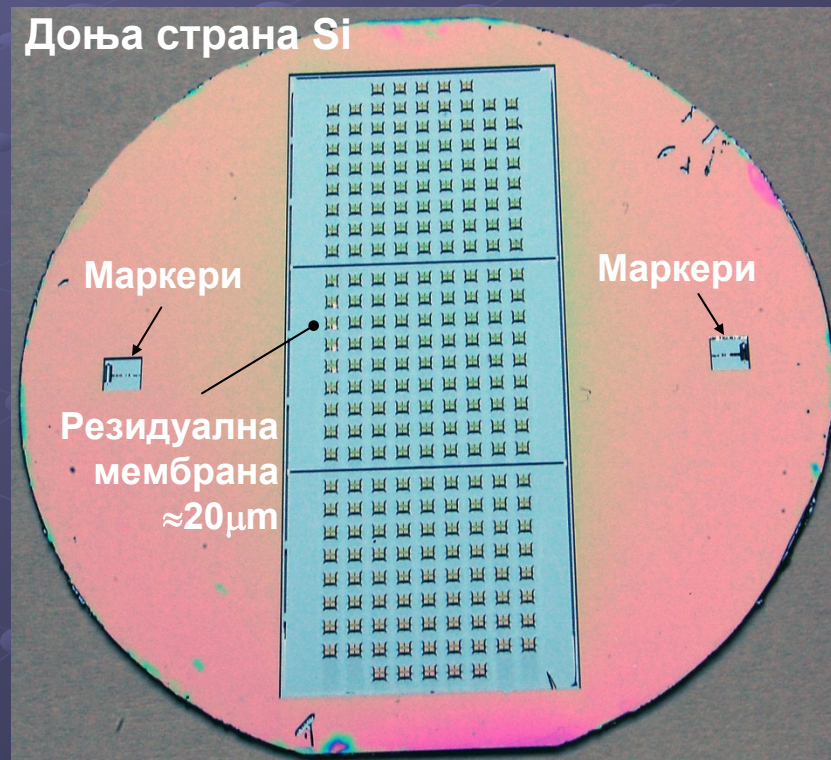
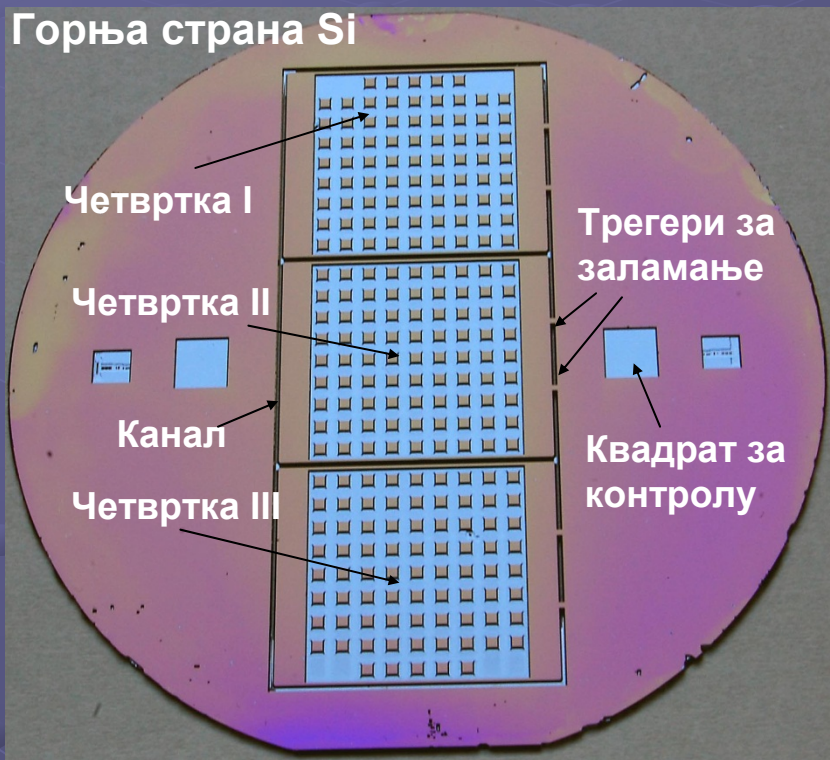
Принцип заштите сензора притиска од преоптерећења



Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења

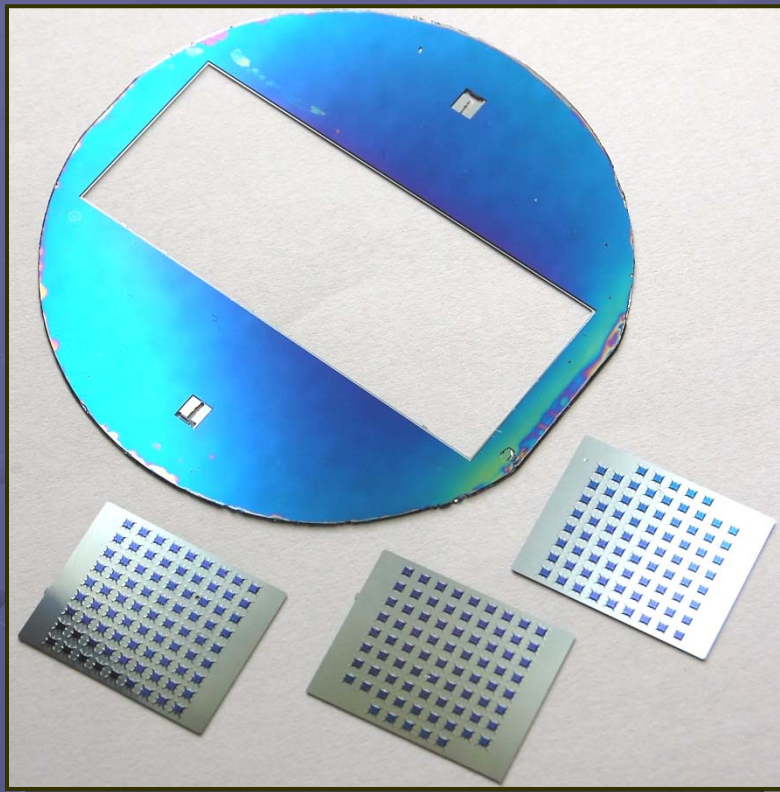
Коришћене технологије:

