

Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład III

- Detektory krzemowe

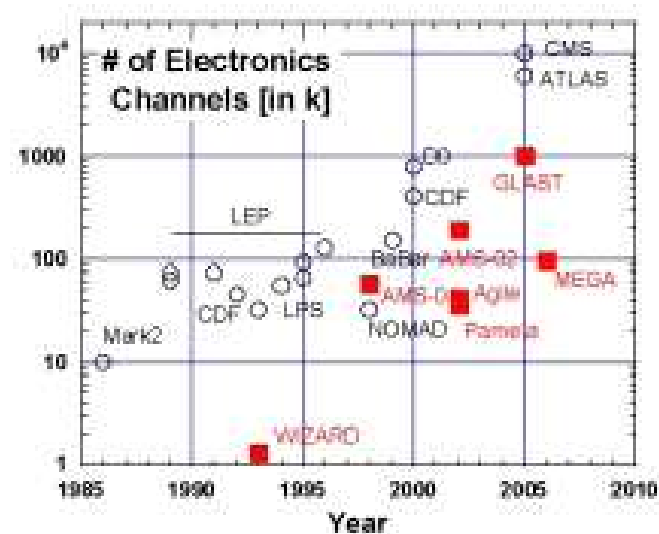
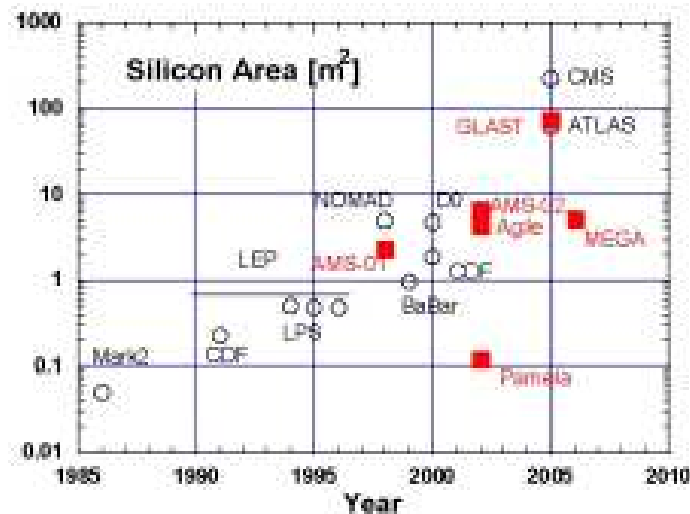
Wprowadzenie

Pierwsze detektory półprzewodnikowe: lata '50 XX w. (pomiar energii)

Pierwsze próby wykorzystania do pomiaru pozycji: ~1980 (NA32)

Lawinowy rozwój w latach '90: eksperymenty przy LEP, SLC i Tevatronie.

Ogromne korzyści z rozwoju komercyjnych technologii...



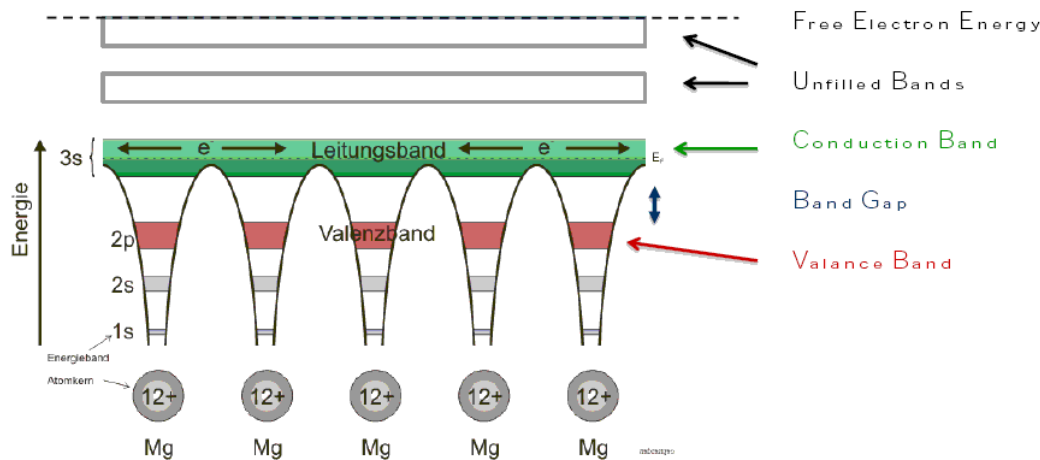
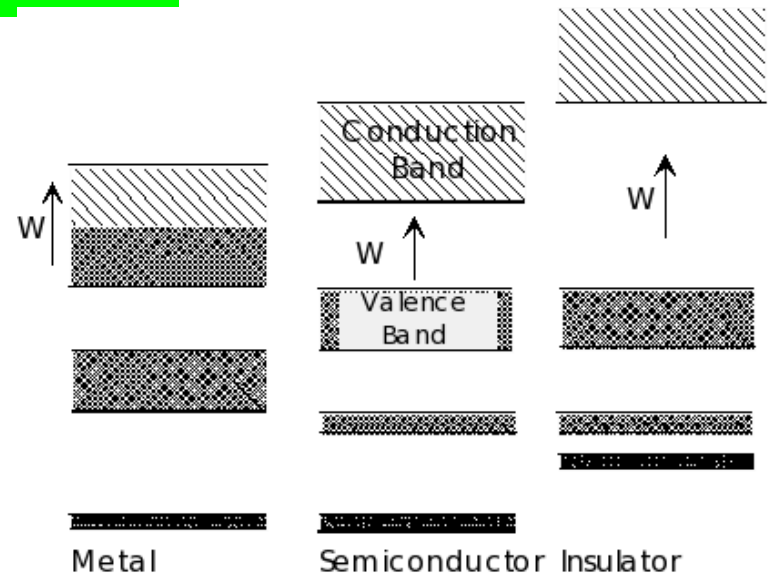
Dziś nikt nie wyobraża sobie eksperymentu bez detektorów krzemowych...

Półprzewodniki

Struktura pasmowa

Elektrony w **paśmie walencyjnym** są “związane” z danym atomem

Elektrony w **paśmie przewodzenia** są “uwspólnione” - mogą się swobodnie przemieszczać po całym kryształce.



Pasmo przewodzenia wypełnione

⇒ **przewodnik**

Puste pasmo przewodzenia i duża przerwa energetyczna ⇒ **izolator**

Puste pasmo przewodzenia ale mała przerwa energetyczna ⇒ **półprzewodnik**

Półprzewodniki

Przerwa energetyczna

“Mała” przerwa energetyczna: porównywalna z energią termiczną elektronów.

Temperatura pokojowa: $kT \approx 0.025 \text{ eV} \Rightarrow$ przerwy rzędu 1 eV

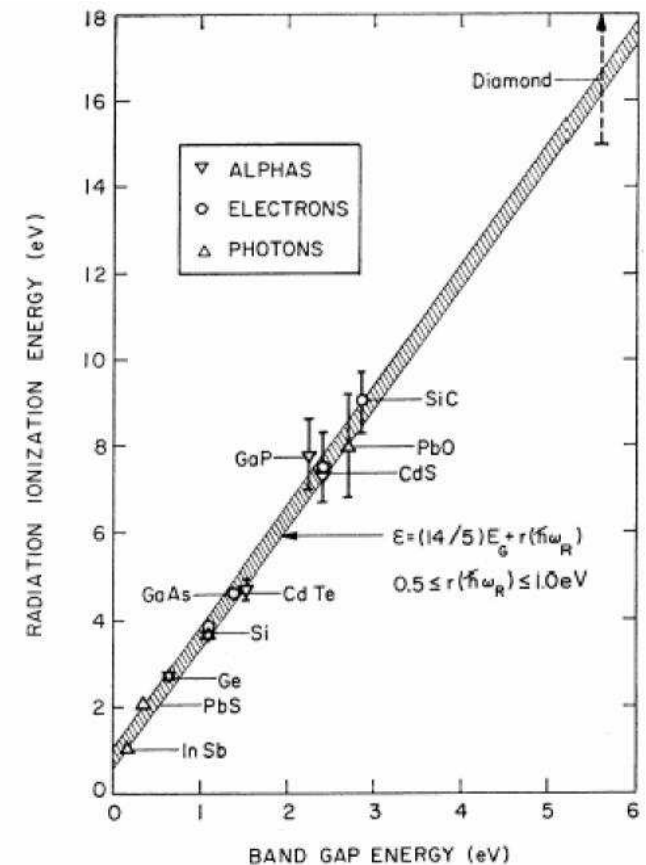
Typowe materiały półprzewodnikowe:

| | Diamond | SiC (4H) | GaAs | Si | Ge |
|--|---------|----------|-------|------|------|
| Atomic number Z | 6 | 14/6 | 31/33 | 14 | 32 |
| Bandgap E_g [eV] | 5.5 | 3.3 | 1.42 | 1.12 | 0.66 |
| $E(\text{e-h pair})$ [eV] | 13 | 7.6-8.4 | 4.3 | 3.6 | 2.9 |
| density [g/cm ³] | 3.515 | 3.22 | 5.32 | 2.33 | 5.32 |
| e-mobility μ_e [cm ² /Vs] | 1800 | 800 | 8500 | 1450 | 3900 |
| h-mobility μ_h [cm ² /Vs] | 1200 | 115 | 400 | 450 | 1900 |

Średnia energia jonizacji $\sim 3 \times E_g$

Prawdopodobieństwo samoistnego przejścia elektronu do pasma przewodzenia

$$p \sim \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$



Półprzewodniki

Rozkład Fermiego-Diraca

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu o energii E :

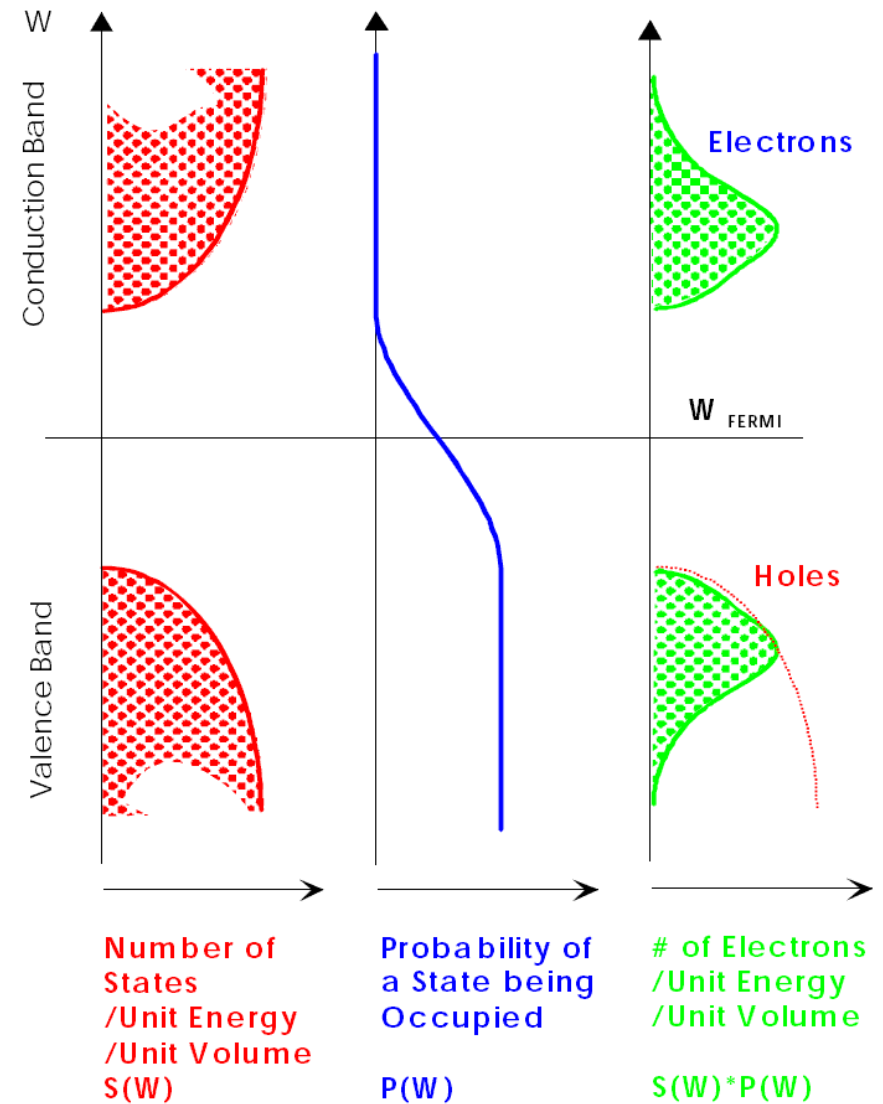
$$p(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right) + 1}$$

E_F - energia Fermiego, $p(E_F) \equiv 0.5$

Dla $T \rightarrow 0$ półprzewodnik jest izolatorem.

W temperaturze pokojowej obsadzenie pasma przewodnictwa $p \sim 10^{-9}$

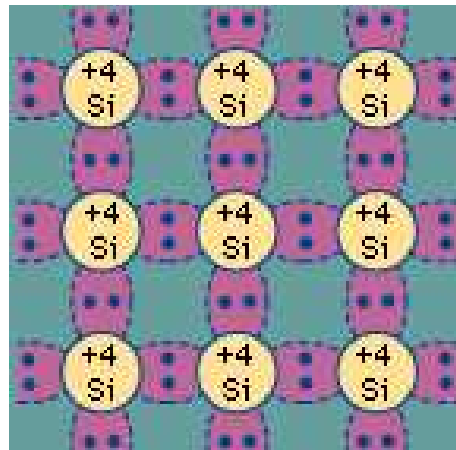
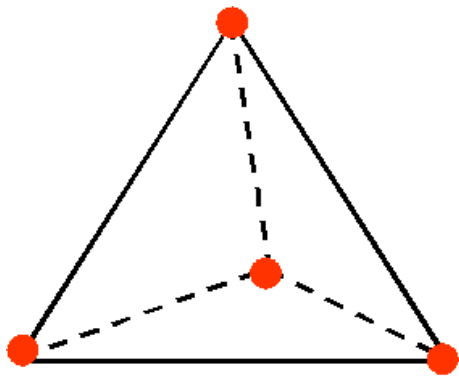
Ale to wystarcza! Koncentracja swobodnych nośników $n \sim 10^{10}/cm^3$



Półprzewodniki

Domieszkowanie

W kryształie krzemu każdy atom ma 4 wiązania, które tworzą jego 4 elektrony walencyjne.

