

Detektory dla obszaru małych katów w zderzaczach liniowych e^+e^- Detektor LumiCal przy ILC

Marek Idzik AGH-UST Kraków

Warszawa 26/02/2010

FCAL Collaboration

Partnerzy z wielu krajów

- **AGH-UST, Krakow**
- **DESY, Germany**
- **IFJPAN, Krakow**
- **JINR, Dubna**
- **LAL, Orsay**
- **NCP & HEP, Minsk**
- **Royal Holloway University, London**
- **Tel Aviv University**
- **University of Colorado, Boulder**
- **VINCA, Belgrade**
- **Yale University, New Haven**
- **Tohoku University, Japan**

- **Cooperation with SLAC**

Prace na AGH finansowane z:

- EUDET FP VI do końca 2010
- MCPAD FP VII do końca 2012

Złożone wnioski:

- AIDA FP VII
- FITAL sieci naukowe :(

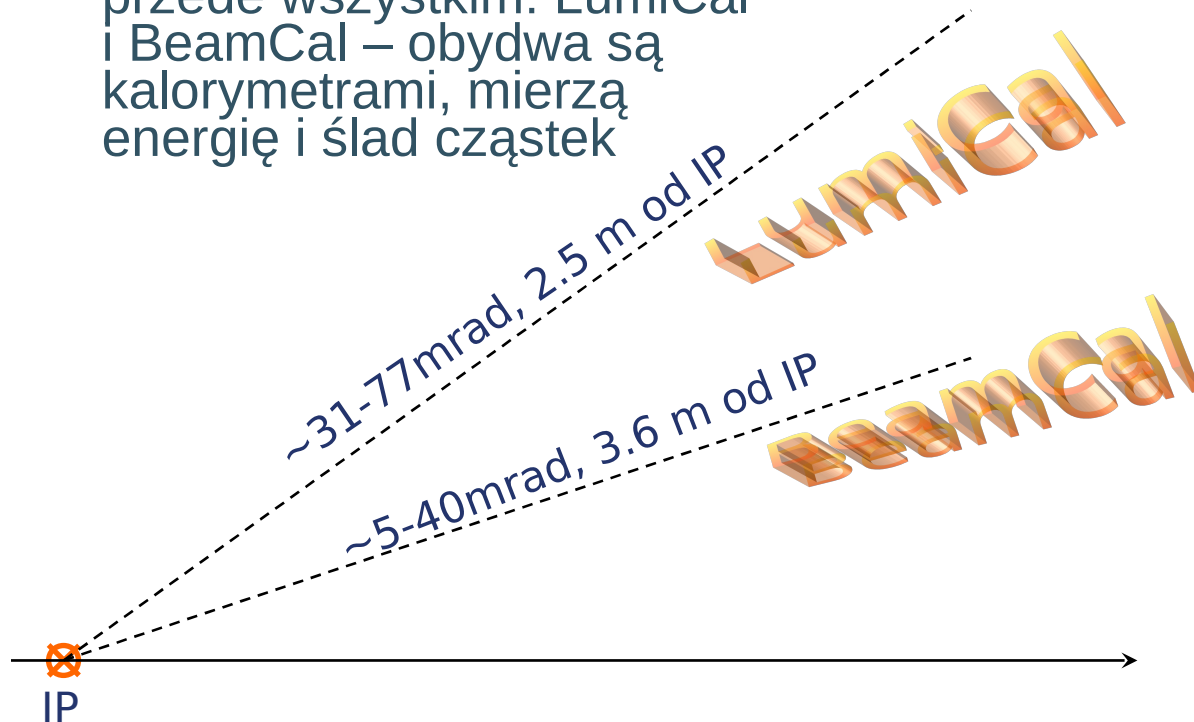
Plan

- ❑ LumiCal i BeamCal: dwa główne detektory w obszarze małych kątów
- ❑ Sensory dla obu detektorów
- ❑ System odczytu detektora w ogólności, a dla LumiCal-a w szczególności
- ❑ Elektronika odczytu w ogóle i konkretnie dla LumiCal-a
- ❑ Podsumowanie I uwagi o CLIC-u