- Двострана фотолитографија
- Нагризање силицијума у 30% КОН

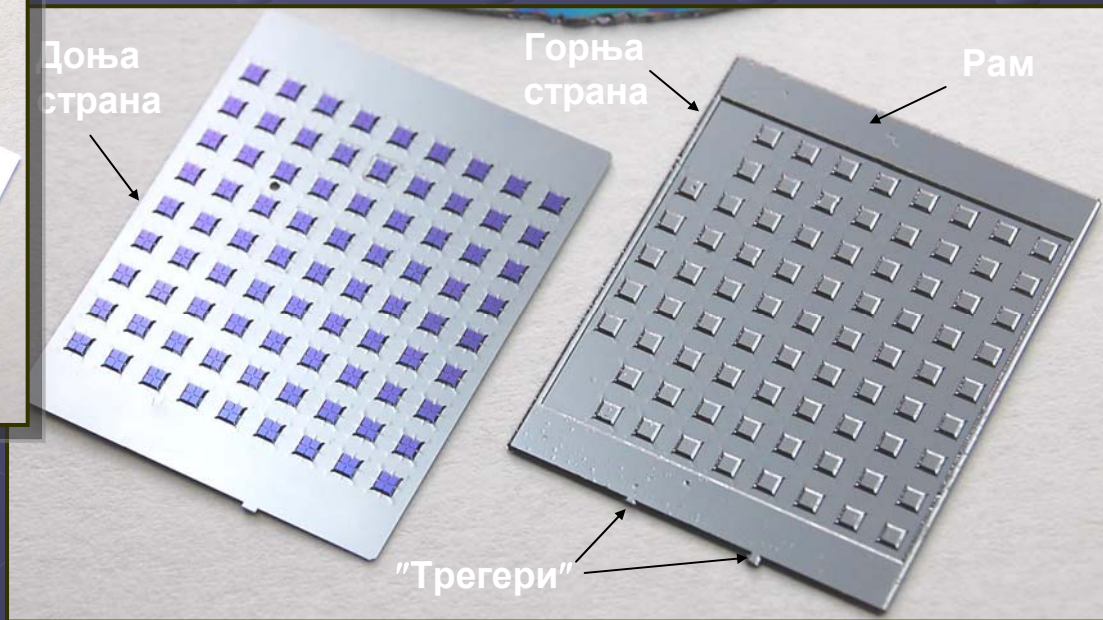


Процесиране плочице од $\varnothing 3''$ (76.2mm)

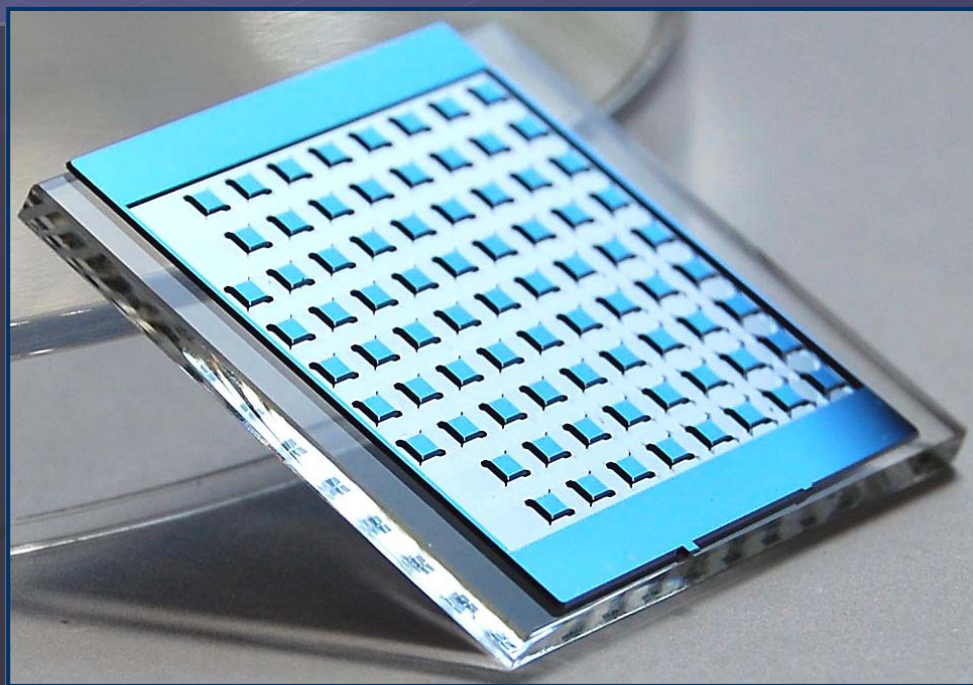
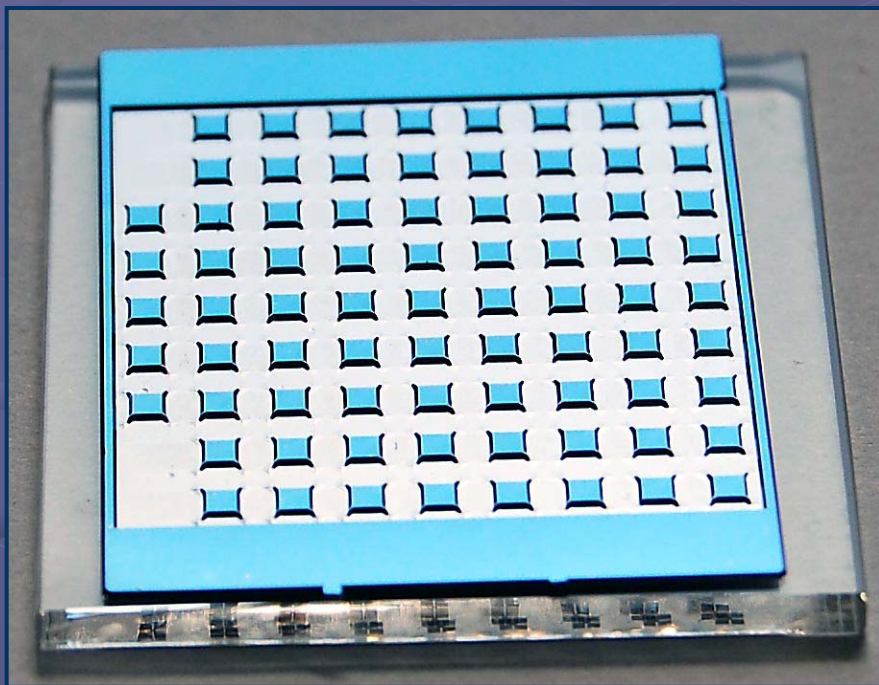
Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења



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

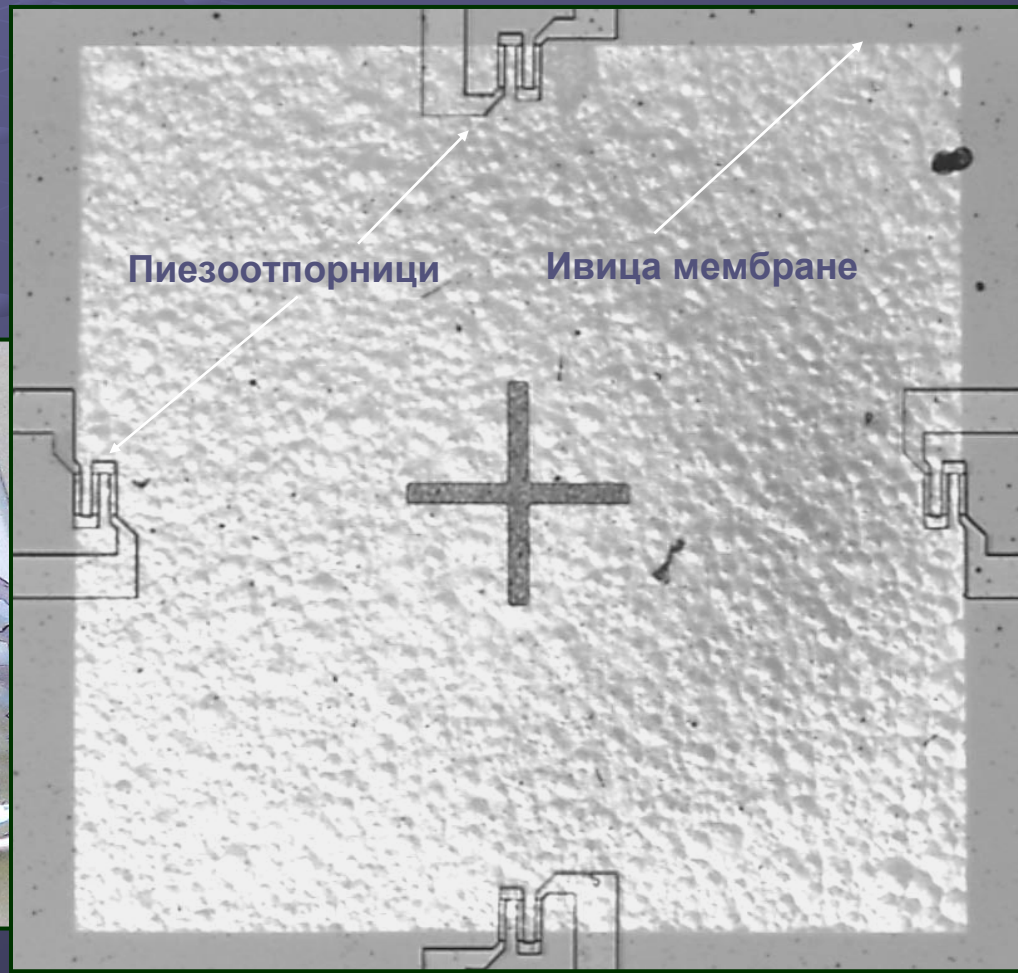
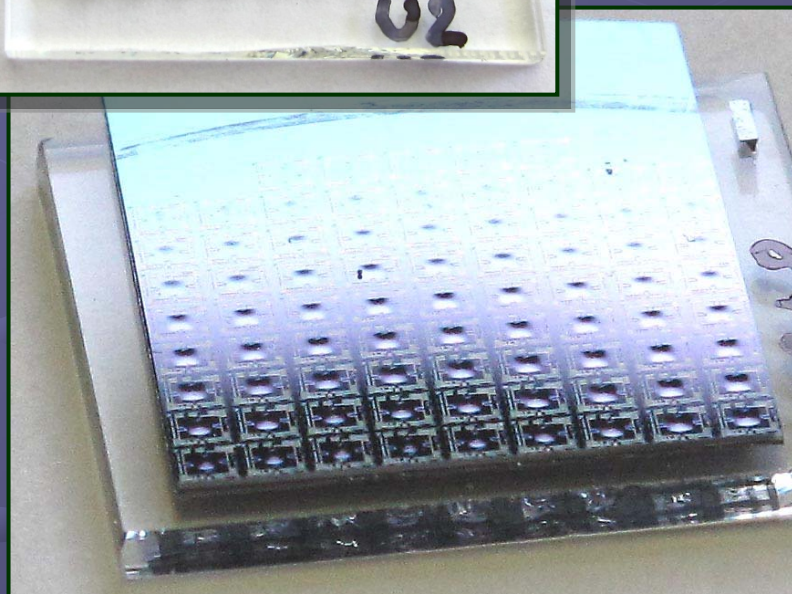
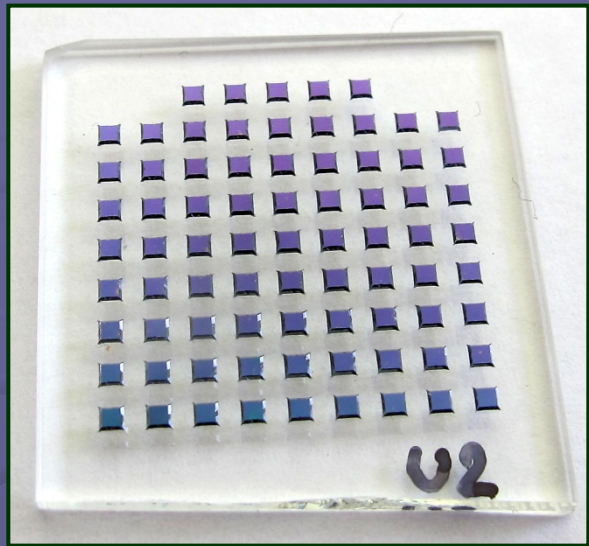


Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења

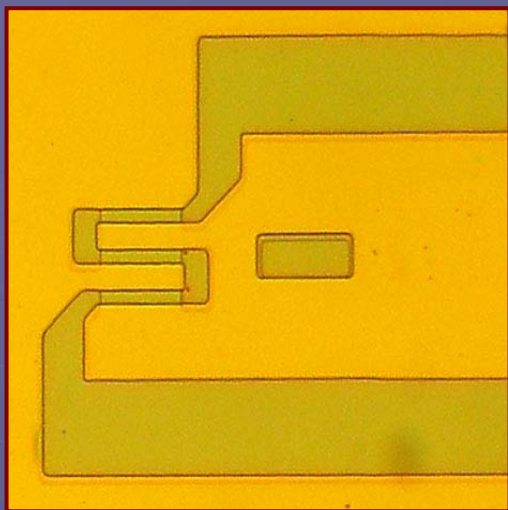


Четвртка са подлошкама спојена са PYREX стаклом технологијом анодног бондовања

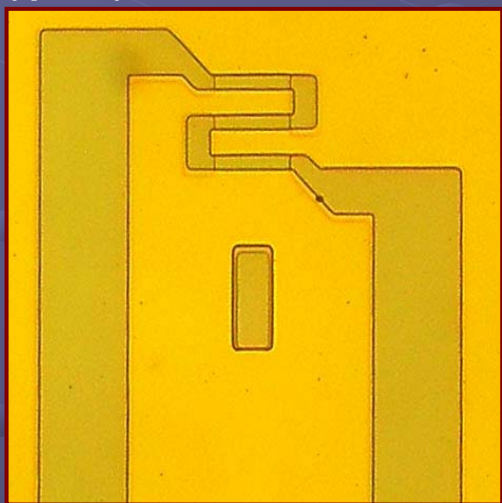
Израда подлошке за блокаду сензора SP-12 од преоптерећења