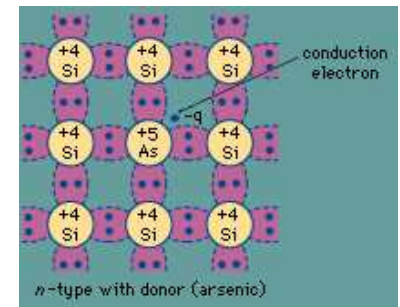


Bardzo nieliczne elektrony ($\sim 10^{-9}$) przechodzą do pasma przewodzenia pozostawiając dziurę w paśmie walencyjnym

Liczbe wolnych nośników można zwiększyć wprowadzając domieszki:

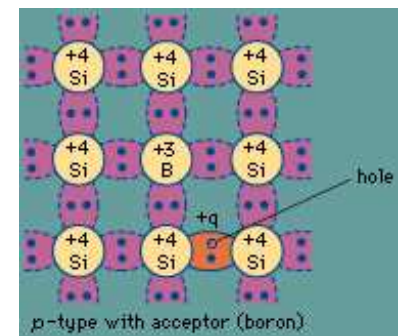
typu *n* - donory
np. P, As,...

pierwiastki V grupy
“nadmiarowy” elektron



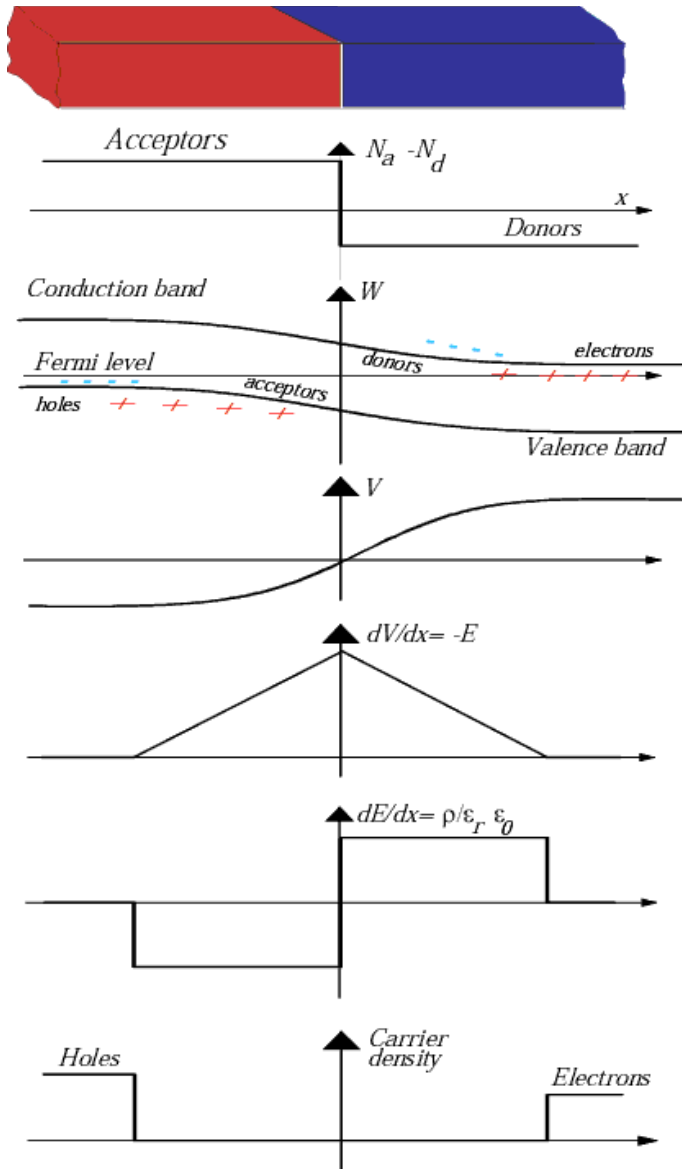
typu *p* - akceptory
np. B...

pierwiastki III grupy
“brakujący” elektron
“nadmiarowa” dziura



Typowe domieszki $n \sim 10^{12}/cm^3$

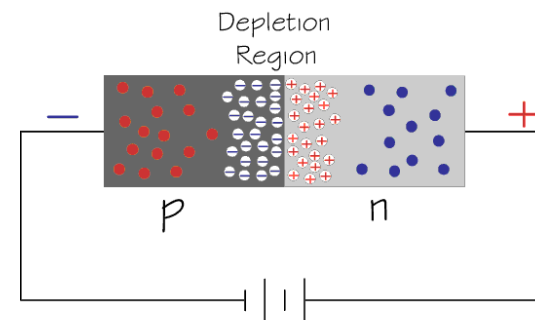
Złącze pn



Półprzewodniki typu n i typu p pozostają el. obojętne. Nadmiar/niedobór elektronów kompensowany jest ładunkiem jonów domieszek (nieruchomych).

Różnica koncentracji elektronów
 \Rightarrow różnica poziomów Fermiego

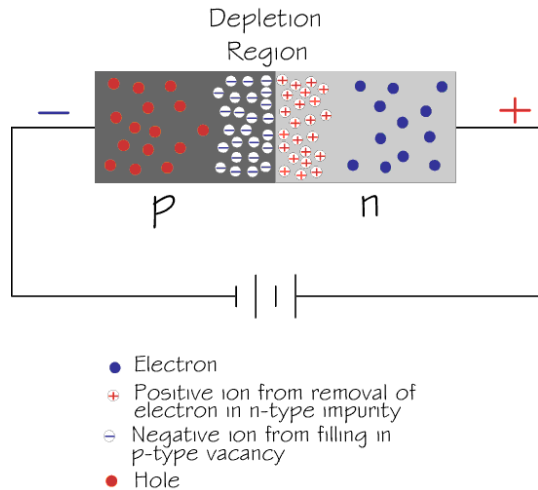
Przy zetknięciu następuje przepływ ładunków aż do wyrównania poziomów:



- Electron
- + Positive ion from removal of electron in n-type impurity
- ⊖ Negative ion from filling in p-type vacancy
- Hole

Złącze pn

Szerokość warstwy zubożonej:



Bez zewnętrznego napięcia:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{N_e} V_{pn}}$$

$N_d = N_a = N$ - koncentracja domieszek

V_{pn} - różnica potencjału na złączu

ϵ - stała dielektryczna ($\sim 1 \text{ pF/cm}$)

Obszar zubożony można powiększać przykładając dodatkowe napięcie

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{N_e} (V + V_{pn})}$$

$$W = \sqrt{2\epsilon\rho\mu (V + V_{pn})}$$

V - napięcie w kierunku zaporowym

ρ - przewodnictwo ($\sim 1 - 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$)

μ - ruchliwość ładunków ($v = \mu \cdot E$)

$$\mu_e \approx 1350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$

$$\mu_h \approx 450 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$

W odróżnieniu od detektorów gazowych ruchliwości elektronów i dziur są do siebie zbliżone

Złącze pn

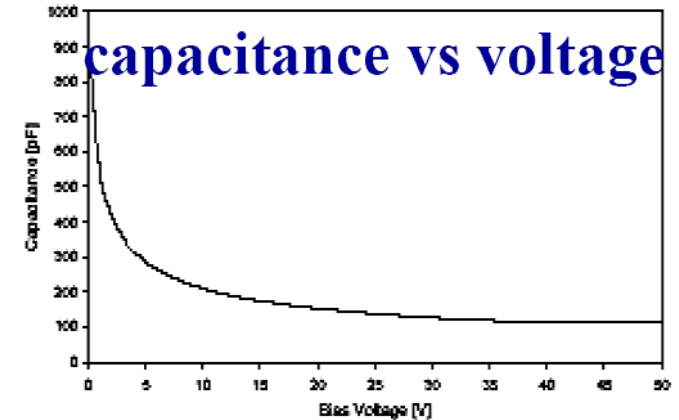
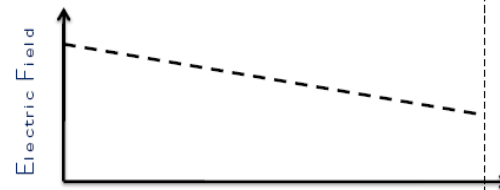
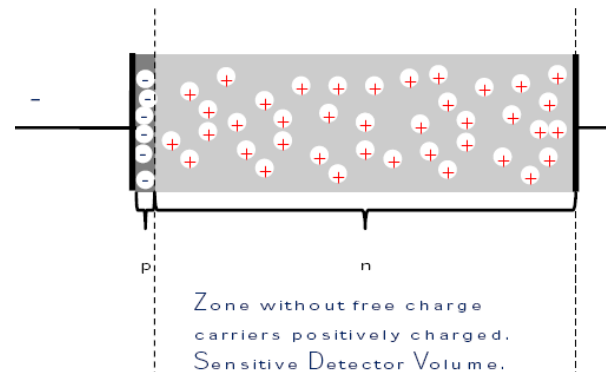
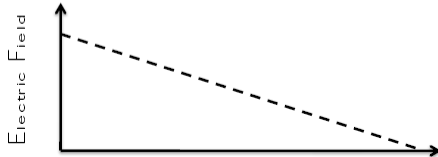
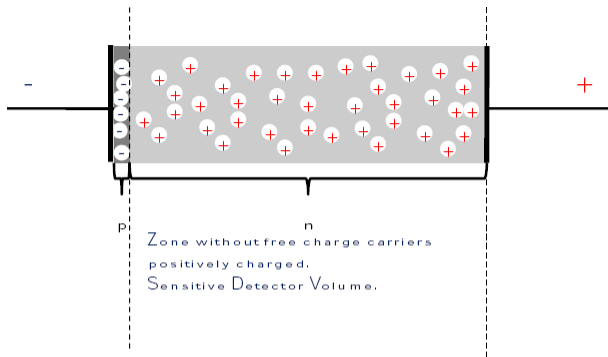
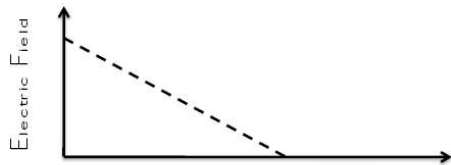
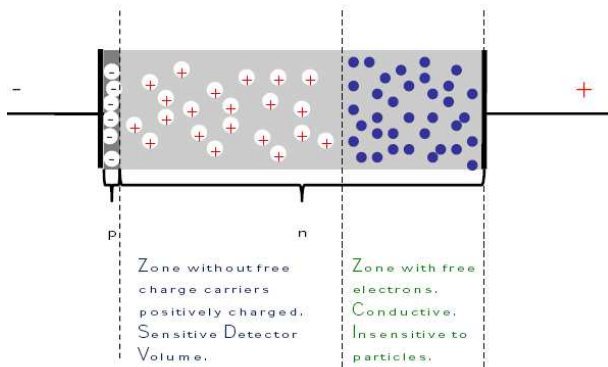
Obszar zubożony można powiększać przykładając dodatkowe napięcie

Uzyskujemy częściowe lub całkowite zubożenie diody.

Obszar zubożony \Rightarrow pole elektryczne, brak ładunków

Obszar nie zubożony \Rightarrow ładunki swobodne, brak pola

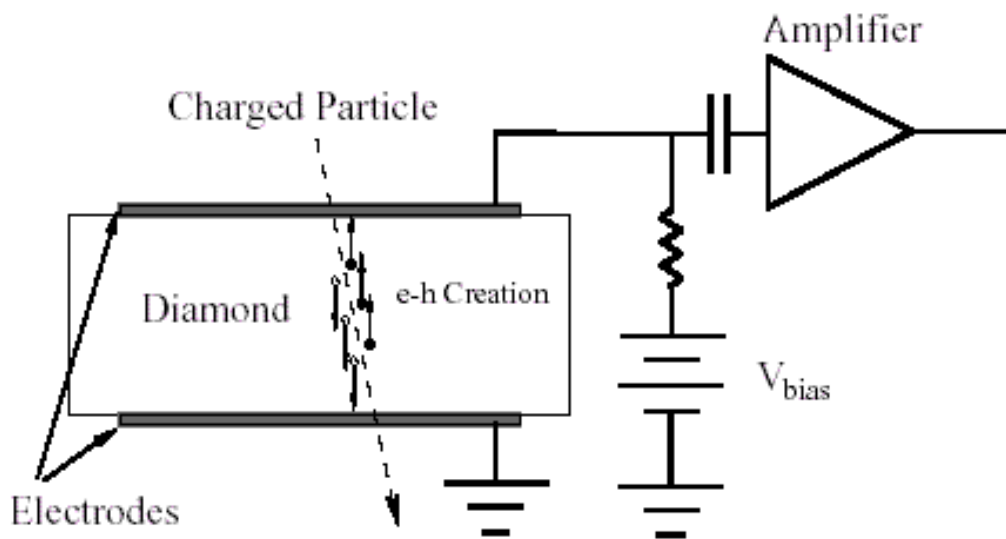
Rozmiar obszaru zubożonego możemy mierzyć poprzez pomiar pojemności złącza:



Detektory krzemowe

Komora jonizacyjna

Spolaryzowana zaporowo dioda półprzewodnikowa działa jak komora jonizacyjna



Przechodząca cząstka jonizuje półprzewodnik \Rightarrow tworzy pary elektron (w paśmie przewodnictwa) - dziura.

Pole elektryczne powoduje dryf elektronów w kierunku anody i dziur w kierunku katody \Rightarrow przepływ prądu

Straty na jonizację w krzemie: $\frac{dE}{dx} \approx 3.88 \text{ MeV/cm}$

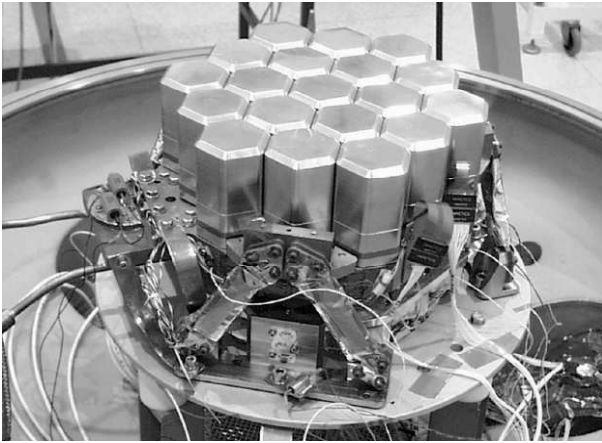
\Rightarrow około 100 par $e - h$ na każdy μm grubości złącza (tyle co 1cm gazu)

\Rightarrow detektory krzemowe nie wymagają powielania ładunku !

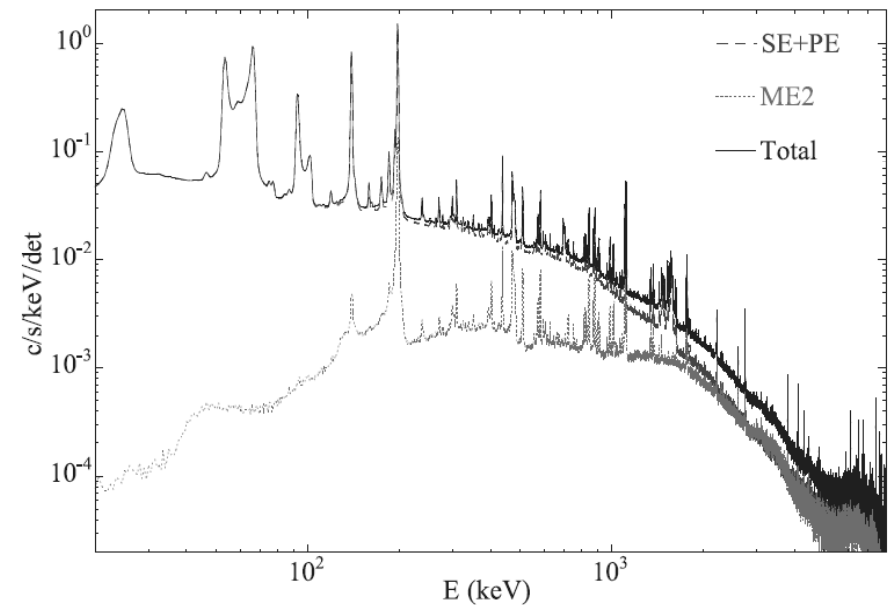
Detektory krzemowe

SPI

detektor germanowy na satelicie INTEGRAL



Pomiar widma promieniowania γ



Mierzona całkowita jonizacja powstająca w wyniku oddziaływania fotonu w diodzie.

Brak pomiar pozycji...

Detektory krzemowe

Kształt impulsu

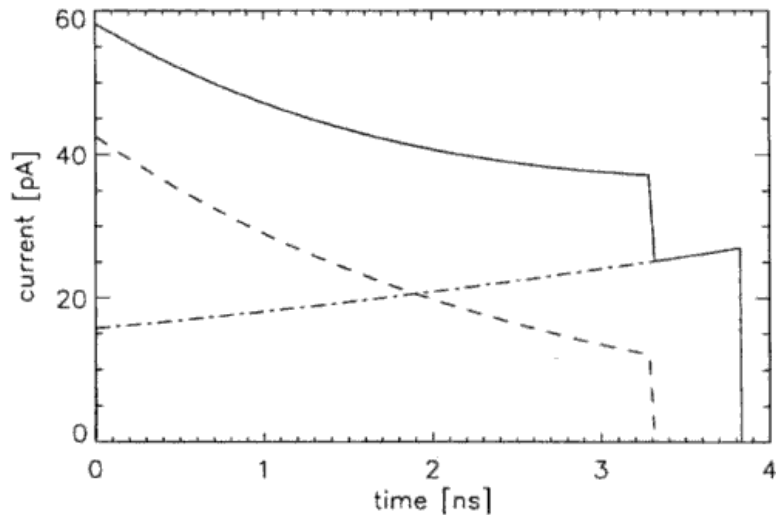


Fig. 5.4. Signal current formation induced by the separation of an electron-hole pair in the electric field of the space-charge region of the detector. The electron-hole pair is created in the center plane of a slightly (20%) overdepleted diode (see Example 5.2). Plotted are the electron-induced (*dashed line*), hole-induced (*dash-dot line*) and total (*continuous line*) currents

Podobnie jak w przypadku detektorów gazowych, kształt rejestrowanego impulsu odzwierciedla ruch ładunków w złączu.