Zadania detektorów FCAL

- Kolaboracja FCAL rozwija tzw. Very Forward Detectors dla ILC, czyli przede wszystkim: LumiCal i BeamCal – obydwa są kalorymetrami, mierzą energię i ślad cząstek

- Precyzyjny pomiar całkowitej światłości ($\Delta L/L \sim 10^{-4}$)

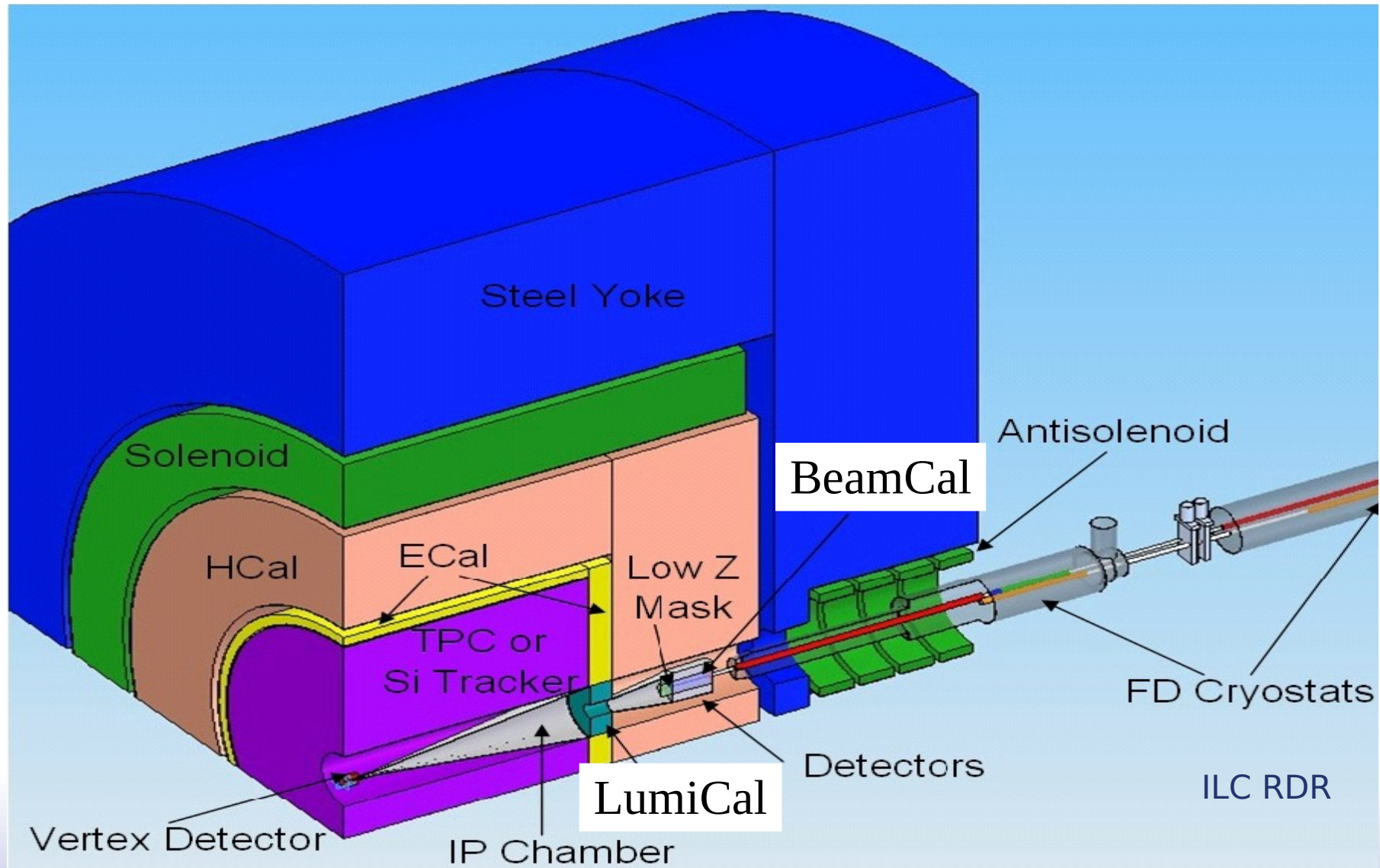


- Diagnostyka wiązki na podstawie par z beamstrahlung

Wyzwania:

Wysoka precyzja, duża okupacja, obciążenia radiacyjne, szybki odczyt
duży zakres sygnałów !

Detektory FCAL

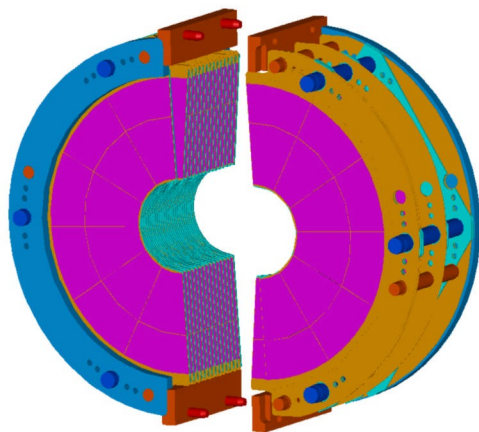




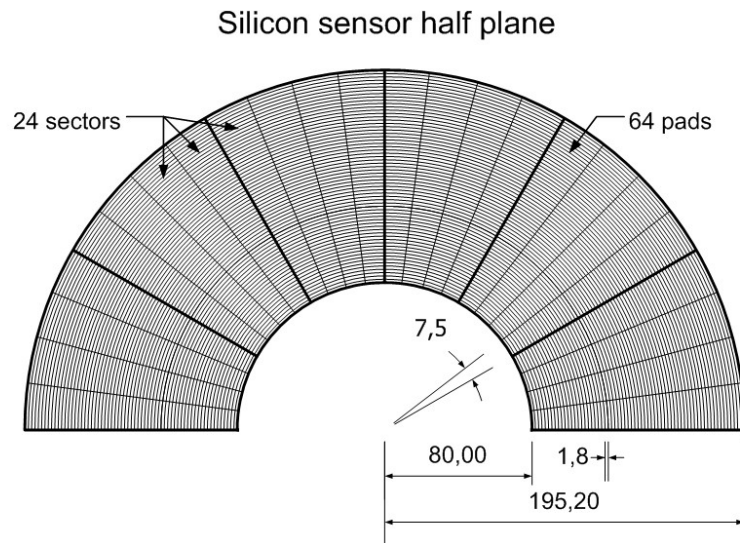
AGH

Detektor LumiCal

Dwa kalorymetry kanapkowe
Si/W
Każdy zbudowany z 2
półcylindrów, składających się z
30 warstw



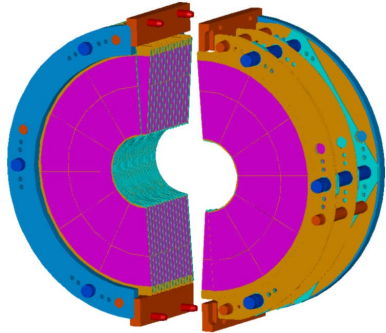
Każda warstwa grubości X_0
składa się z absorbera
(wolframu grubości 0.35cm)
I sensora (Si o grubości
320 μ m)



Każda pół-warstwa sensora składa się z 24 sektorów azymutalnych, z których każdy ma 64 radialne pady



Detektor LumiCal



zlx

LumiCal praktycznie w całości budowany jest przez AGH+IFJPAN. To chyba jedyny tak konkretny wkład aparaturowy polskich grup dla ILC

- LumiCal \Leftrightarrow 2 x 30 warstw sensorów Si
- Warstwa \Leftrightarrow 48 azymutalnych (7.5°) sektorów
- Sektor \Leftrightarrow $R_{\text{in-out}} = 8\text{-}19.5$ cm, zbudowany z 64 radialnych padów
- Oszacowanie ilości kanałów $\Leftrightarrow 2 \cdot 30 \cdot 48 \cdot 64 = 184320$

Jak odczytać informacje przy zadanych ograniczeniach przestrzennych i poboru mocy ?, jak zapewnić wymaganą precyzję mechaniczną ?

