

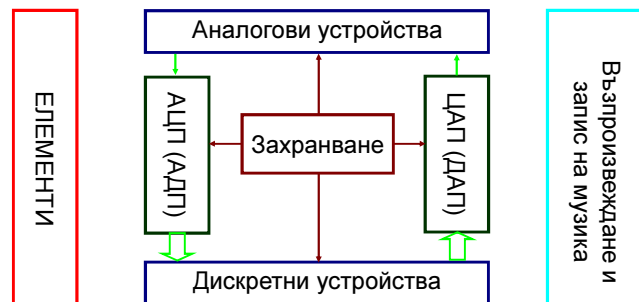
Използвани източници

- Лекции на д-р Фогелман, Университет – Карлсруе
- Лекции на д-р Клос, Университет – Карлсруе
- Лекции на д-р Крокол, Университет – Карлсруе
- <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html#unt>
- <http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/index3.htm>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites>
- <http://www.prof-gossner.de/>

Използвани означения

- Тема, която се среща за първи път
- **Тема, която вече е позната**

Структура на лекциите



Полупроводникова електроника

- **Развитие на ПП електроника**
- Физика на полупроводниците
- Производство на ПП (Si)

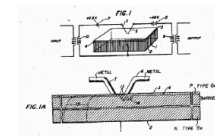
Развитие на ПП електроника

- 1871 ⇒ Ferdinand Braun открива кристалния детектор
- 1938 ⇒ Schottky развива теорията на pn-прехода
- 1947 ⇒ Bardeen, Brattain и Shockley откриват биполярния транзистор
- 1954 ⇒ Поява на първия Si-транзистор (Texas Instruments)
- 1958 ⇒ Поява на първия тиристор (General Electric)
- 1958 ⇒ Jack Kilby и Gordon Moore откриват интегралната схема
- 1971 ⇒ Поява на първия микропроцесор (Intel 4004, TI TMS1802NC)
- 2002 ⇒ Max. интеграция при памети и процесори
 ⇒ Max. постижения при силови ПП-елементи
 (IGBT до 6500 V, 2400 A, тиристор 8000 V, 3500 A)

Развитие на ПП електроника



Bardeen, Brattain,
Shockley



Скица на патента

Първият транзистор
(1947)

1948: Патент за транзисторен ефект и транзисторен усилвател
 John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Shockley
 (Bell Telephone Laboratories, New York)

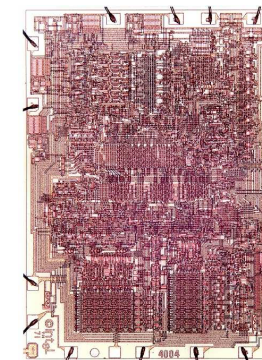
Развитие на ПП електроника



Развитие на ПП електроника

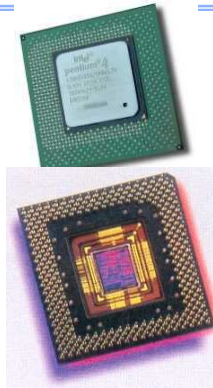


Първата интегрална
схема (1958)



Първият микропроцесор
Intel 4004 (1971)

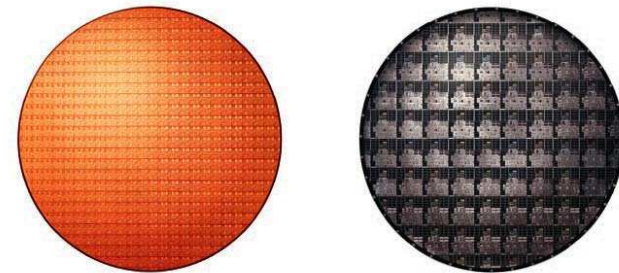
Развитие на ПП електроника



Microprocessor	Year of introduction	Transistors
4004	1971	2,300
8008	1972	2,500
8080	1974	4,500
8086	1978	29,000
Intel286	1982	134,000
Intel386™ processor	1985	275,000
Intel486™ processor	1989	1,200,000
Intel® Pentium® processor	1993	3,100,000
Intel® Pentium® II processor	1997	7,500,000
Intel® Pentium® III processor	1999	9,500,000
Intel® Pentium® 4 processor	2000	42,000,000
Intel® Itanium® processor	2001	25,000,000
Intel® Itanium® 2 processor	2003	220,000,000
Intel® Itanium® 2 processor (9MB cache)	2004	592,000,000

Copyright © 2005 Intel Corporation.