Duża ruchliwość ładunków, cienkie złącze
⇒ bardzo krótkie impulsy

Równomierny rozkład pierwotnej jonizacji
⇒ równy wkład od elektronów i dziur

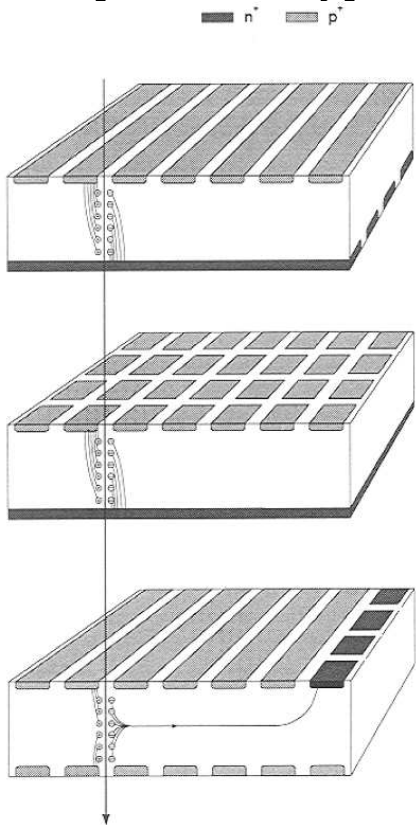
W przypadku jednorodnego pola elektrycznego ($v = \text{const}$) kształty impulsów pochodzących od elektronów i dziur powinny być płaskie.

Detektory paskowe

Detektory pozycyjne

Zwykła dioda nie dostarcza żadnej informacji o pozycji cząstki.

Ale w jednym detektorze możemy wytworzyć więcej złącz i uzyskać w ten sposób dodatkową informację. Jest kilka możliwości:

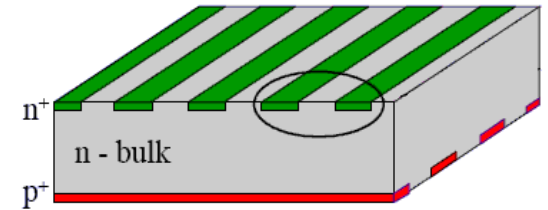


detektor paskowy

także dwustronny \Rightarrow

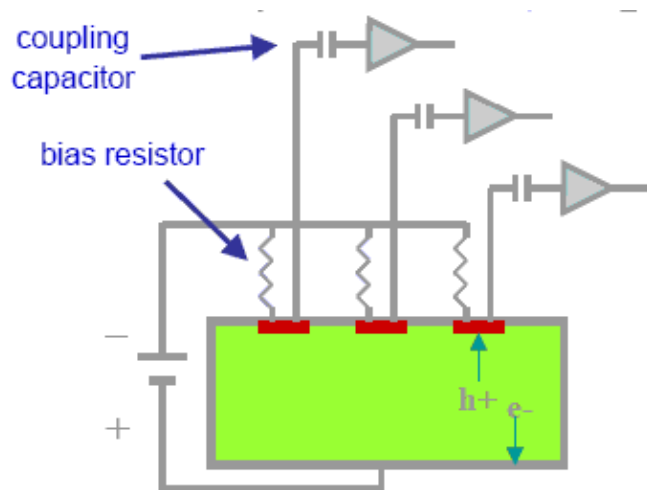
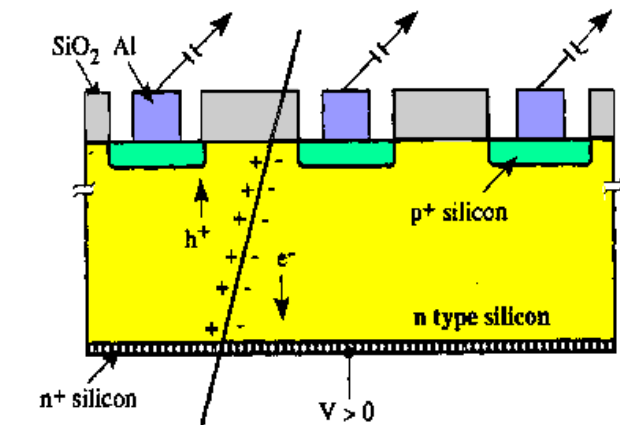
detektor pikslowy

detektor dryfowy



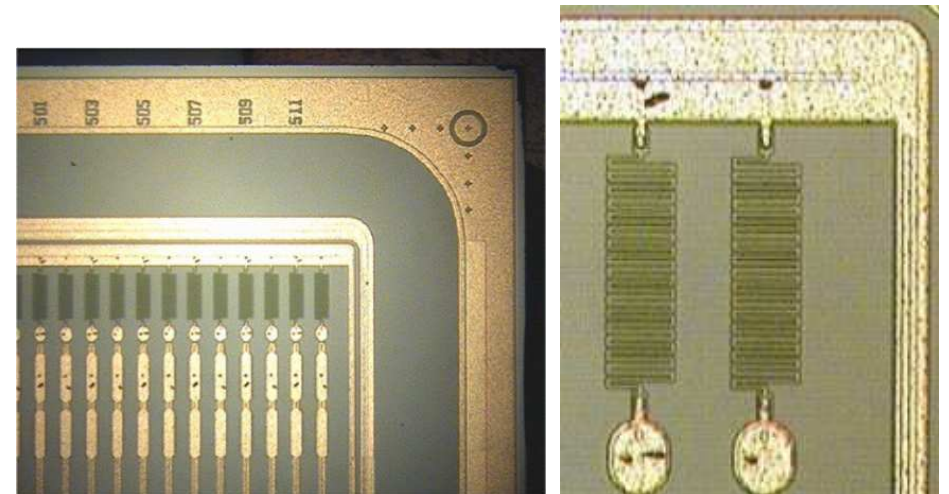
Detektory paskowe

Zasada działania



Na jednym podłożu typu *n* tworzymy paski typu *p*, z których ładunek wyprowadzany jest przez metalowe styki.

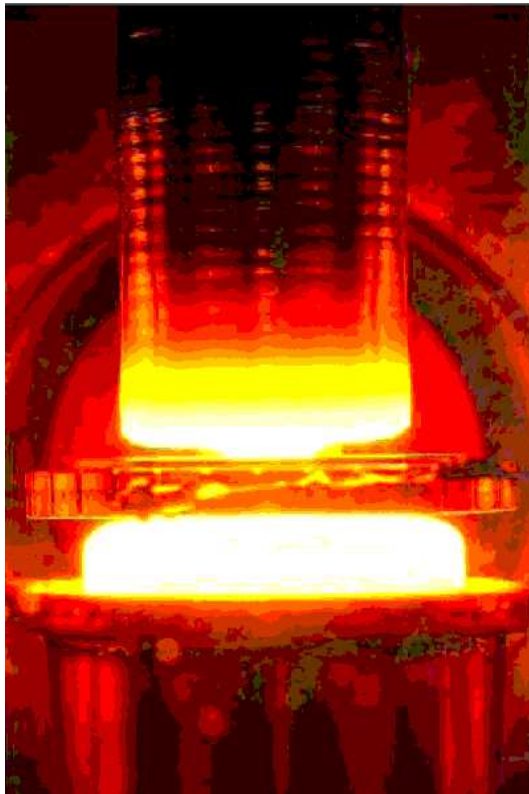
Napięcie polaryzujące doprowadzane przez rezystory



Detektory paskowe

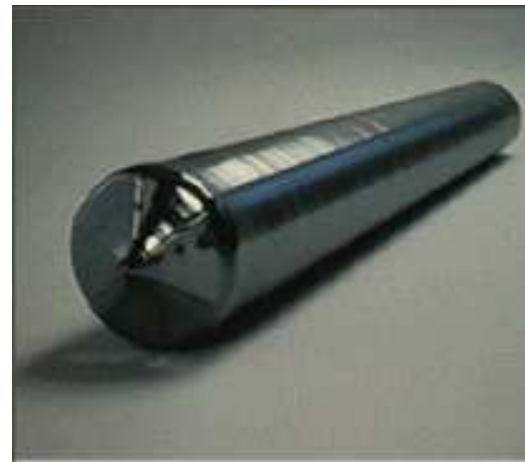
Technologia produkcji

Krzem uzyskiwany jest z piasku. Po chemicznym oczyszczeniu przetapiany jest wraz z domieszkami.



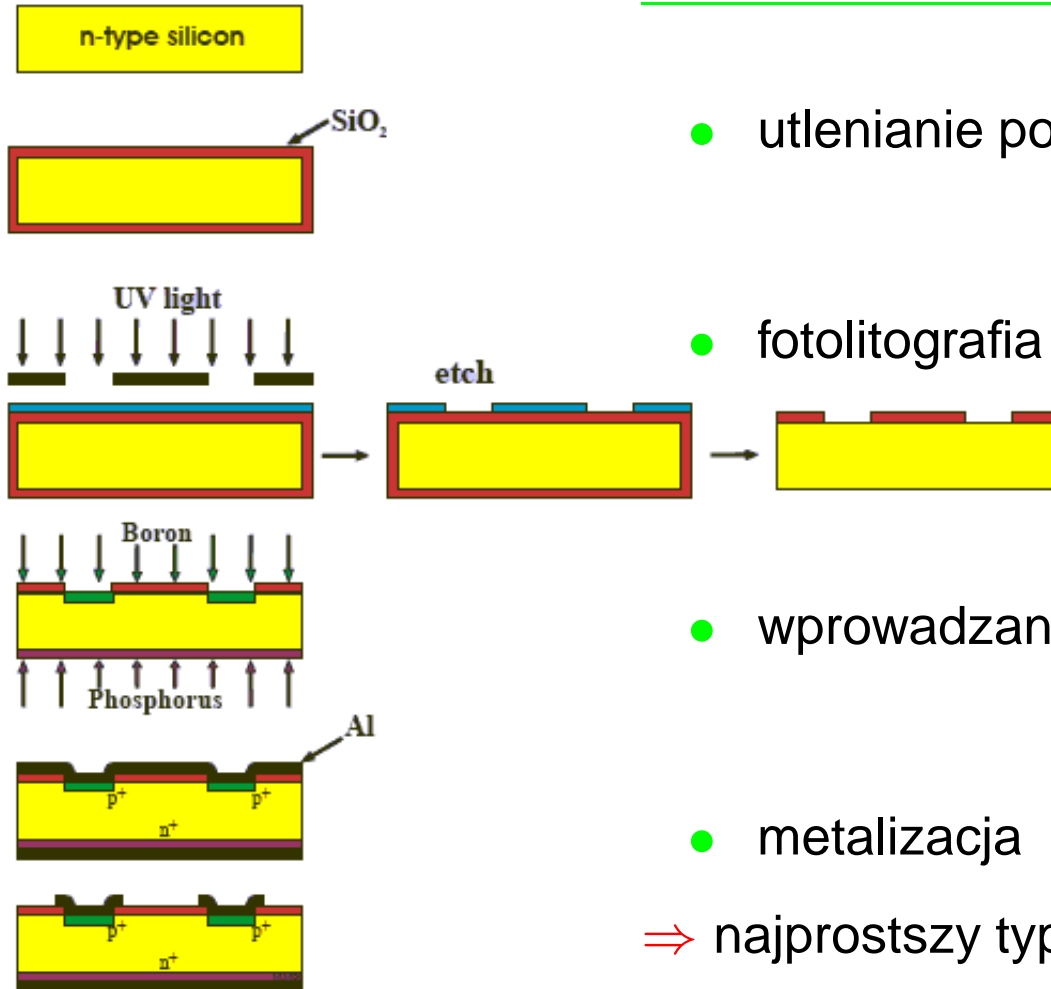
Polikrystaliczny krzem jest następnie topiony warstwowo w specjalnym piecu ⇒ monokryształ

Cięty piłą diamentową na plastry o odpowiedniej grubości ($300-500\mu m$), następnie polerowany



Detektory paskowe

Technologia produkcji



- utlenianie powierzchni (800-1200 °C)

- fotolitografia + trawienie

- wprowadzanie domieszek

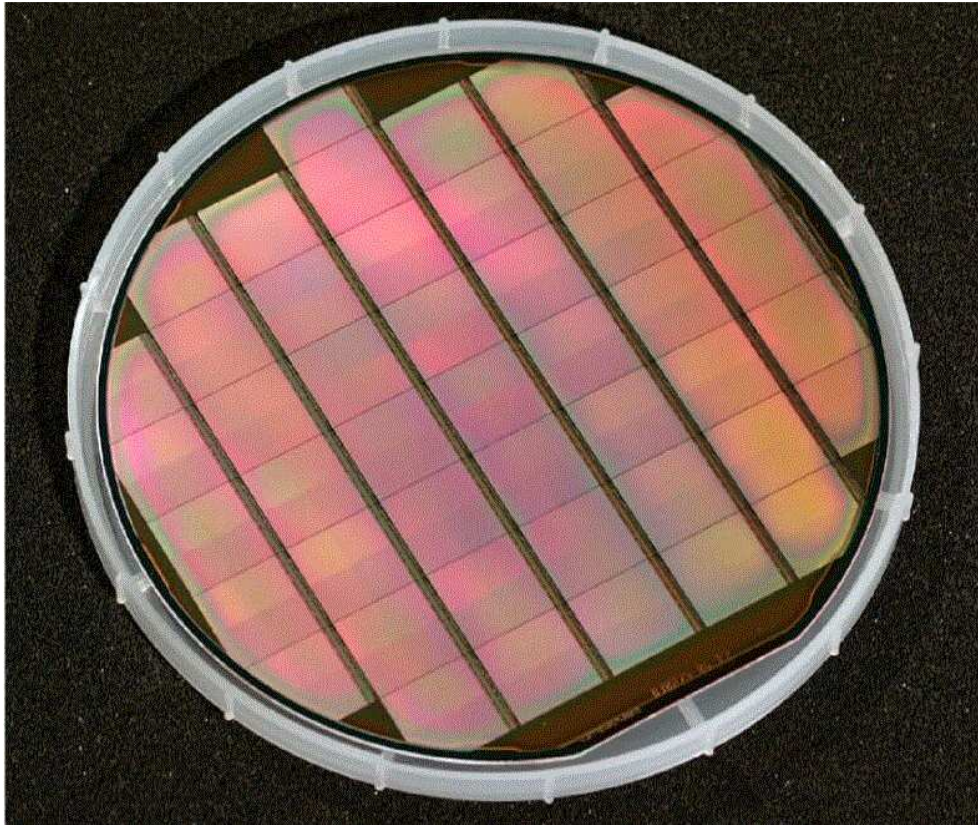
- metalizacja

⇒ najprostszy typ detektora gotowy...