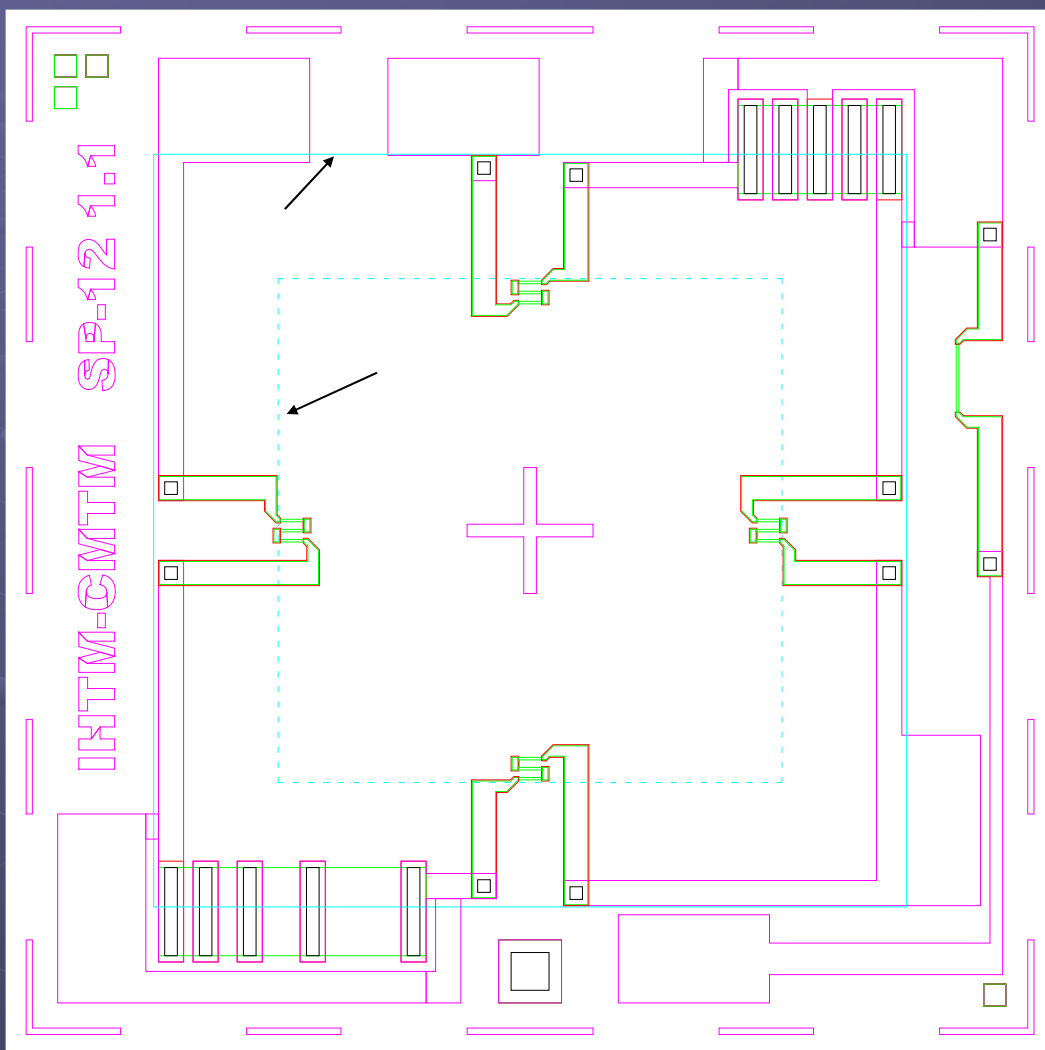
Нова генерација сензора притиска SP-12 (2007)



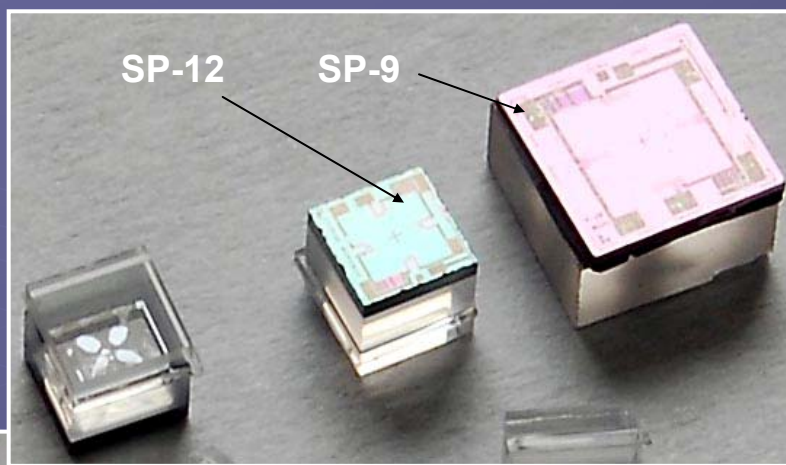
Радијални пиезоотпорник
(фото)