Развитие на ПП електроника



Intel® Pentium® 4 Processor

Intel® Itanium® Processor

Полупроводникова електроника

- Развитие на ПП електроника
- Физика на полупроводниците
- Производство на ПП (Si)

Физика на полупроводниците

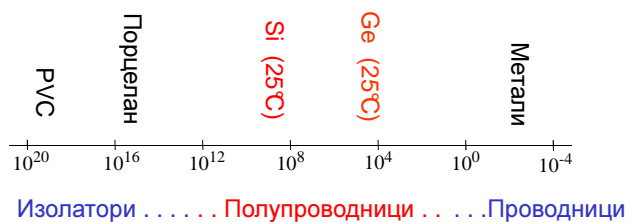
Цел разглеждането :

- да може да отговаряте на тези или подобни въпроси:

- Какво е полупроводник (ПП);
- Каква е структурата на един ПП;
- Каква е връзката между метали, неметали и ПП;
- Какъв е механизмът за протичане на ток в металите и полупроводниците;

Място на полупроводниците

Специфично съпротивление на различни материали в $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$



Електрически ток

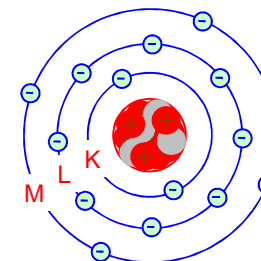
- Какво представлява електрическият ток?
 - Насочено движение на токоносители
- Какви видове токоносители има?
 - Електрони (в твърди тела, вкл. полупроводници) (-)
 - Йони (в електролити) (+) или (-)
 - ❖ Дупки (в полупроводници) (+)
- Как са изградени атомите?

Строеж на атомите

- Атомите са изградени от:
 - протони (заредени положително);
 - електрони (заредени отрицателно);
 - неутрони (електрически неутрални).
- Атомът е електрически неутрален, тъй като:
 - броят на протоните и електроните е еднакъв;
 - имат еднакъв заряд.

Строеж на атомите (Si)

- 14 протона + 14 неутрона образуват ядрото
- 14 електрона обикалят ядрото
- Само по разрешени орбити
 - наречени електронни обвивки
- Отвътре навън K, L, M,...



Електронни обвивки

- Максималния брой електрони на една обвивка е

$$N_{\max} = 2 \times n^2$$

(но най-много 8 на най-външната обвивка)

Обвивка	K	L	M	N	O	P	Q	
n	1	2	3	4	5	6	7	
N _{max}	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)	Вътрешни обвивки
N _{max}	2	8	8	8	8	8	8	Най-външна обв. (на инертните газове)

Свързване на атоми

- Атомите се свързват помежду си за да постигнат максимален брой електрони на най-външната си обвивка (8), както е при устойчивата обвивка на инертните (благородните) газове
- Това може да се постигне по няколко начина:
 - Приемане на чужди валентни електрони в обвивката – ако липсват само няколко (до 8)
 - Отдаване на валентните електрони от обвивката – ако са само няколко
 - Общо използване на електроните от два атома

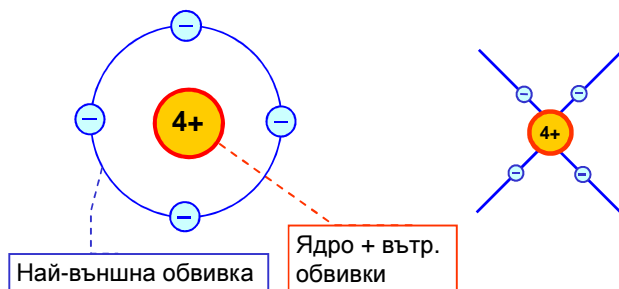
Свързване на атоми при металите

- Валентните електрони се отделят от техните атоми
 - Движат се свободно между атомите на кристалната решетка (т.н. “електронен газ”)
- При добрите проводници на електрически ток броят на електроните достига $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$