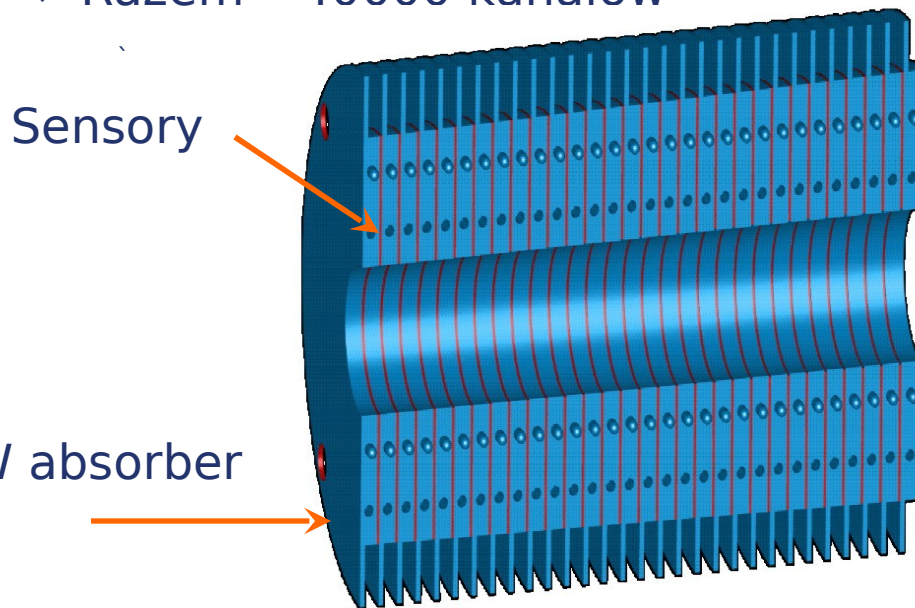


AGH

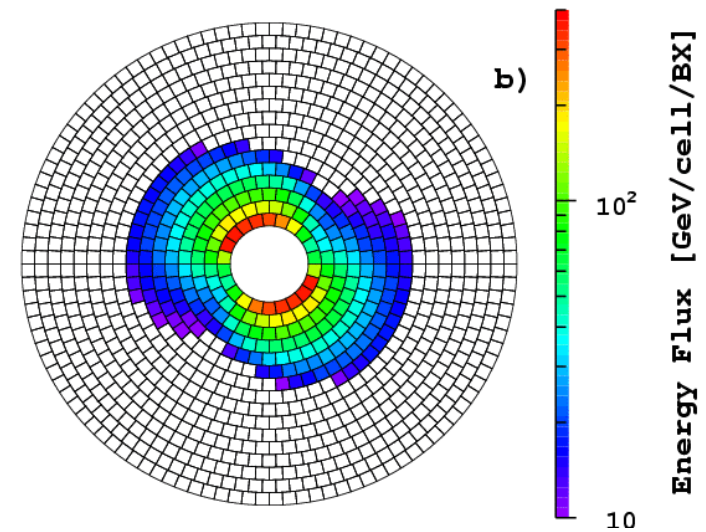
Detektor BeamCal

➤ Podobnie jak LumiCal kalorymetr EM o strukturze kanapkowej:

- ❖ 30 warstw grubości $1 X_0$
- ❖ 3.5mm W i 0.3mm sensor
- ❖ Promień Molière-a $R_M \approx 1\text{cm}$
- ❖ Segmentacja $0.5 - 0.8 \times R_M$
- ❖ Razem ~ 40000 kanałów