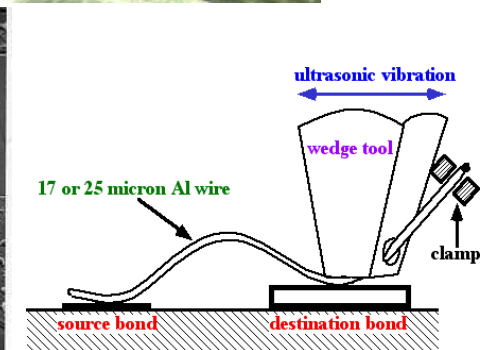
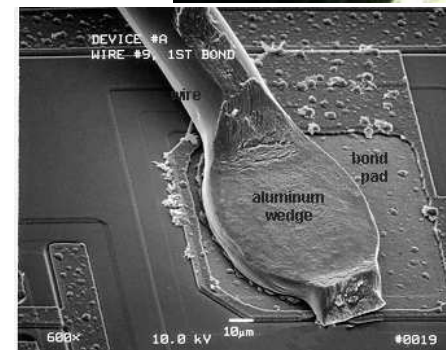
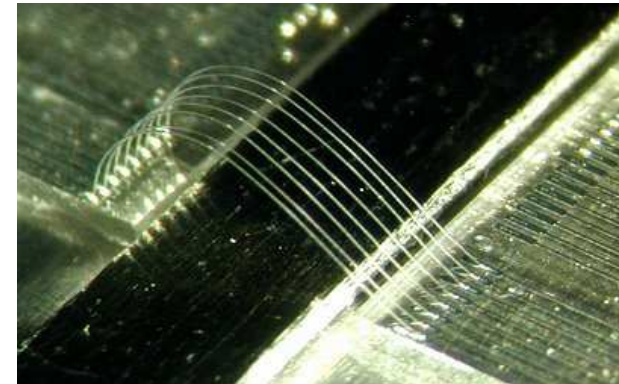
Detektory paskowe

Technologia produkcji

Na jednym plastrze tworzonych jest naogół wiele elementów



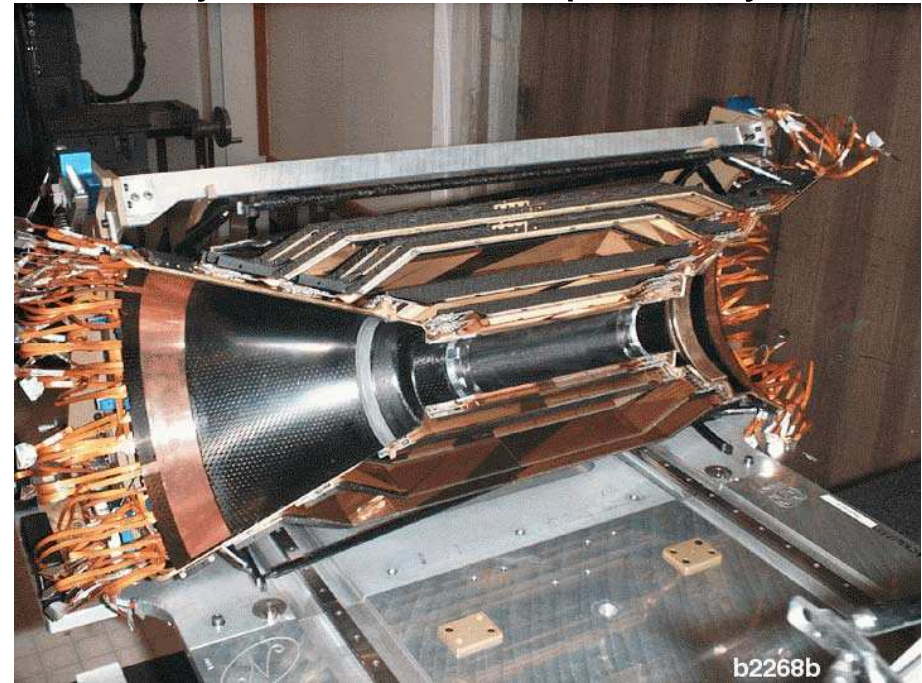
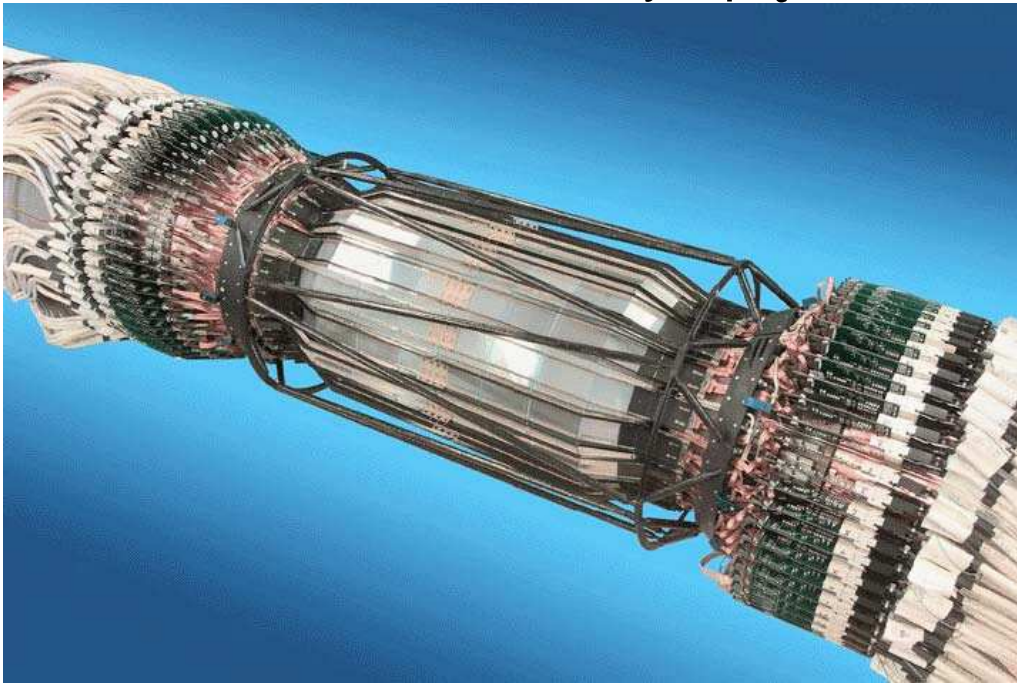
Plaster musi zostać pocięty, a następnie wykonane układy muszą zostać przyłutowane do “podstawek”



Detektory paskowe

BaBar

Detektor wierzchołka złożony z pięciu warstw dwustronnych detektorów paskowych.

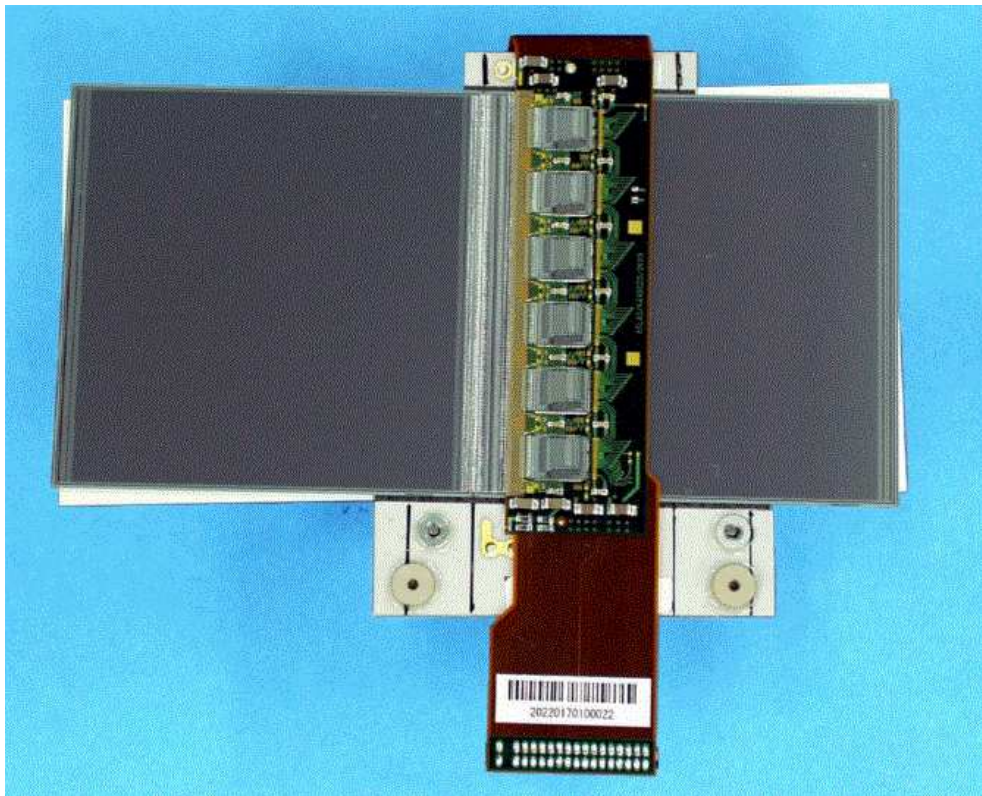


Jak najbliżej punktu oddziaływania:

- precyzja wyznaczania wierzchołka
- pokrycie w kącie brylowym

Detektory paskowe

ATLAS



Dwa sensory wraz z elektroniką odczytową

Pojedynczy sensor: $64 \times 64 \text{ mm}^2$
768 pasków grubości $12 \mu\text{m}$, co $80 \mu\text{m}$
 ~ 3500 połączeń drucikami $25 \mu\text{m}$ Al

Precyzja pomiaru położenia $\sim 16 \mu\text{m}$

Detektor ATLAS: 15'552 sensory
łącznie 61 m^2 , 6.3 mln. pasków

Detektory paskowe

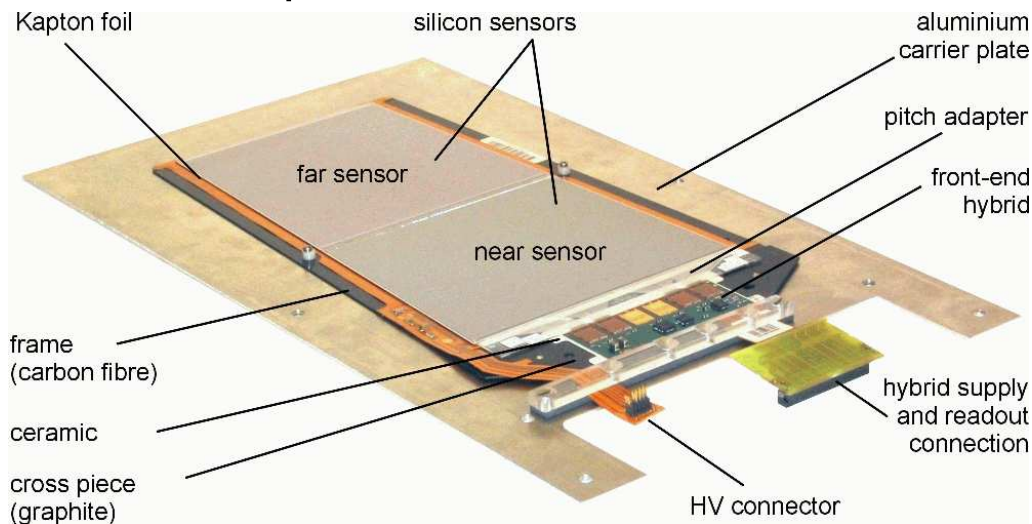
CMS

Centralny detektor śladowy oparty na krzemowych detektorach paskowych.

Około 24 tys. sensorów, 200 m² powierzchni.

Rekordzista !

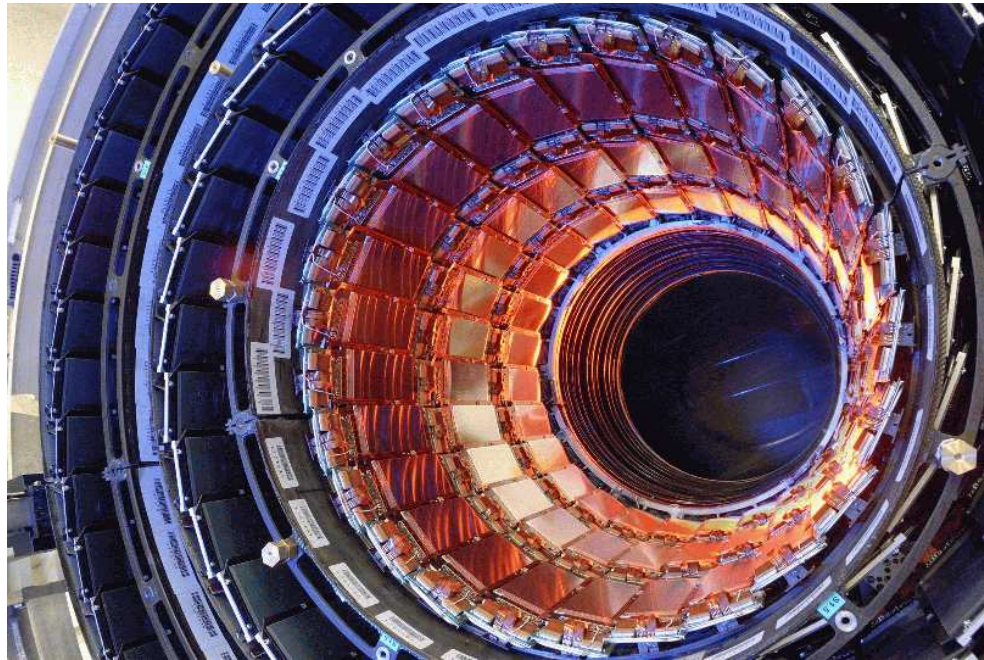
11 milionów pasków !



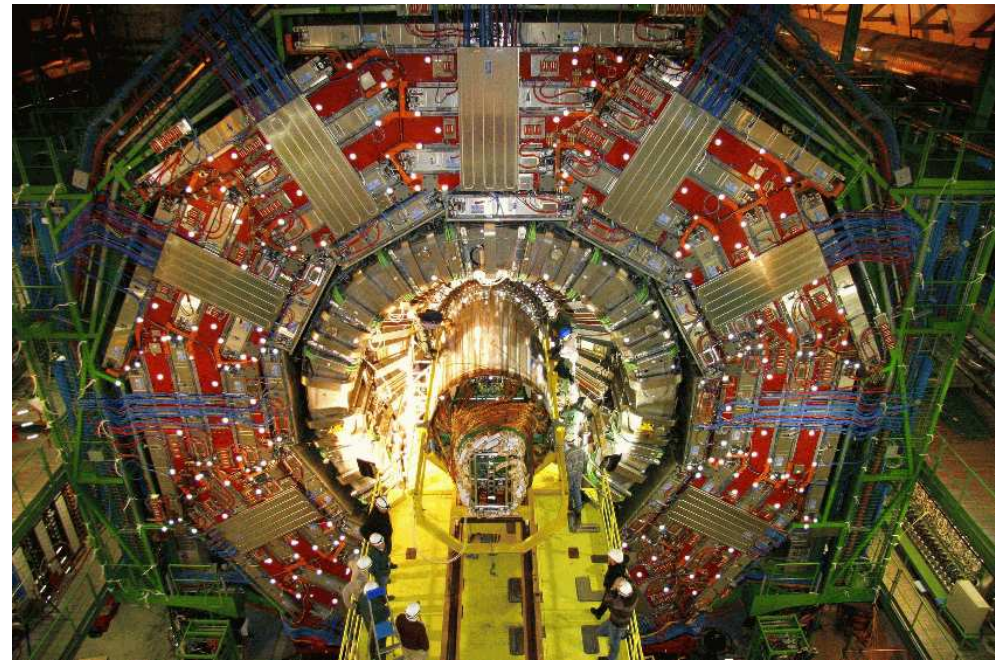
Detektory paskowe

CMS

Detektor śladowy gotowy do instalacji.



Instalacja w grudniu 2007.

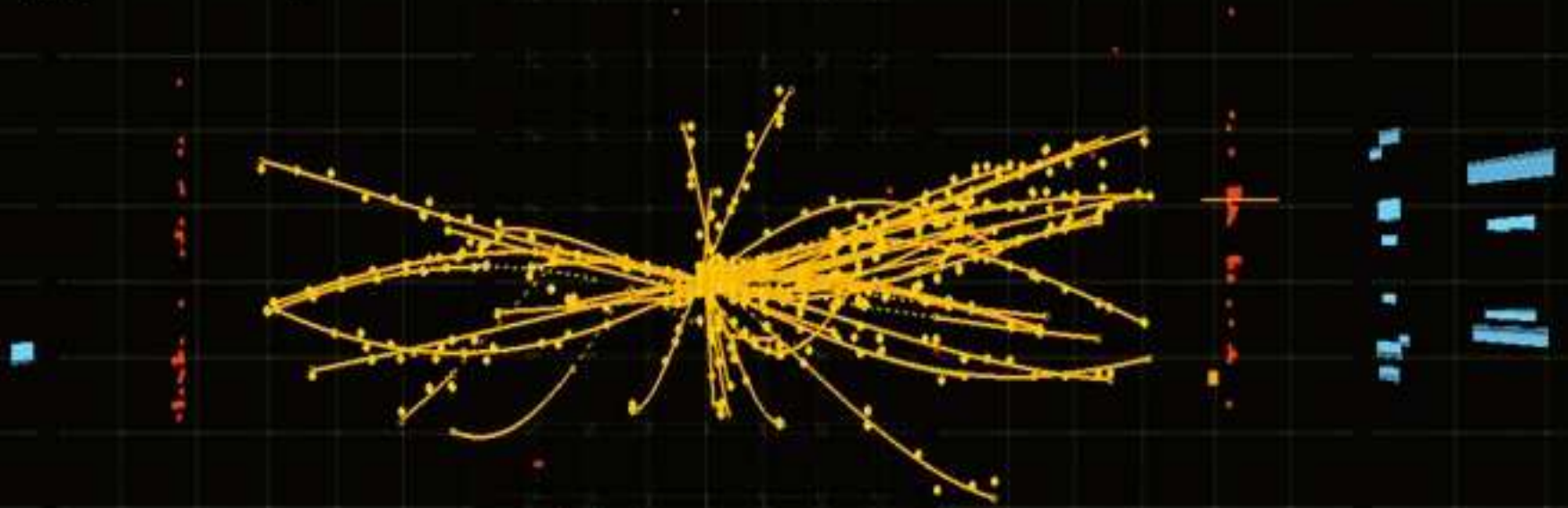




CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2009-Dec-06 04:14:38.495160 GMT
Run: 123592
Event: 2003169
Lumi section: 13
Orbit: 12844863
Crossing: 51

Jeden z pierwszych przypadków



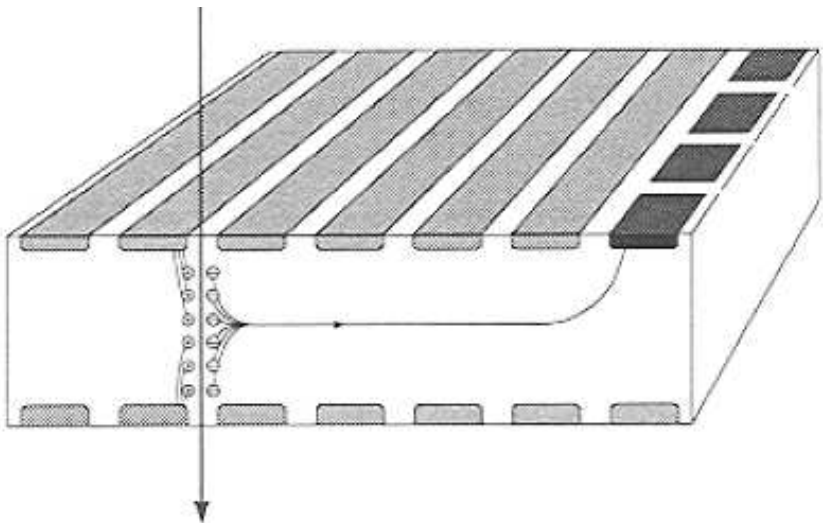
Detektory krzemowe

Detektory paskowe zapewniają pomiar pozycji tylko w jednym wymiarze (choć możliwe jest uzyskanie pasków po obu stronach).