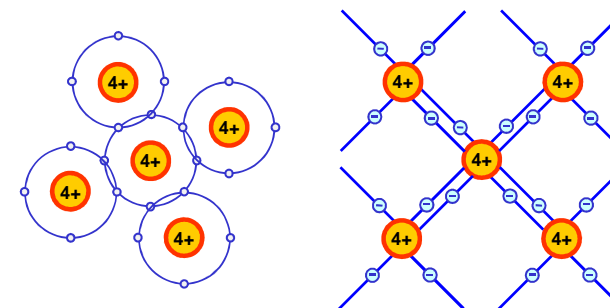
Свързване на атоми при ПП

- Свързването на два атома става чрез ковалентна връзка на два електрона
 - Според теорията на ковалентните връзки
- Електронната двойка се състои от по един електрон от двата атома
 - Двата електрона са свързани към атомите

Опростено представяне на ПП атом



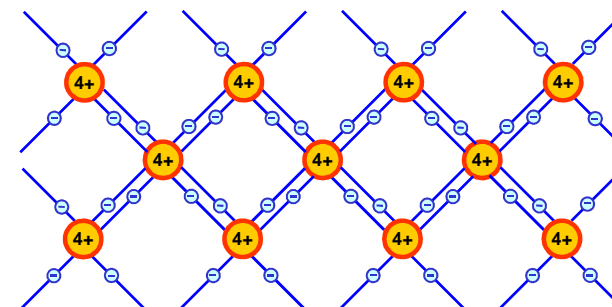
Ковалентни връзки



Собствена проводимост

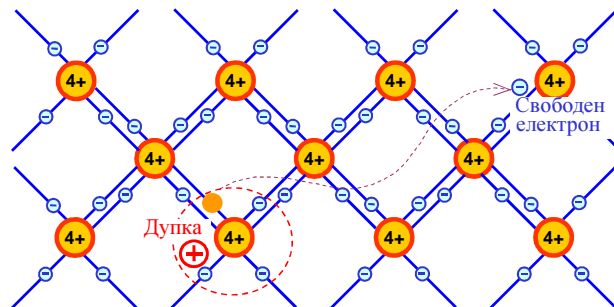
- Под собствена проводимост се разбира възможността за протичане на ток в чист полупроводник.
- Собствената проводимост зависи силно от температурата:
 - при $T = 0\text{ K}$ \Rightarrow Всички валентни електрони са свързани чрез ковалентни връзки; \Rightarrow Няма свободни електрони
 - при $T > 0\text{ K}$ \Rightarrow Вкарва се допълнителна енергия към атомите и техните валентни електрони;
 - \Rightarrow Електроните с най-голяма енергия разкъсват ковалентните връзки

Собствена проводимост



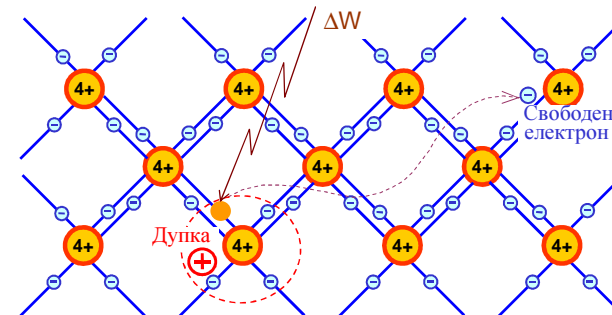
Полупроводниците се държат като изолатори при $T = 0\text{ K}$

Генериране на електрон и дупка



Концентрацията n на свободните електрони е равна на концентрацията p на дупките ($n = p$)

Генериране на електрон и дупка



За йонизиране на Si необходимата енергия е $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$

Рекомбиниране

- Рекомбинирането е обратния процес на генерирането
- Свободен електрон заема свободното място в дупката
- Концентрацията (броят) на дупки и електрони е температурно зависим
- $n = p = n_i = f(T)$,
- n_i е собствената концентрация в чист ПП
- За Si $n_i = 1,5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ при $T = 300 \text{ K}$
- Собствената концентрация се удвоява при повишаване на температурата с $\Delta T = 10 \text{ K}$