Pojedyncza warstwa detektora

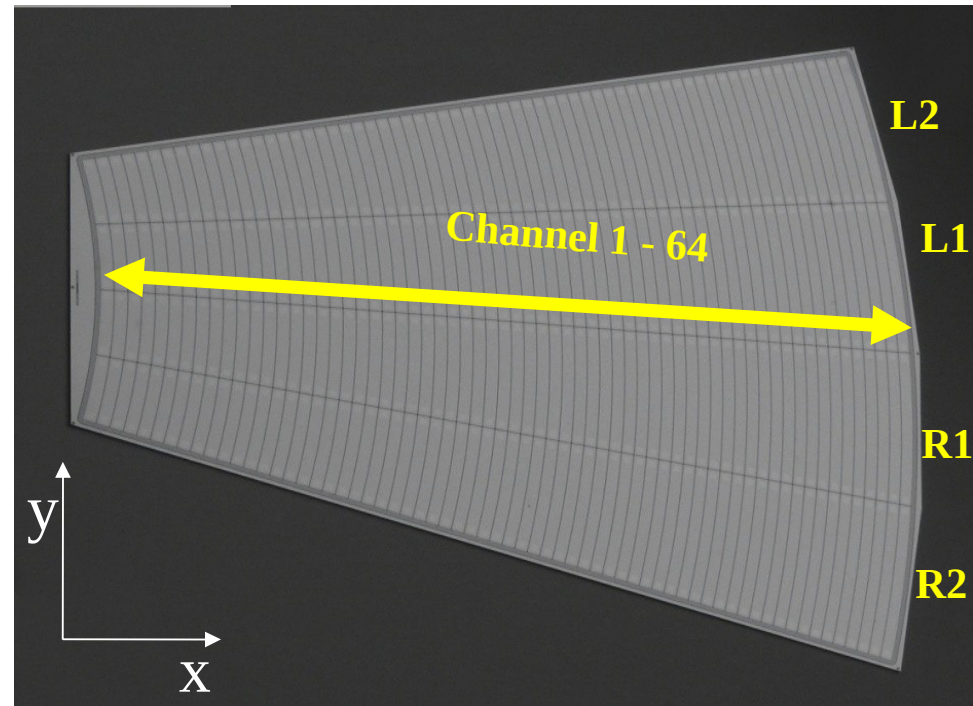


Sensory w BeamCal-u narażone będą na ekstremalnie wysokie obciążenia radiacyjne !

Prototypy Sensorów dla LumiCal-a

- Sensory Hamamatsu (30° ↔ 4 sektory)
- Standardowy krzem
 - Prąd upływu < 10 nA/cm² @ 200 V
 - Wysokorezystywny krzem o podłożu typu n, o grubości 320um
 - Pady P+ z metalizacją Al- (sprężone DC)

Hamamatsu
S10938-8380



LumiCal - pomiary sensorów

- ❑ Pomiary C-V oraz I-V wykonane na probstacji
- ❑ Napięcie zubożenia ~50V
- ❑ Prądy upływu ~2nA/pad