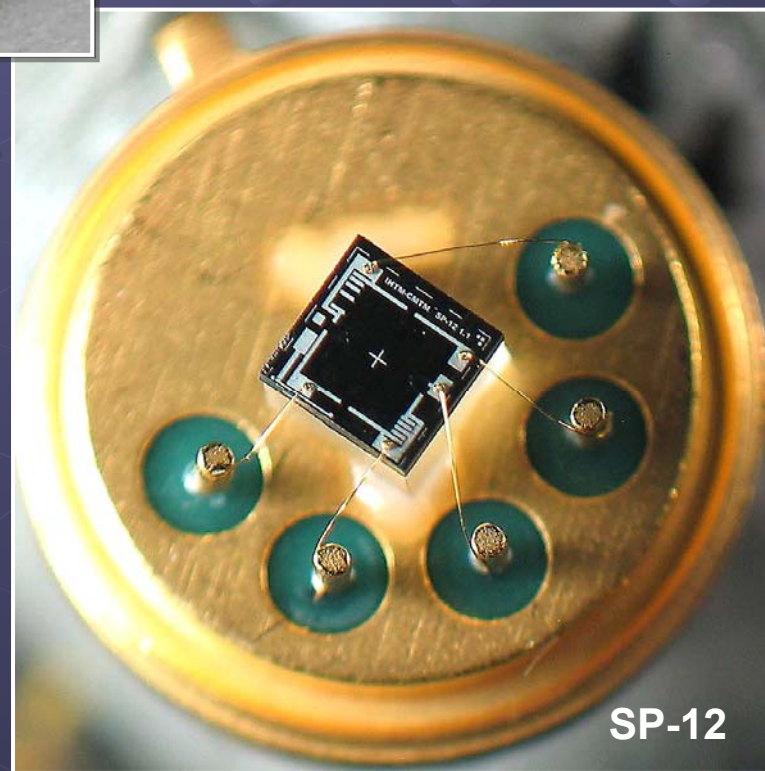
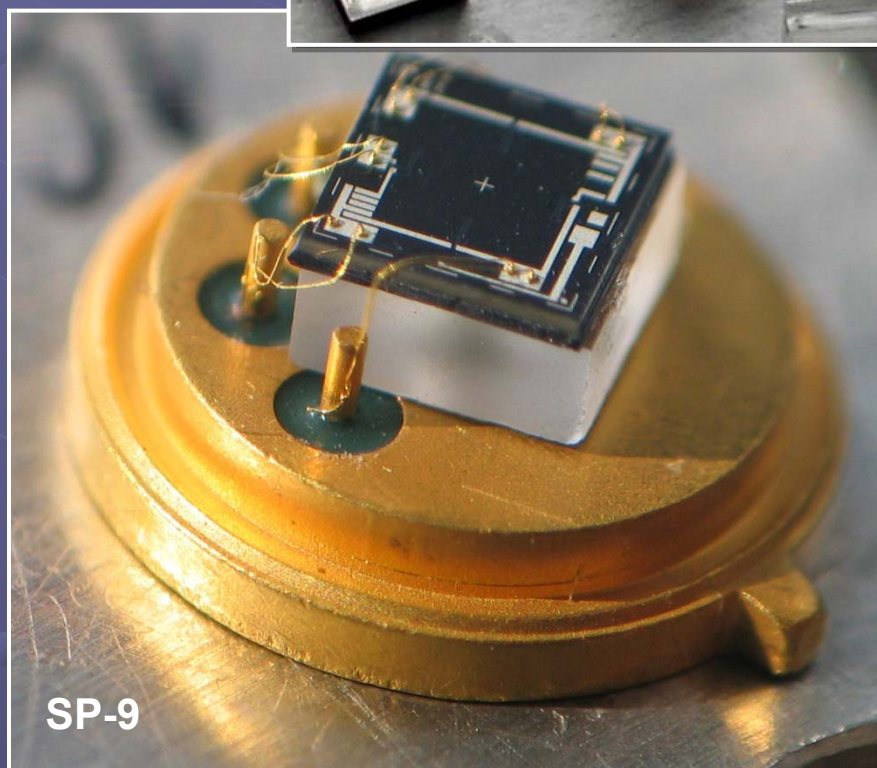
Тангенцијални пиезоотпорник
(фото)



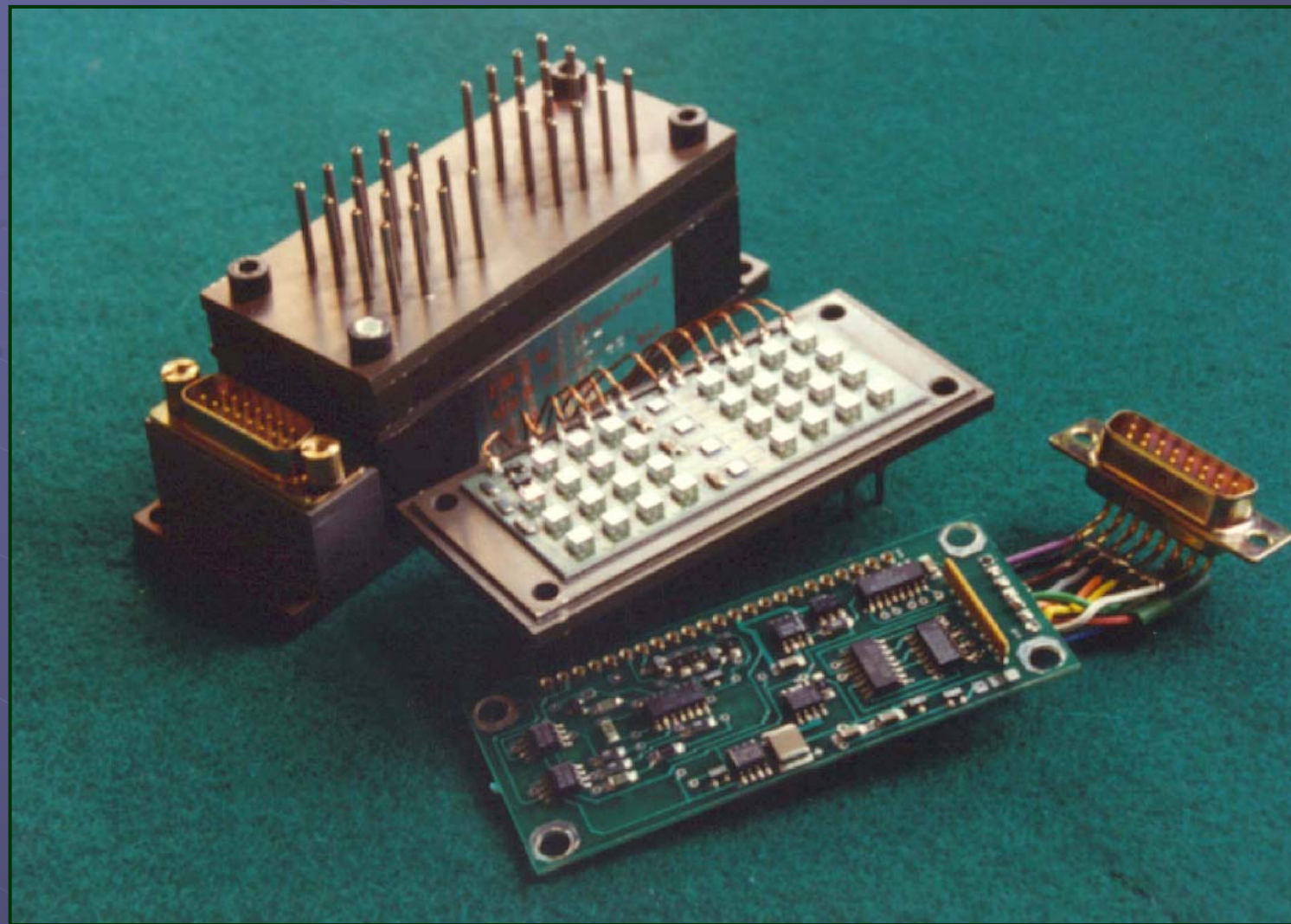
Цртеж фотолитографских маски



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



Матрични сензор притиска за аеро - космичку индустрију (1986)