Krzemowy detektor dryfowy

Podobnie jak w gazowej komorze dryfowej, znając czas dryfu ładunków można określić pozycję w drugim wymiarze

(pierwsza współrzędna z pozycji złącza)



Konieczne jest zapewnienie wysokiej czystości i jednorodności sensora, dokładna kontrola napięcia i temperatury...

Wykorzystane np. w eksperymencie ALICE przy LHC

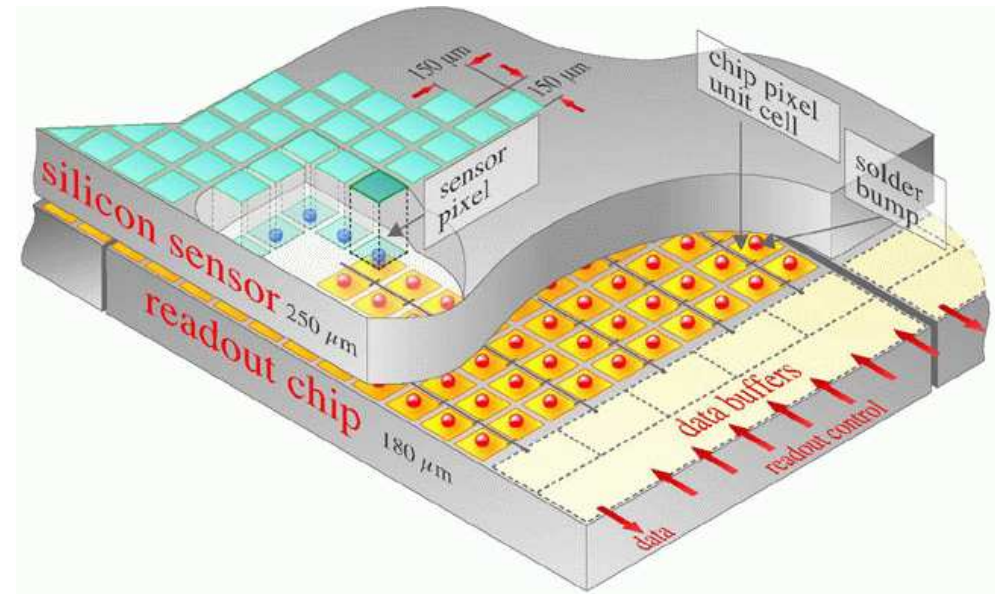
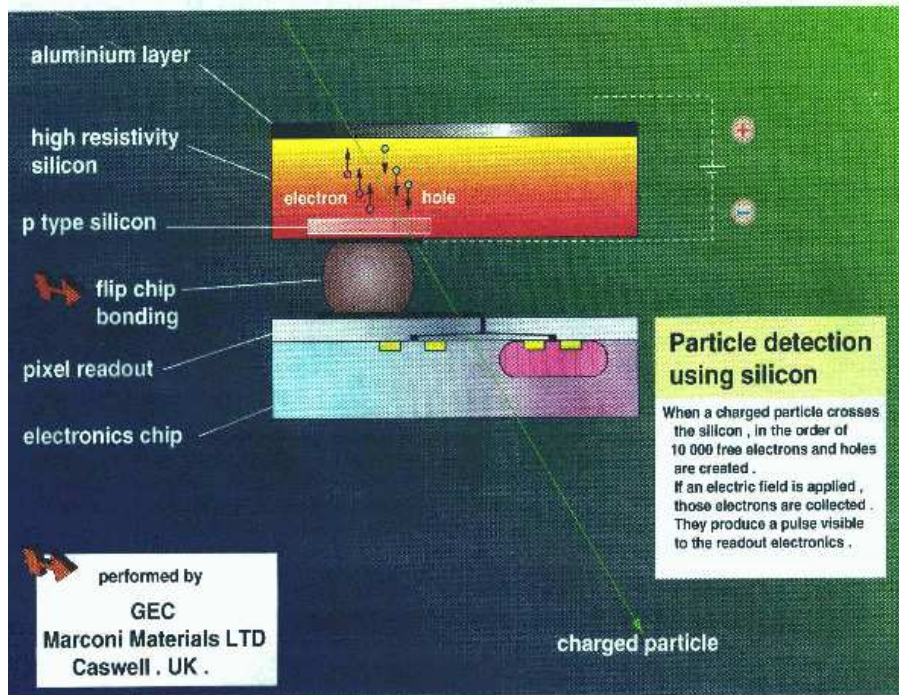
Detektory pixlowe

Problem odczytu paskowego - **tło kombinatoryczne**.

Przy dużej krotności cząstek bardzo utrudnia rekonstrukcję torów.

Rozwiązanie: **podział detektora na piksele**.

Podstawowy problem: **odczyt sygnałów** ze wszystkich kanałów !



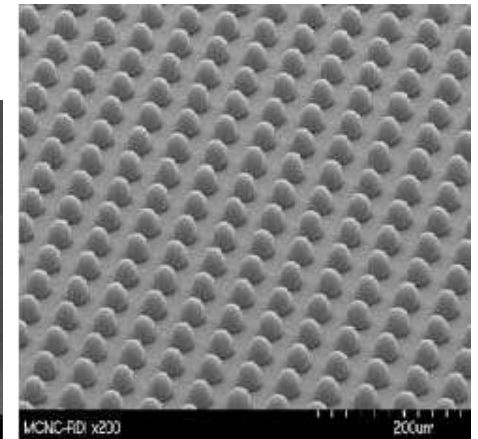
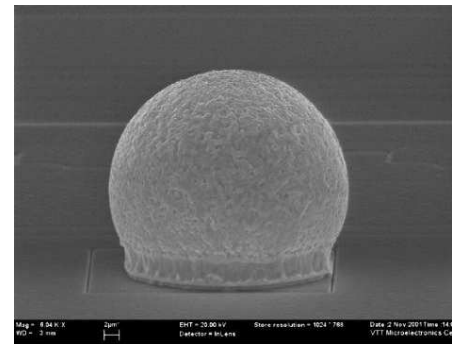
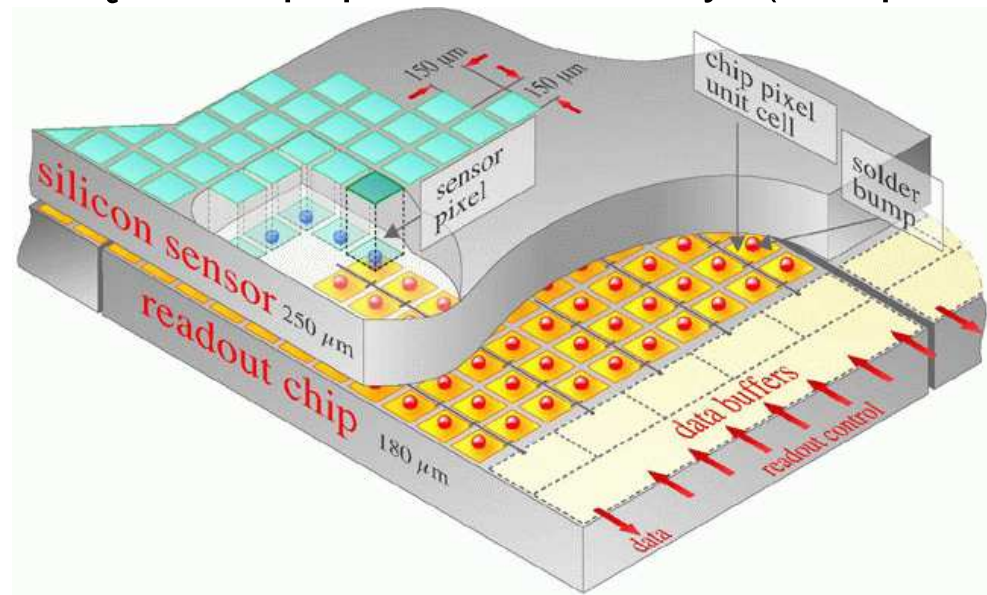
Hybrid Active Pixel Sensors (HAPS)

Detektory pixlowe

Hybrid Active Pixel Sensors (HAPS)

Inny typ materiału wykorzystywany jako detektor, inny do elektroniki odczytowej.

Połączenie poprzez “mikro luty” (bump bonding) średnicy 6 – 20 μm .



Detektor wierzchołka HAPS w detektorze ATLAS:

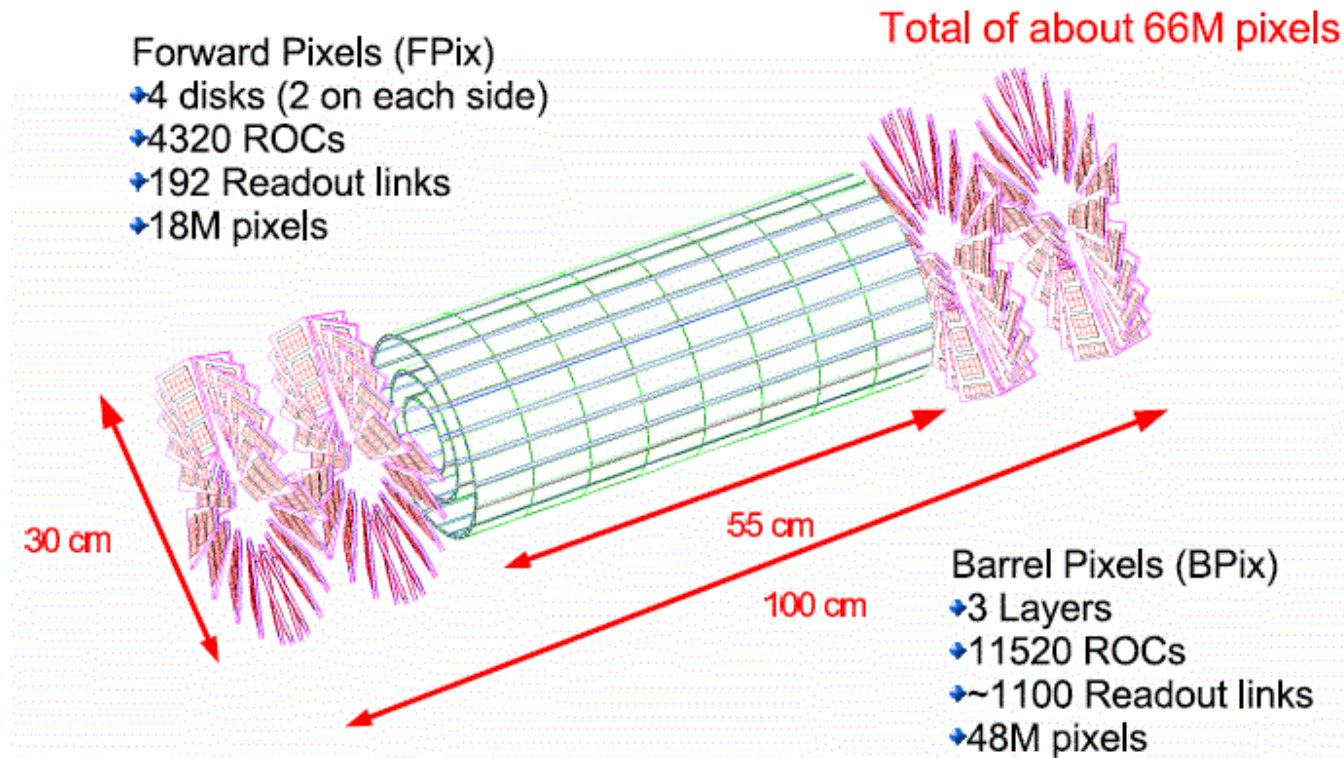
moduły $6 \times 2 \text{ cm}^2$, z pikslami $50 \times 400 \mu m$, 17 tys. modułów, łącznie 80 milionów piksli.

Elektronika: około 1000 tranzystorów na każdy pixel (pełna obróbka analogowa i cyfrowa).

Detektory pixlowe

Detektor pixlowy CMS

Także oparty na Hybrid Active Pixel Sensors (HAPS)

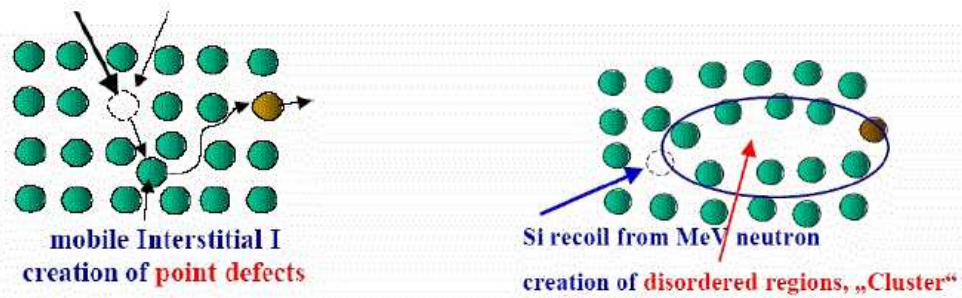


Rozmiar pixli: $100 \times 150 \mu m^2$ (ATLAS: $50 \times 400 \mu m^2$)

Detektory krzemowe

Zniszczenia radiacyjne

W wyniku oddziaływania cząstek jonizujących i neutronów powstają **defekty sieci**.

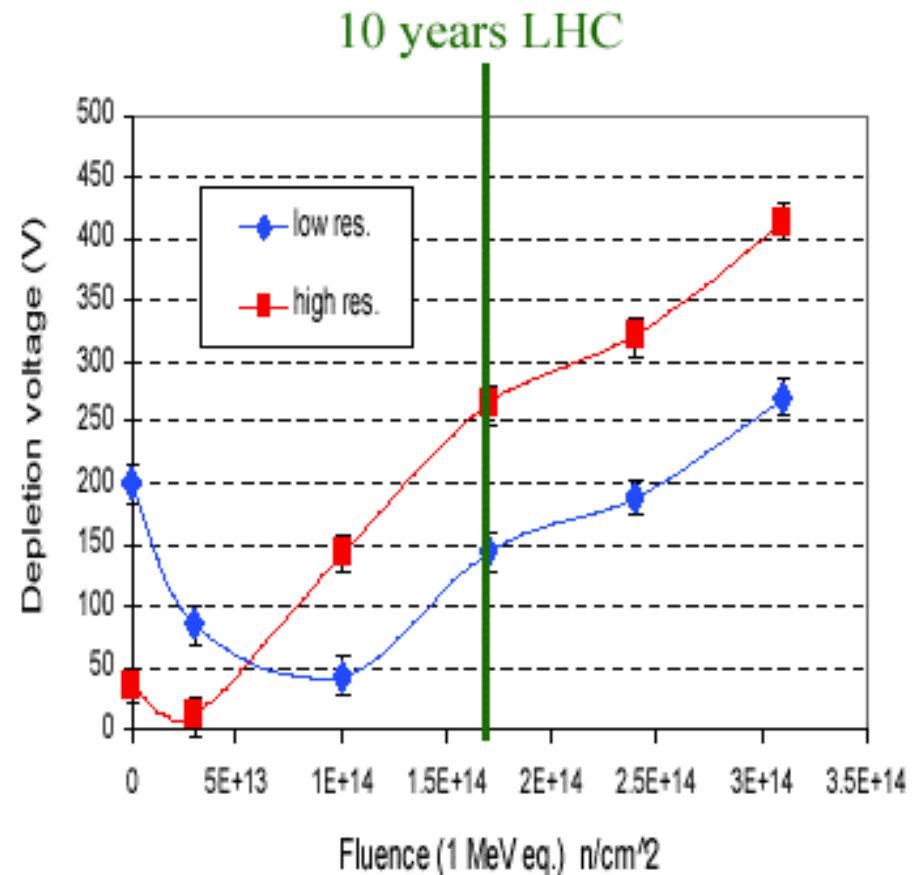


Pojawiają się **dodatkowe poziomy** energetyczne, zwiększa się przewodnictwo.