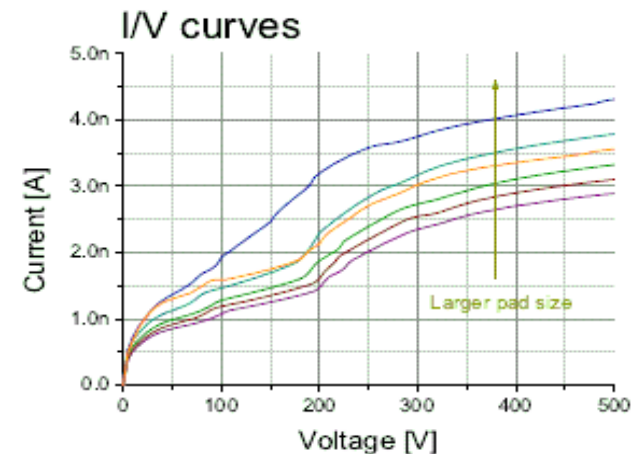
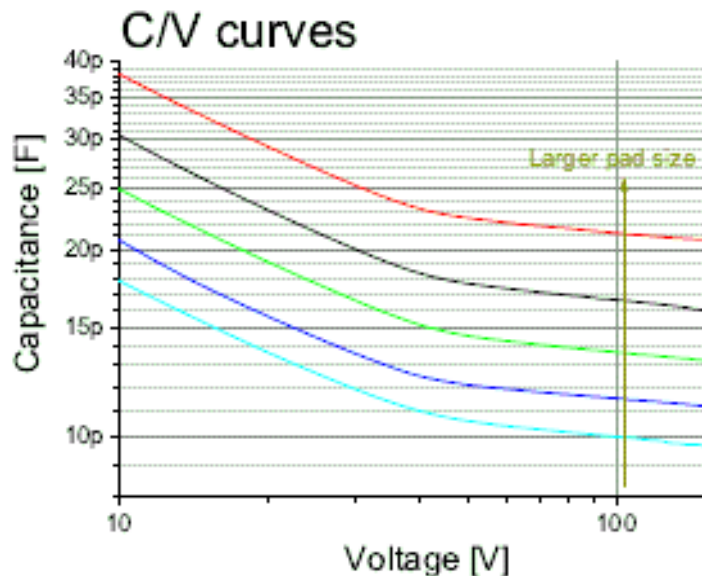
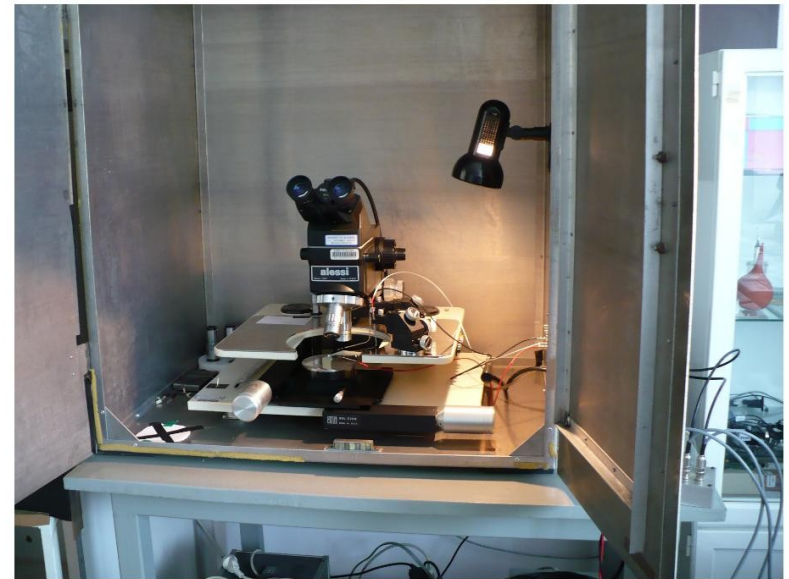