Комплетна гама трансмитера притиска и нивоа

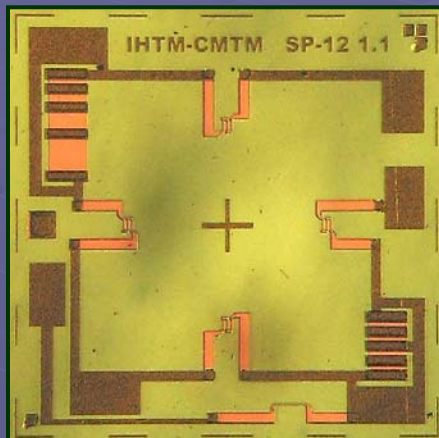


Три генерације трансмитера притиска

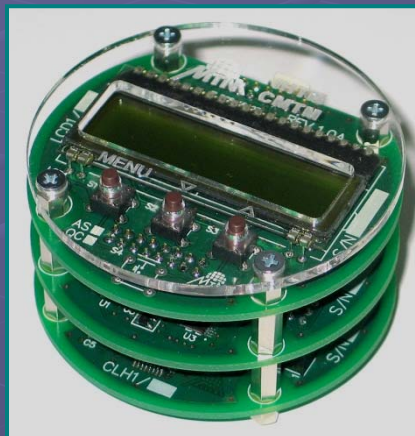


Склопови „интелигентног” трансмитера притиска

Пиезоотпорни
сензор притиска



Електронски
склоп



Сензорска “пилула”

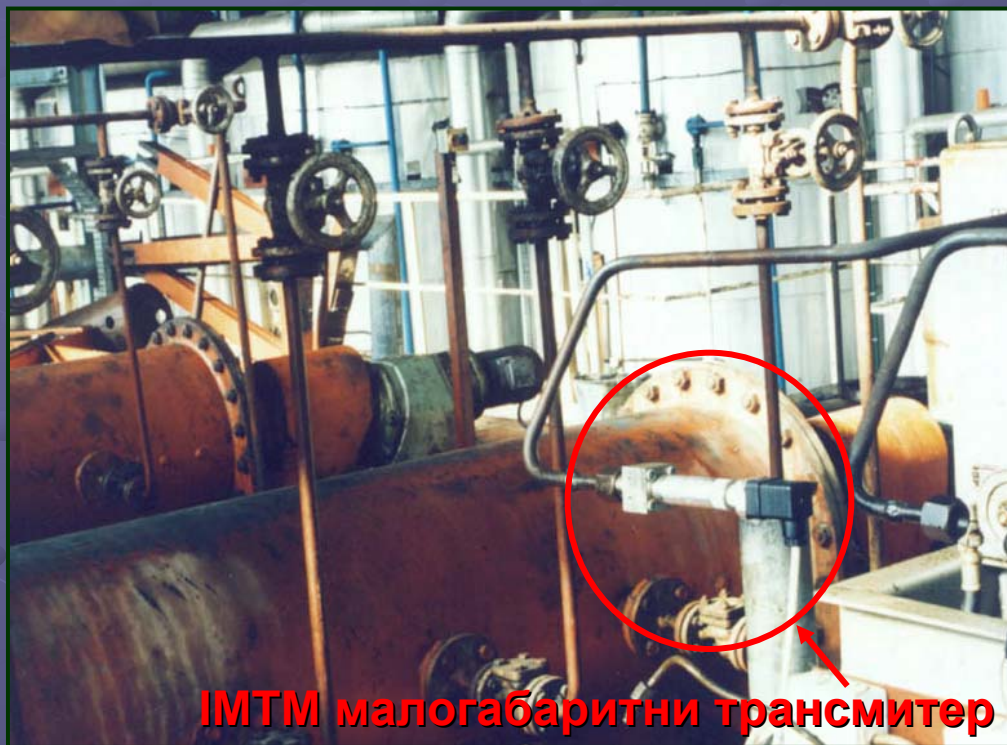


Трансдјусер

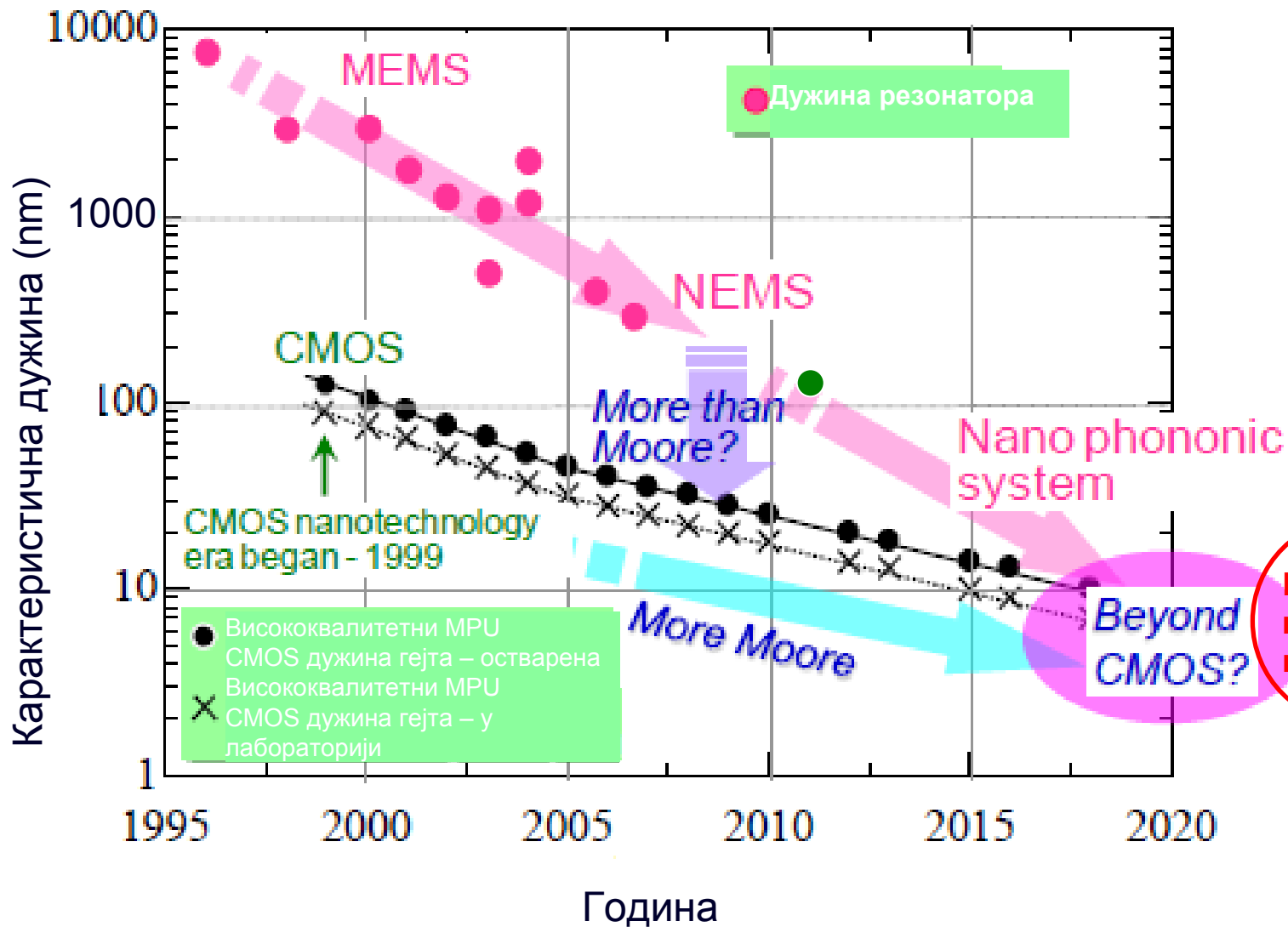
Пројекат трансмитера са интелигентном електроником (баждарење)