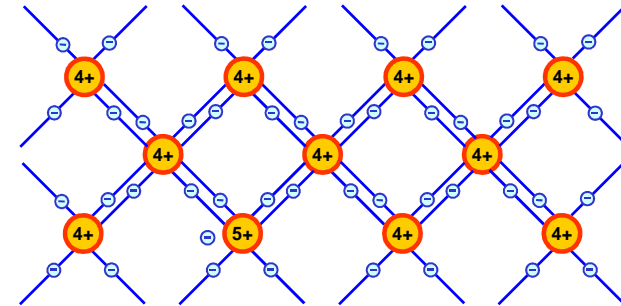
Дотиране

- Проводимостта на ПП може значително да се повиши чрез добавяне (дотиране) на чужди (примесни) атоми в кристала
- За дотиране се използват атоми от 3-а или 5-а валентност, т.е. всеки атом дава по един токоносител (електрон или дупка)
- 5-а валентност (донатори): P, As, Sb
- 3-а валентност (акцептори): B, Al, In
- Дотират се сравнително малки количества чужди атоми
- (чужди атоми : ПП атоми = $1:1000$ до $1:10^{10}$)

Методи за дотиране

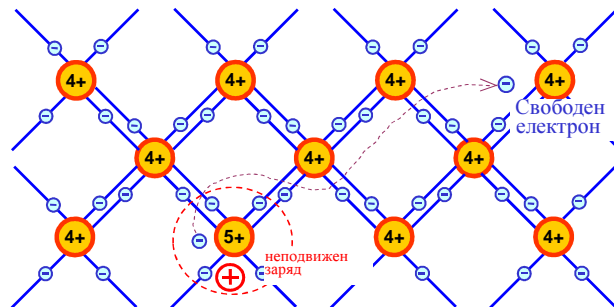
- Легиране
- Дифузия
- Епитаксия (израстване на кристала в газова среда)
- Йонна имплантация

Дотиране с атоми от 5-а валентност



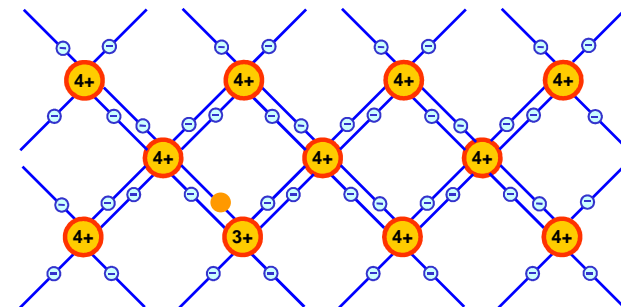
В първия момент, или при ниска температура

Йонизиране при вкарване на енергия



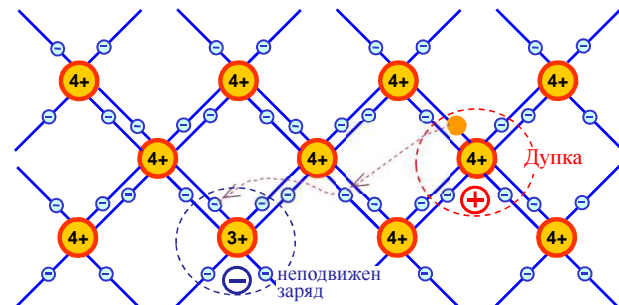
N-тип ПП (токоносителите са свободните електрони)

Дотиране с атоми от 3-а валентност



В първия момент, или при ниска температура

Йонизиране при вкарване на енергия



Р-тип ПП (токоносителите са дупките, те се преместват, когато валентен електрон заеме празното място)

Примесна проводимост

- Концентрацията на свободните токоносители се определя от концентрацията на примесите (n_A, n_D) и собствената проводимост (n_i)
- Ако примесната концентрация се избере много по-голяма от собствената, то свойства на ПП се определят от примесите
- Концентрацията на електрони и дупки в дотирания ПП не е еднаква

Примесна проводимост

- Токоносителите, които преобладават се наричат "основни токоносители"
- Токоносителите, които са по-малко се наричат "неосновни токоносители"
- Концентрация на основните токоносители влияе върху концентрацията на неосновните токоносители
- При по-голяма концентрация на основните токоносители се увеличава вероятността за рекомбинация, при което ще намаляват неосновните токоносители