Zmienia się efektywny typ domieszkowania.

$n \rightarrow p$

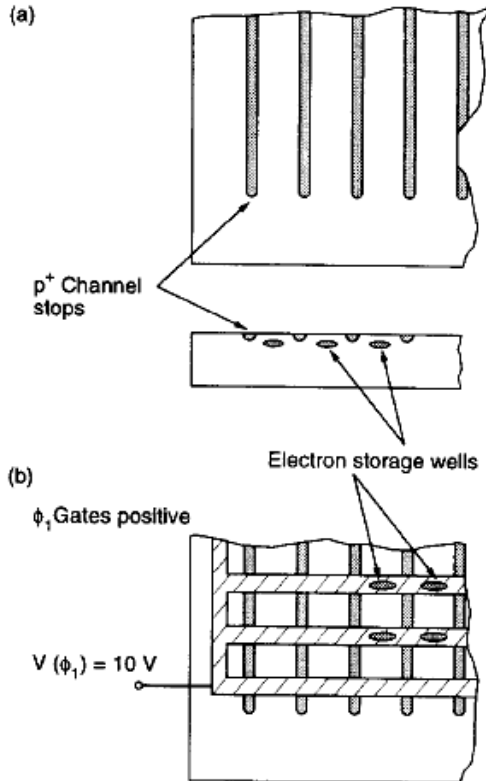
W pewnym zakresie zmiany można kompensować zmieniając odpowiednio **napięcie** polaryzujące diodę \Rightarrow



Detektor pikslowe

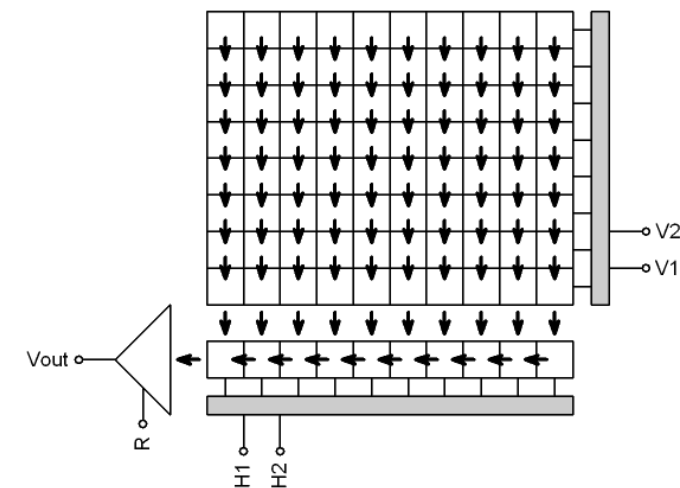
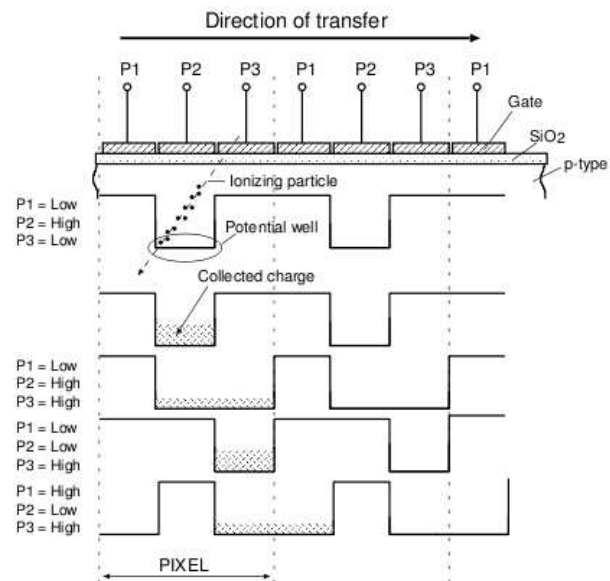
CCD

Rozwój technologii półprzewodnikowych doprowadził do powstania nowych koncepcji odczytu detektorów pikslowych



Odpowiednie domieszkowanie tworzy studnie potencjału, w której zbiera się ładunek.

Przy pomocy przykładanego napięcia można ładunek przesuwać w kierunku kanału odczytowego



Detektory pixlowe

CP CCD

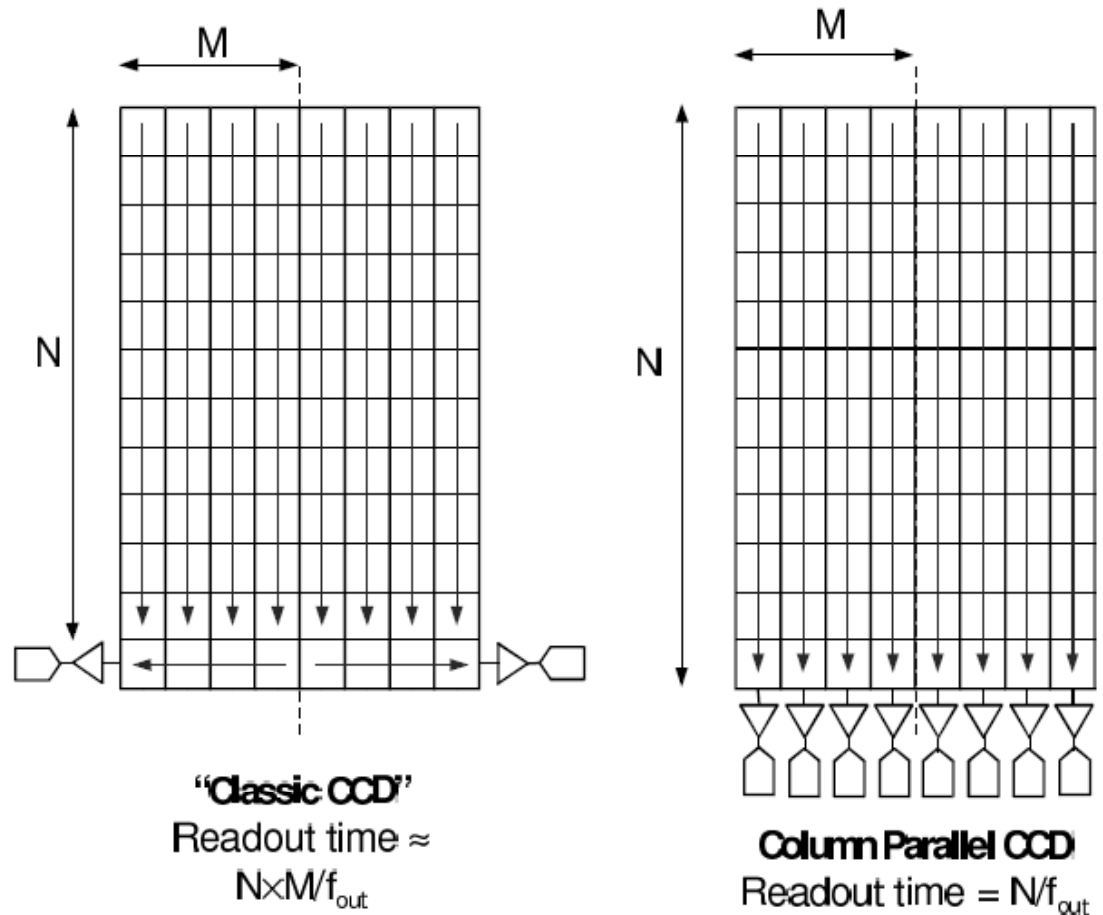
CCD pozwala odczytać macierz milionów pikseli przy użyciu jednego kanału elektroniki.

proste i tanie, ale często zbyt wolne

wrażliwe na zniszczenia radiacyjne

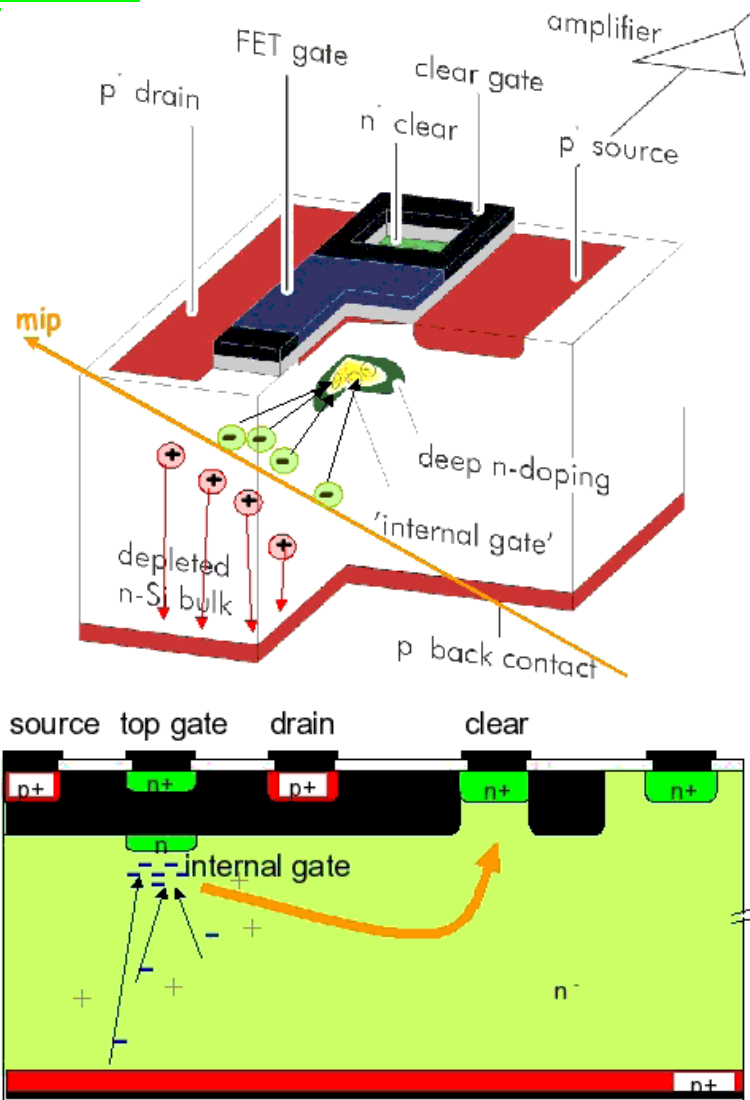
Szybkość odczytu można istotnie zwiększyć czytając każdą kolumnę oddzielnie

Column Parallel CCD (CPCCD)



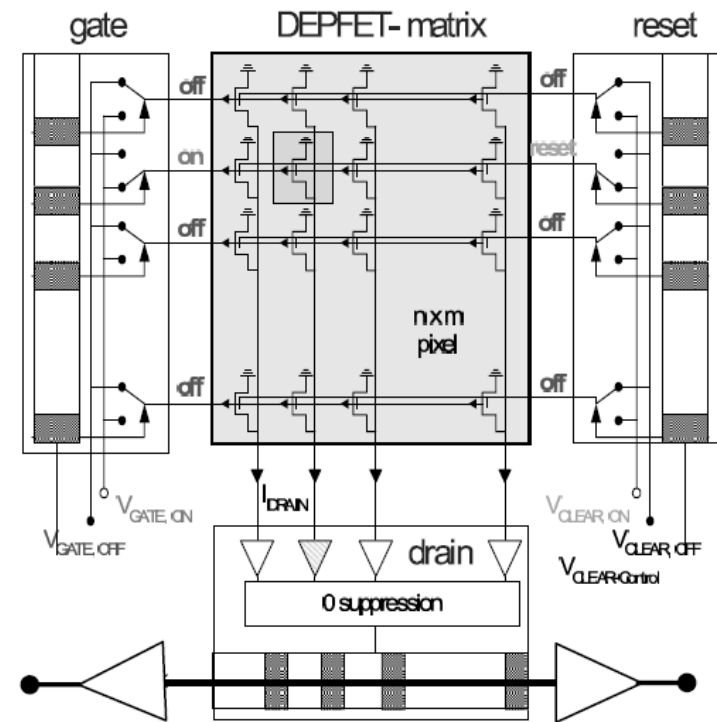
Detektory pixlowe

DEPFET



Ładunek sphywa do bramki tranzystora FET i tam się gromadzi.

Każda kolumna ma swój wzmacniacz, wybór rzędu przez przyłożenie napięcia.



Detektory pixlowe

MAPS

warstwa aktywna bez pola
(tzw. warstwa epitaksjalna)

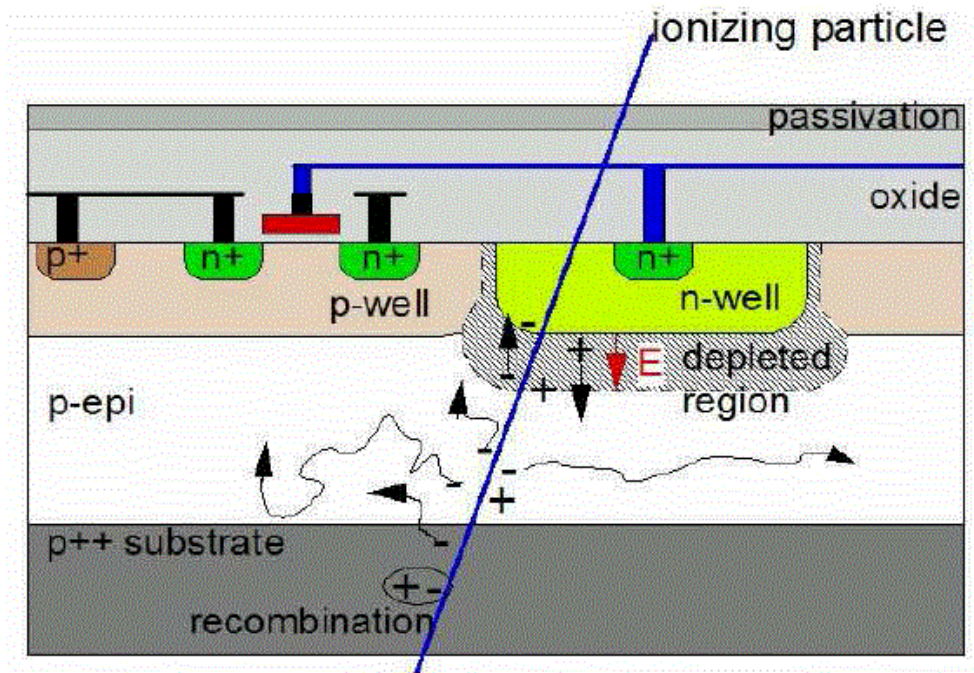
ładunki powstające w wyniku jonizacji
rozpływają się isotropowo

zbierane są na złączach rozłożonych na
powierzchni

technologia CMOS umożliwia integrację
elektroniki odczytowej na powierzchni
sensora

technologia przemysłowa

⇒ stosunkowo tania



Detektory pixlowe

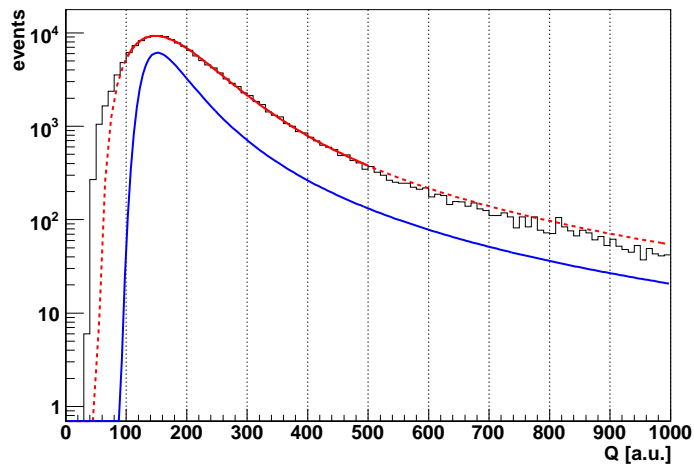
MAPS

Wyniki testów detektora MAPS, rozmiar pixla $30 \times 30 \mu m$

Rozkład mierzonego sygnału.