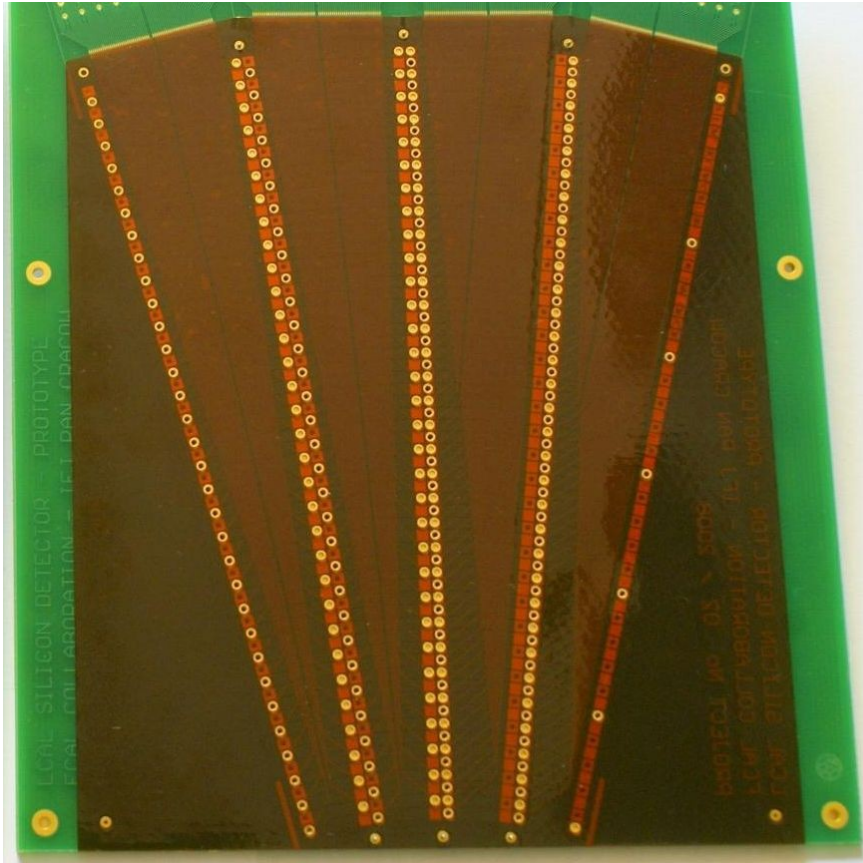
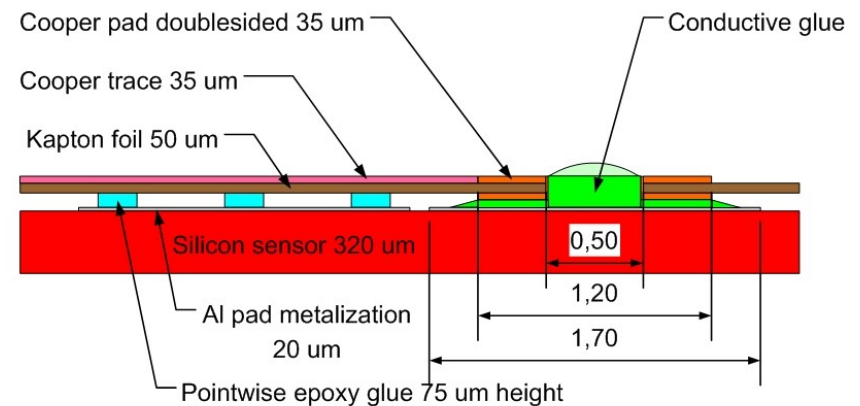