Примесна проводимост

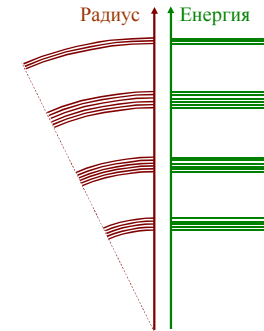
- В N-тип ПП концентрацията на свободните електрони (n_n) е по-голяма от концентрацията на дупките (p_n)
 - $n_n = n_D + n_i \approx n_D = a \cdot n_i$; $p_n = n_i/a$, т.е. $n_n \cdot p_n = n_i^2$
- В Р-тип ПП концентрацията на дупките (p_p) е по-голяма от концентрацията на свободните електрони (n_p)
 - $p_p = n_A + n_i \approx n_A = a \cdot n_i$; $n_p = n_i/a$, т.е. $n_p \cdot p_p = n_i^2$

Електрическа проводимост

- Специфичната електрическа проводимост σ се определя от плътността на тока и интензитета на електрическото поле $\sigma = J/E$. Като се вземе пред вид:
 - Елементарен заряд – e ; Заряд – Q ; Брой електрони – N ;
 - Плътност на тока $J = I/A$; Сила на тока $I = dQ/dt = e \cdot dN/dt$;
 - Концентрация $n = dN/dV$; Обем $dV = A \cdot dx$;
 - Скорост $v = dx/dt$; Подвижност на токоносителите $\mu = v/E$;
- се получава: $\sigma = e \cdot n \cdot \mu$
- За ПП с електрони и дупки: $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$

Зонна теория (енергиен модел)

- Радиусите на орбитите на електроните служат като мярка за тяхната енергия
- Всяка от орбитите на отделния атом представлява линия от енергийната диаграма



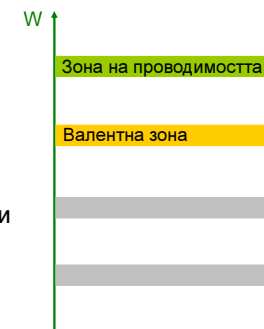
Зонна теория (енергиен модел)

- Електроните на много атоми, както е в един кристал си влияят взаимно
- Отделните линии не могат да се различават и се получават зони
- Между отделните енергийни зони има забранени зони



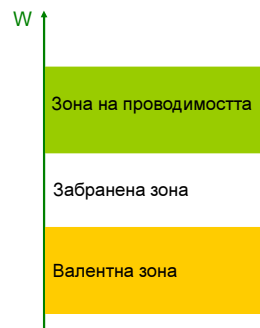
Зонна теория (енергиен модел)

- Енергийната зона на най-външната електронна обвивка се нарича **валентна зона**
- Над нея се намира **зоната на проводимостта**
- В тази зона се намират отделените от атомите свободни електрони, които осигуряват проводимостта на ПП



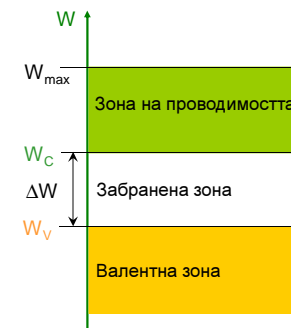
Зонна теория (енергиен модел)

- Взаимодействието между атоми се осъществява само от електрони, които се намират във валентната зона или зоната на проводимостта
- Затова обикновено се показват само тези две зони и намиращата се между тях забранена зона



Зонна теория (енергиен модел)

- $W_C - W_V = \Delta W$ се нарича ширина на забранената зона
- Ако електрон придобие по-голяма енергия от W_{\max} , той може да напусне кристала



Енергиен модел при метали

- При металите валентната зона и зоната на проводимостта се припокриват
- По този начин валентните електрони могат да минават в зоната на проводимост без да им е необходима допълнителна енергия