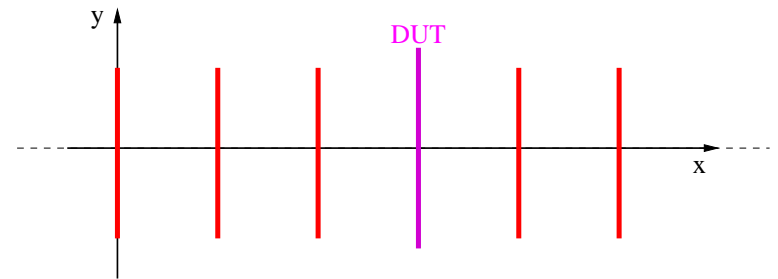
Dobrze opisany przez konwolucję rozkładu Landaua z rozdzielczością aparaturową

DESY 6 GeV 14 μm

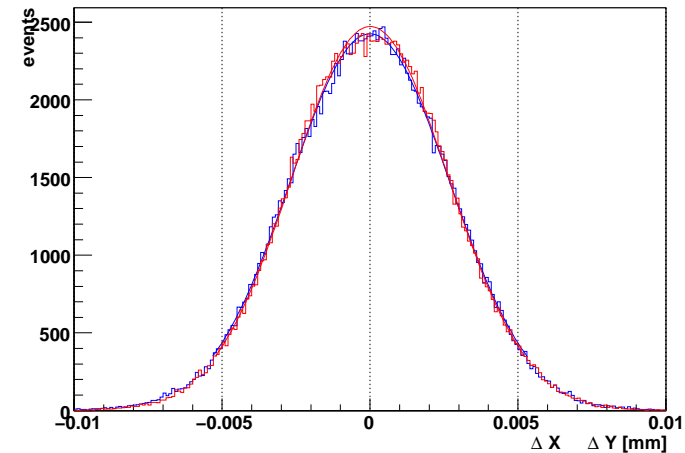


Maksimum sygnału $\sim 15 - 20 \times$ szum
 \Rightarrow wysoka efektywność detekcji ($> 99\%$)

Dokładność wyznaczenia pozycji



DESY 6 GeV



$\sigma \approx 3 \mu m$ ($\approx \frac{1}{10}$ piksla !)

Detektory pixlowe

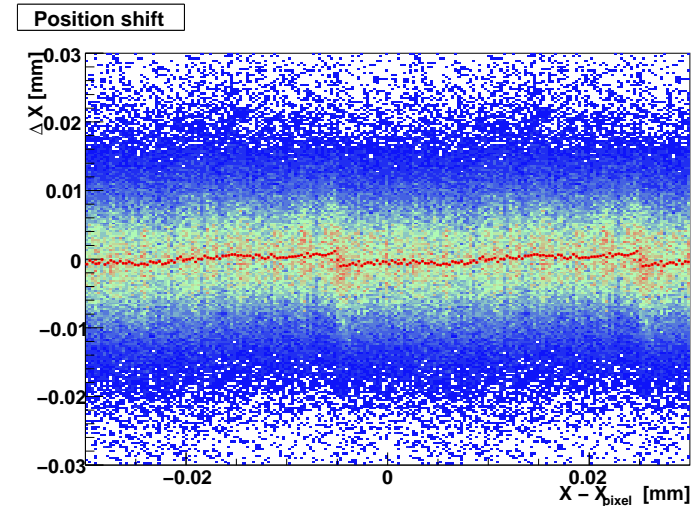
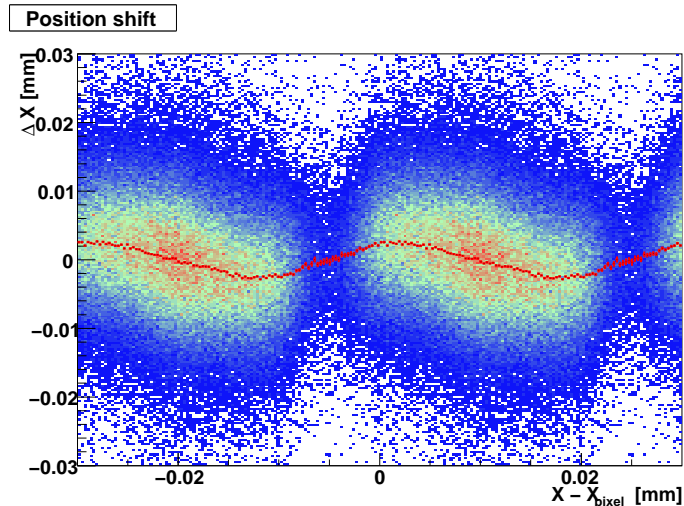
MAPS

Wyniki testów detektora MAPS, rozmiar pixla $30 \times 30 \mu m$

Błąd pozycji vs pozycja na pikslu.

Pozycja wyznaczana metodą **środka ciężkości** (CoG)

Pozycja CoG po zastosowaniu poprawki (tzw. funkcja Eta)



Pojedyncza cząstka “zapala” średnio 4 pixle \Rightarrow systematyczny błąd pozycji zależy od punktu przejścia cząstki

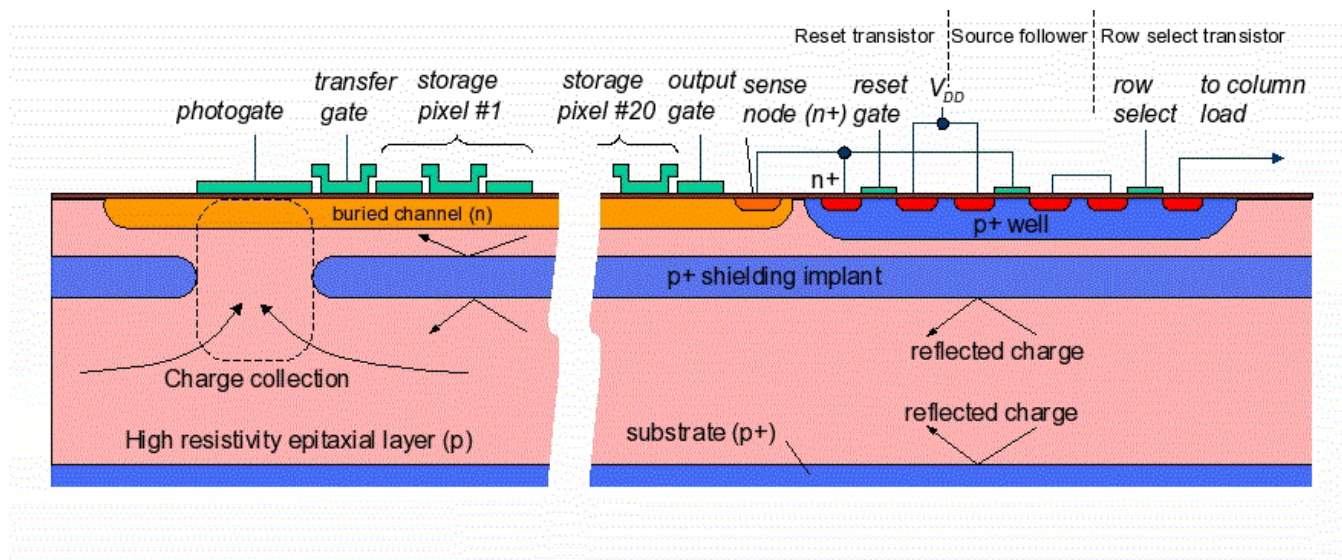
wyznaczana z danych poprawka prawie całkowicie eliminuje efekty systematyczne

Detektory piklowe

ISIS In-situ Storage Image Sensor

Wąskim gardłem piksłowych detektorów krzemowych jest odczyt - konieczność transferu ogromnych ilości danych.

W przypadku detektorów dla ILC rozwiązaniem może być sensor z pamięcią umożliwiającą buforowanie pomiarów:

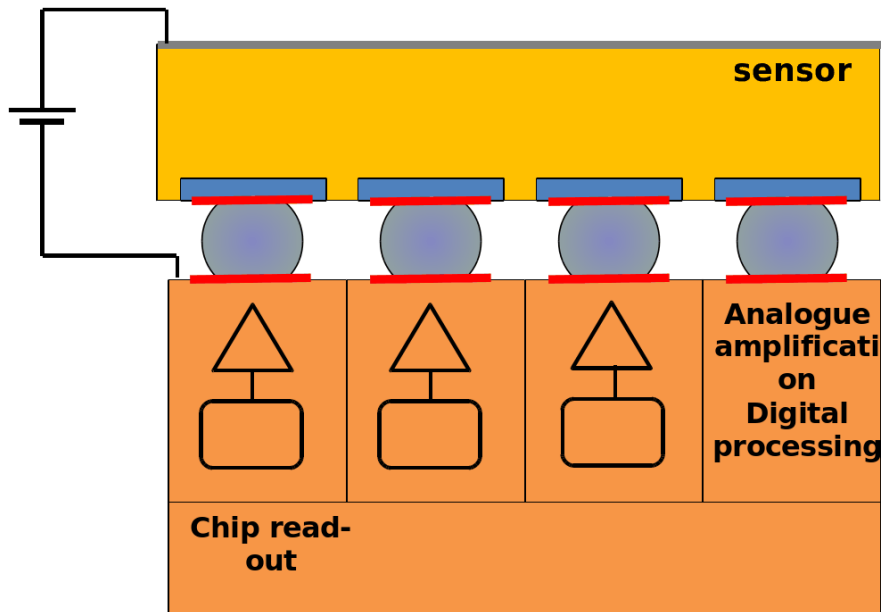


Wiązka ILC: ~ 3000 przecięć co ~ 400 ns, następnie ~ 200 ms przerwy

Detektory krzemowe

Timepix

Nowy sposób odczytu



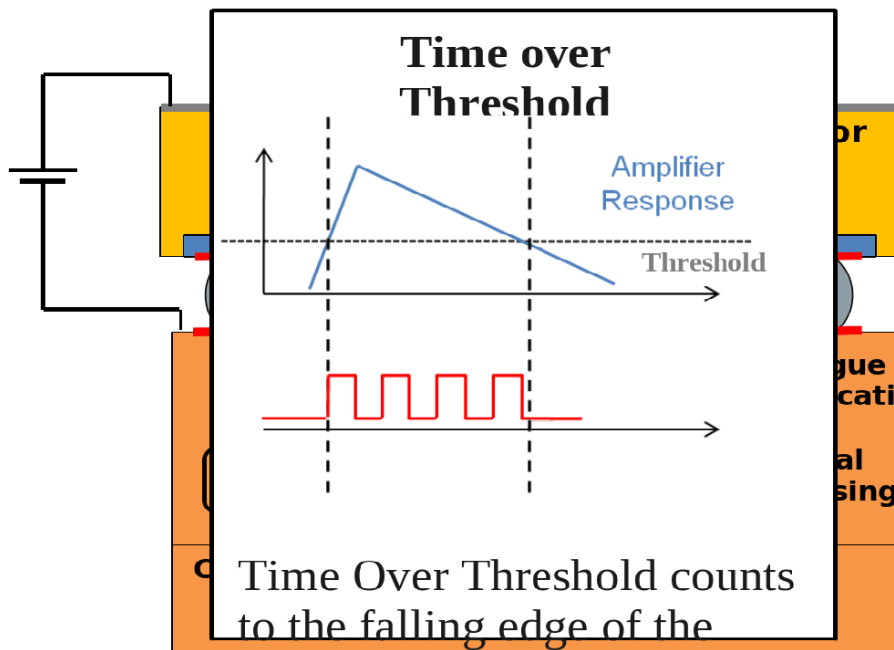
W standardowym detektorze odczytujemy ładunek zebrany w poszczególnych pikselach w zadanym (np. przez zegar wiązki) przedziale czasu.

Ale nie jest to jedyny sposób.

Detektory krzemowe

Timepix

Nowy sposób odczytu



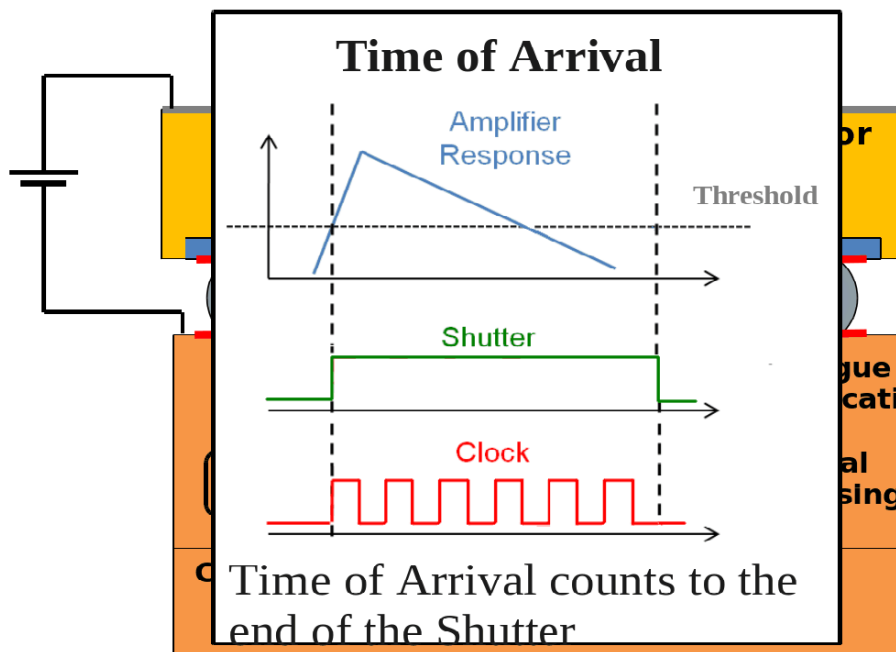
Ładunek możemy też zrekonstruować mierząc przez jaki **czas** poziom sygnału był **powyżej progu!**

Pomiar czasu: zliczanie impulsów zegara

Detektory krzemowe

Timepix

Nowy sposób odczytu



Ładunek możemy też zrekonstruować mierząc przez jaki **czas** poziom sygnału był **powyżej progu!**

Pomiar czasu: zliczanie impulsów zegara

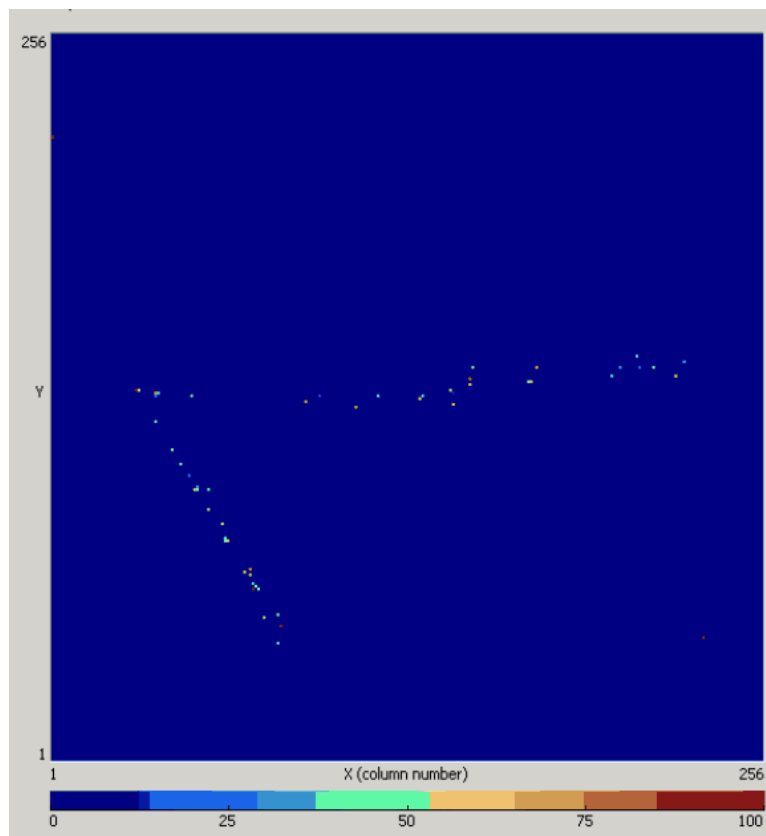
Możemy też dodać **pomiar czasu** między **przyjściem sygnału**, a impulsem odniesienia (**bramka/zegar wiązki**).