Трансмитери притиска и нивоа у производним погонима



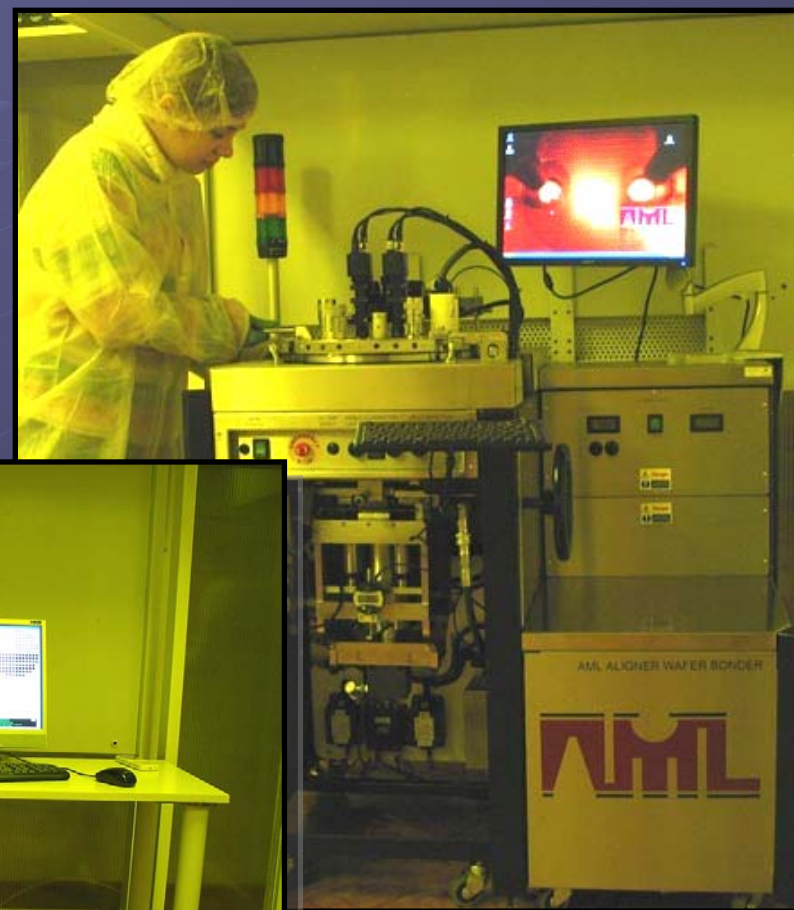
Графички приказ тренда смањивања димензија MEMS/НЕМС-а



ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ ПОЛУПРОВОДНИКА И ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ТЕХНОЛОГИЈА У БЕОГРАДУ



Нова опрема у чистој соби (2007)



Фотолитографија

- Од почетка развоја полупроводничких технологија, фотолитографија је била ограничавајући фактор за смањивање димензија полупроводничких компонената.
- Средња стопа смањења димензија $0.7\times$ на сваке 3 године.
- У последњих 40 година (18 генерација) остварено је смањење димензија $1/500$, а површине $1/250\ 000$.

Тренд смањења димензија

ПРОШЛОСТ

(1970)

$10\mu\text{m} \rightarrow 8\mu\text{m} \rightarrow 6\mu\text{m} \rightarrow 4\mu\text{m} \rightarrow 3\mu\text{m} \rightarrow 2\mu\text{m} \rightarrow 1.2\mu\text{m} \rightarrow 0.8\mu\text{m} \rightarrow 0.5\mu\text{m} \rightarrow 0.35\mu\text{m} \rightarrow 0.25\mu\text{m} \rightarrow 180\text{nm} \rightarrow 130\text{nm} \rightarrow 90\text{nm} \rightarrow 65\text{nm} \rightarrow 45\text{nm} \rightarrow 32\text{nm}$

(2012)