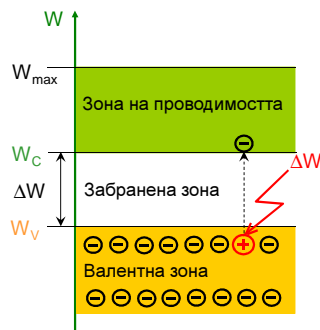
Енергиен модел при чист ПП

- При полупроводниците съществува забранена зона
- При различните ПП тя е с различна ширина:
 - За Ge: $\Delta W \approx 0,7 \text{ eV}$
 - За Si: $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$
- при $T = 0 \text{ K}$ всичките електрони са във валентната зона
- ПП се държи като изолатор



Енергиен модел при чист ПП

- При $T > 0\text{ K}$ електроните придобиват допълнителна енергия
- Ако тази енергия е $\geq \Delta W$, то електронът напуска валентната зона и преминава в зоната на проводимостта
- Генерират се един свободен електрон и една дупка



Енергиен модел при изолатори

- Не е възможно да се вкара на валентните електрони енергия по-голяма от 2,5 eV
- Следователно материали с $\Delta W \geq 2,5\text{ eV}$ са изолатори и не могат да провеждат ток
- Напр. за диаманта $\Delta W \approx 7\text{ eV}$



Полупроводникова електроника

- Развитие на ПП електроника
- Физика на полупроводниците
- Производство на ПП (Si)

Производство на ПП (Si)



Производство на ПП (Si)



□ Пясък, кварц (SiO_2)



□ Ge руда

Производство на ПП (Si)

- От пясъка (кварц), който е предимно SiO_2
- Поликристален силиций
 - Слънчеви елементи (КПД ~ 14%, но много по-евтини)
 - Монокристален силиций
- Монокристален силиций
 - Микроелектронни компоненти (диодни, транзистори...)
 - Слънчеви елементи (КПД ~16%)

Производство на ПП (Si)



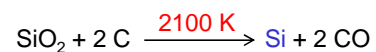
Поликристален Si, Монокристален Si, полирани шайби, опаковани шайби, компоненти

Производство на ПП (Si)

- Процесът на производството е много сложен
- Съвместяване на знания от различни области
 - Физика
 - Химия
 - Електротехника
 - Фина механика
- Сравнително малко производители разполагат с цялостната технология

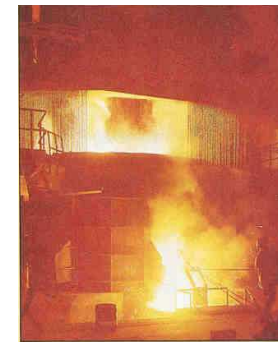
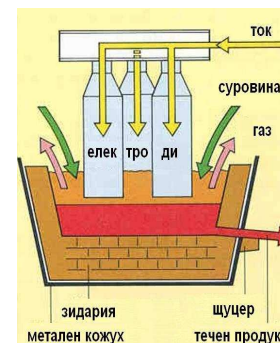
Поликристален Si (първа фаза)

- Кварцовият пясък се стопява при 2100 °C
- След редукция с въглерод
 - технически силиции (Si)
- Най-често по електрохимичен път
- Потопят се коксови електроди в стопилката



- Чистотата на Si е около 98 % (примеси Fe, Al, Ca, Ti, C)
- Това е твърде малко за нуждите на микроелектрониката

Редукция с въглерод

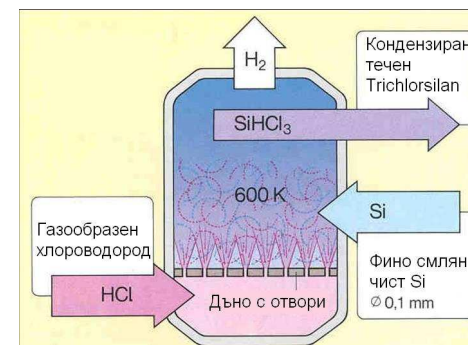


Поликристален Si – (втора фаза)

- Суровината се смила до размер около $\varnothing 0,1 \text{ mm}$
- За пречистване се добавя хлороводород
 - Trichlorsilan
- Течността се дестилира
- Отделят се другите Si-съединения
- чист Trichlorsilan (течен)