Sensory tego typu pozwalają na jednoczesną rekonstrukcję **sygnału** i **czasu** przejścia cząstki.

Detektory krzemowe

Timepix

Nowy sposób odczytu



Ładunek możemy też zrekonstruować mierząc przez jaki **czas** poziom sygnału był **powyżej progu!**

Pomiar czasu: zliczanie impulsów zegara

Możemy też dodać **pomiar czasu** między **przyjściem sygnału**, a impulsem odniesienia (**bramka/zegar wiązki**).

Sensory tego typu pozwalają na jednoczesną rekonstrukcję **sygnału** i **czasu** przejścia cząstki.

Jednym z możliwych zastosowań jest odczyt komórek TPC.

Detektory krzemowe

3D

Nowa koncepcja

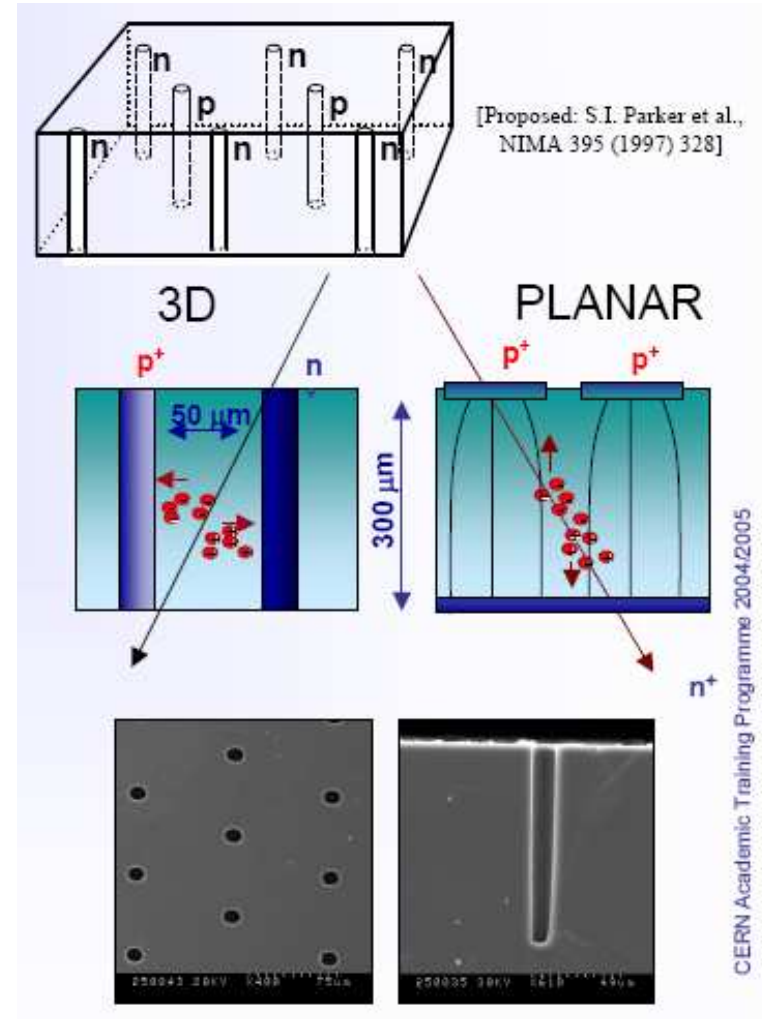
Obszar zubożony wytwarzany pomiędzy domieszkowanymi "kolumnami" prostopadłymi do powierzchni sensora.

- ⇒ krótsza droga/czas dryfu
- ⇒ mniejsze napięcie zasilania
- ⇒ większa odporność na zniszczenia radiacyjne

Detektory pikslowe jak i paskowe (!)

Niestety skomplikowane (⇒ drogie)

Ale obiecujący kierunek rozwoju...



Detektory krzemowe

3D'

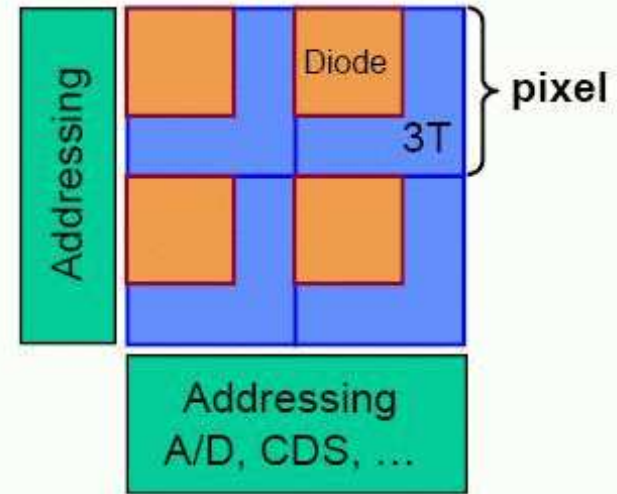
Detektory typu HAPS (Hybrid Active Pixel Sensor): skomplikowane i drogie.

W innych układach zawsze tracimy część powierzchni na elektronikę przetwarzania i odczytu sygnału.

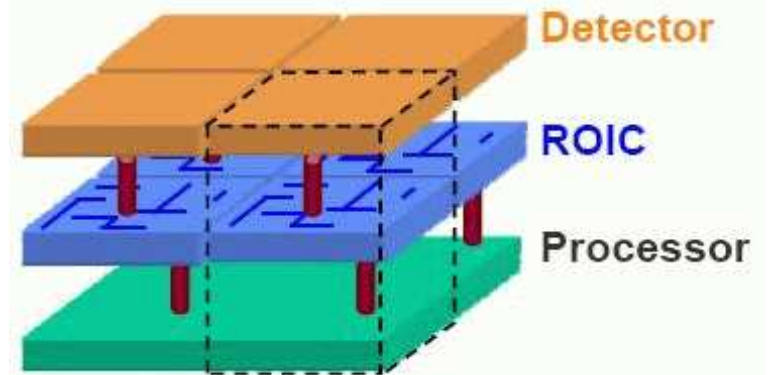
Pojawiają się jednak nowe technologie umożliwiające tworzenie trójwymiarowych struktur w krzemie.

Mogą być zastosowane do tworzenia samej elektroniki, ale także do integracji elektroniki z sensorem na etapie produkcji.

Conventional MAPS



3-D Pixel

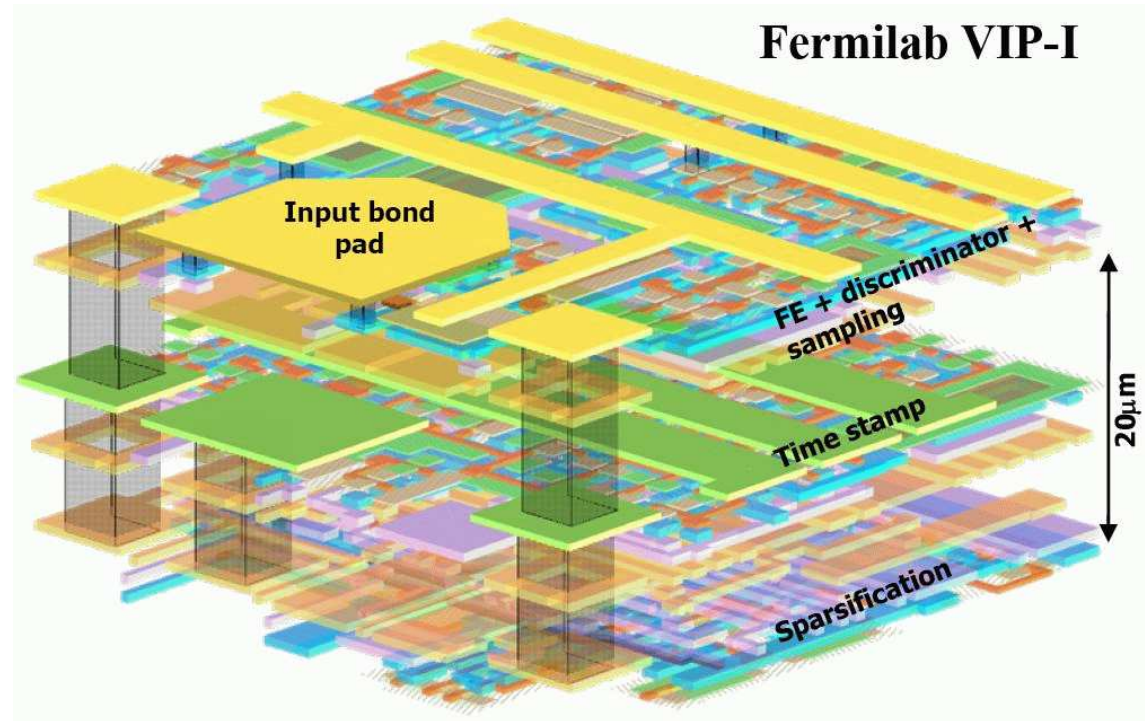
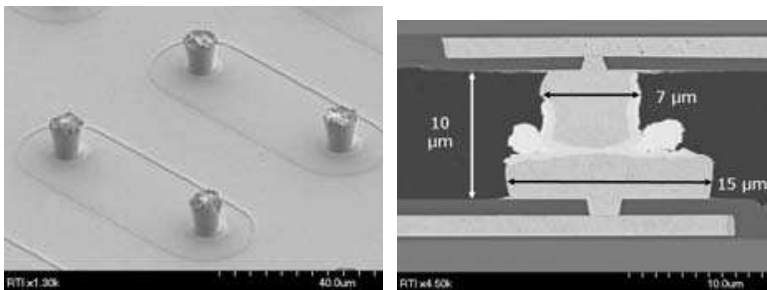
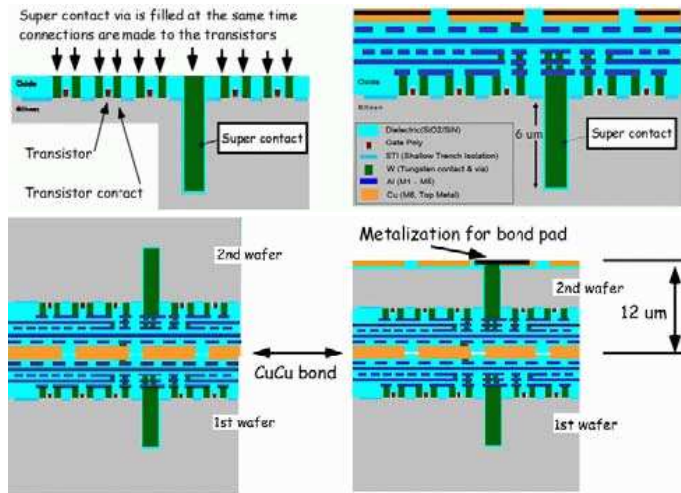


Detektory krzemowe

3D'

Rozważane i testowane są różne technologie łączenia warstw.

Projekt 3D procesora odczytu dla detektora pikselowego (FNAL)



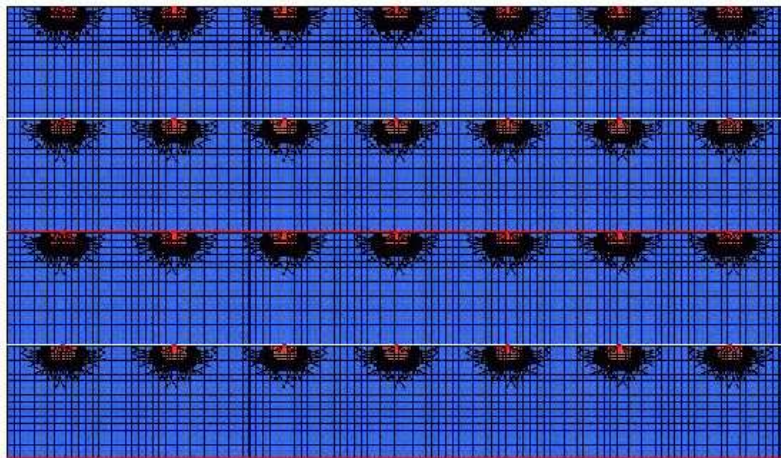
Detektory krzemowe

3D''

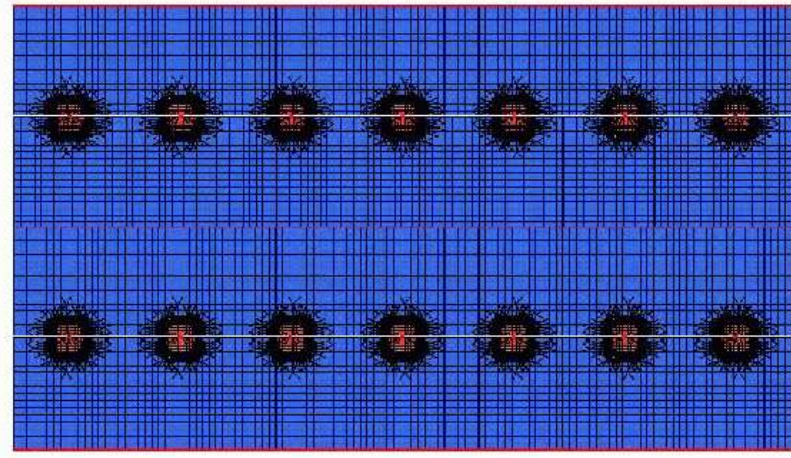
Rekonstrukcja torów cząstek znacząco się poprawia, gdy zamiast jednej warstwy detektora zastosujemy kilka cieńszych zintegrowanych warstw.

Oprócz pozycji możemy rekonstruować także kierunek cząstki.

Integracja na poziomie produkcji układu - brak niepewności związanych ze względnym pozycjonowaniem.



(a)



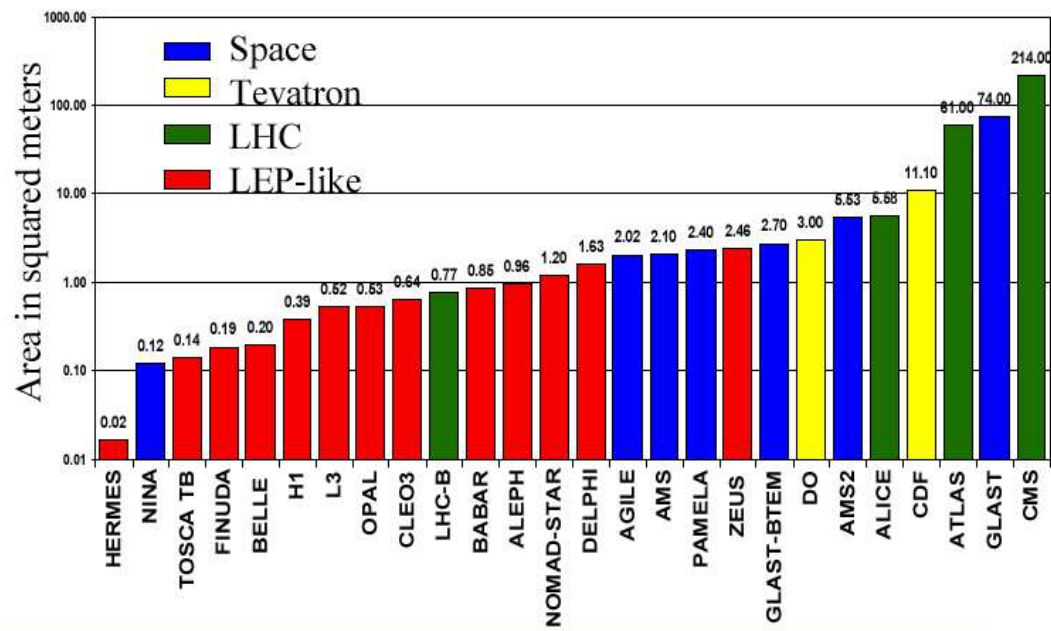
(b)

Detektory krzemowe

Podsumowanie



Experiments using silicon strip detectors



E. do Couto e Silva – SLAC/Stanford University

Vertex 2000, Sept 10-15, National Lakeshore, MI, USA

W najbliższych latach bez wątpienia technologie detektorów krzemowych będą dalej intensywnie rozwijane... (dla SLHC, ILC/CLIC i innych)