САДАШЊОСТ

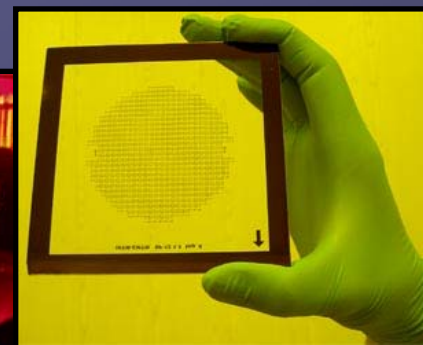
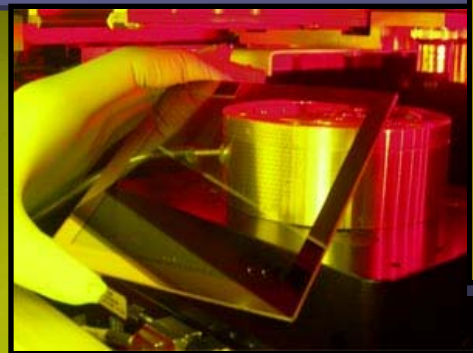
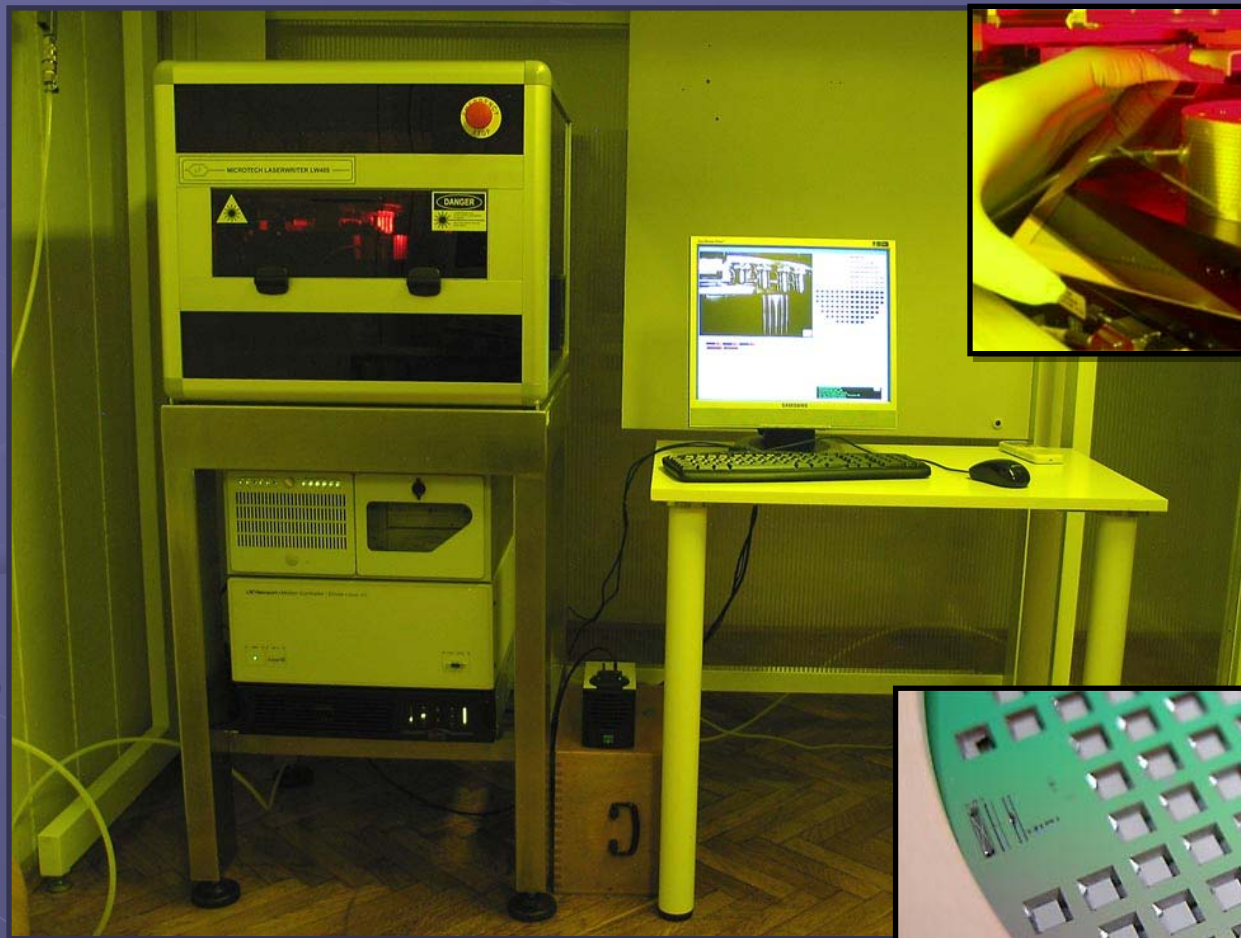
$\rightarrow 22\text{nm}$

БУДУЋНОСТ

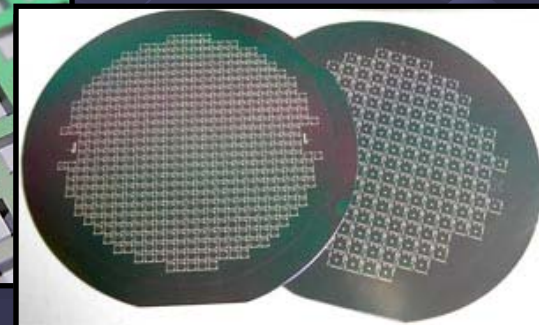
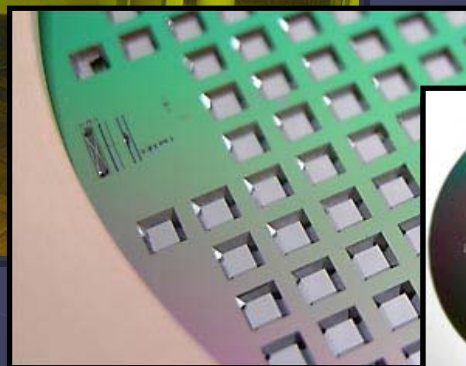
$\rightarrow 16\text{nm} \rightarrow 11.5\text{nm} \rightarrow 8\text{nm} \rightarrow 5.5\text{nm}? \rightarrow 4\text{nm}? \rightarrow 2.9\text{nm}?$

Још најмање 4.5 генерације да би се достигао очекивани лимит од $8\sim 5\text{nm}$

Уређај за израду фотолитографских маски (2007)



- ✓ Резолуција до $1\mu\text{m}$
- ✓ Директна експозиција супстрата (без маске)
- ✓ Димензија маске $4\times 4''$
- ✓ Инспекција маске



MICROTECH LaserWriter LW405

Уређај за двострану фотолитографију (2007)



EVG620 Double Side Mask Aligner

Veličina supstrata:

Do $\varnothing 150\text{mm}$, do $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ kao i pojedinačni čipovi $8\text{mm} \times 8\text{mm}$

Debljina supstrata:

0.1-10mm

Veličina maske:

Max. 7", debljina $< 6.35\text{mm}$

Podešavanje likova:

Opseg podešavanja:

X,Y,Z: $\pm 5\text{mm}$

Rotacija: $\Theta \pm 3^\circ$

Sva podešavanja su automatizovana sa upravljanjem preko džojstika ili preko preciznih mikrometara sa preciznošću podešavanja od $0.06\mu\text{m}$.

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 лабораторијама и на опреми ЦМТМ-а (дуже од 15 година).
- Урађен је велики број дипломских и магистарских (мастер) теза и десетак докторских дисертација.

Уместо закључка

"Рад на интегралним колима захтева стручњаке новог профила, који морају имати извесна знања из физике, електронике и хемије, а у исто време бити специјалисте у својој области.

**ЈЕДАН ОД ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМА ПРИЛИКОМ РАЗВОЈА
ИНТЕГРАЛНИХ КОЛА ЈЕ ОБУКА КАДРОВА. "**

Интегрална кола, Елаборат

Београд, април 1968