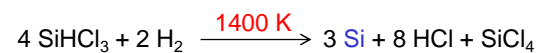


Производство на трихлорсилан

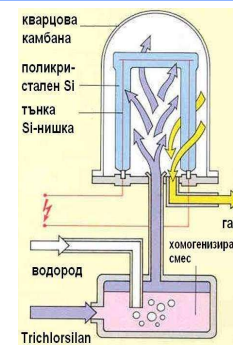


Поликристален Si - (трета фаза)

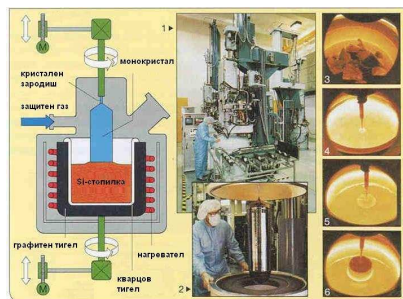
- Trichlorsilan (газообразен) се третира с водород
- Поликристален Si с чистота 99,999999 %
- Si се отлага върху много тънки нишки от чист Si
- Получават се пръчки с Ø 20 cm и 2 m дължина
- Най-често следва раздробяване



Редукция с водород

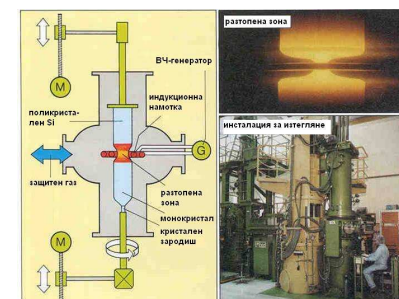


Монокристален Si



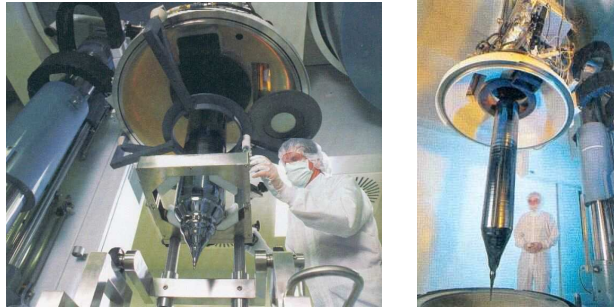
Изтегляне от стопилка (Метод на Чохларски) 90 %

Монокристален Si



Изтегляне на разтопената зона 10 %

Монокристален Si

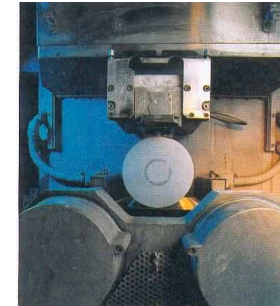


Ø 20 (30) cm и дължина до 2 m

Обработка на монокристалния Si



Шлифоване до необходимия Ø



Нарязване на шайби с деб. ~ 0,5 mm

Обработка на шайбите



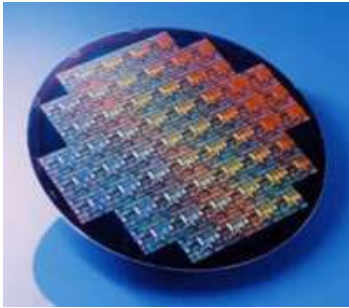
лепинговане, заобляне на ръбовете, почистване, ецване, полиране, докато по повърхността не останат дефекти

Готова шайба (300 mm)



Siltronic, 2001 г.

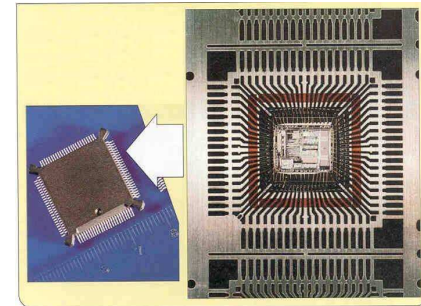
Шайба с интегрални схеми (IC's)



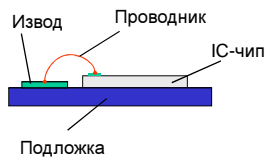
- След нарязване, интегралните схеми (чиповете) се монтират в корпус

Монтаж на интегралните схеми

1. Центриране на чиповете
2. Бондиране
3. Пресоване на пластмасовия корпус



Бондиране



- Под бондиране се разбира свързването на съответните точки от чипа с изводите посредством тънък проводник
- Wire bonding