Figure 15: IV curves for different padsizes.

LumiCal - prototypy fanout-u

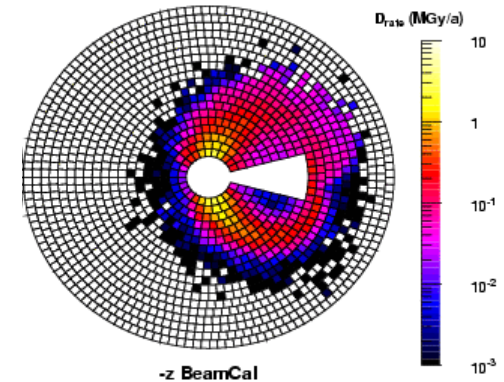


- Fanout kaptonowy 50um grubości
- Po dwa sektory o trochę różnym projekcie
- Mogą być źródłem przesłuchów – pojemności między ścieżkami
- Będą przyklejone do sensorów

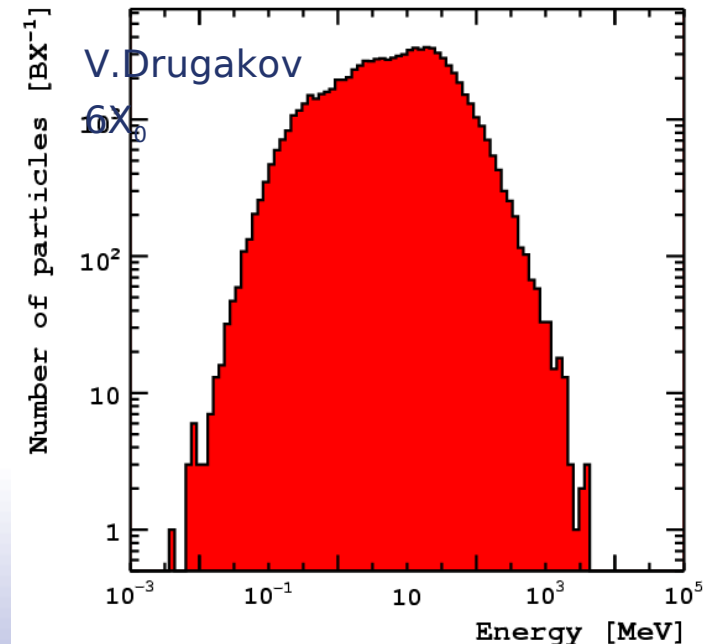


BeamCal: efekty radiacyjnej w sensorach

- Bardzo duże obciążenia radiacyjne w detektorze BeamCal: $\sim 10^5$ par e^+e^- deponujących około 10 TeV na zderzenie (bunch crossing). **To odpowiada dawce wielu MGy na rok (wielu 100 Mrads na rok !).**
- Dlatego rozważa się różne materiały odporne na promieniowanie jak diament, GaAs i inne. Różne gęstości, przerwy energetyczne, ruchliwości etc.



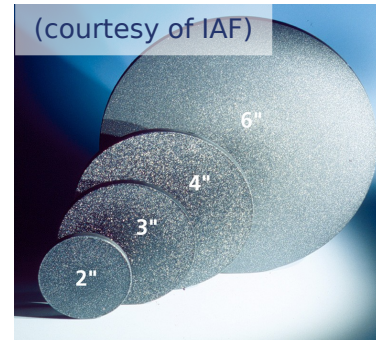
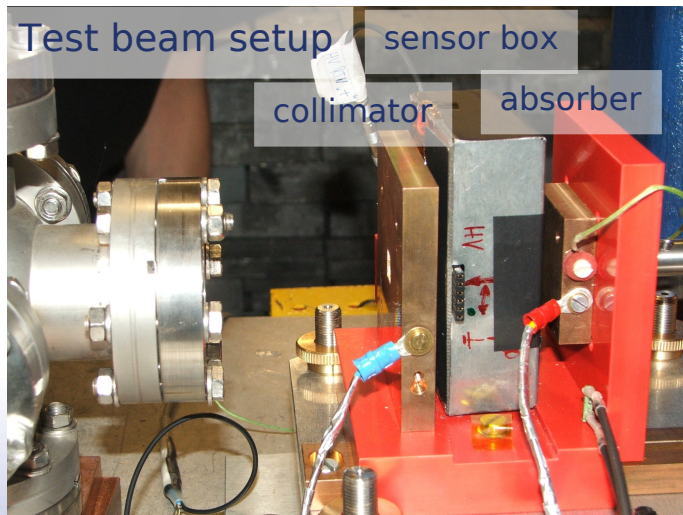
Particle Energy Spectrum



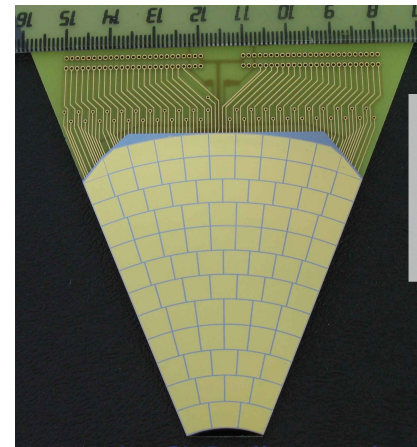
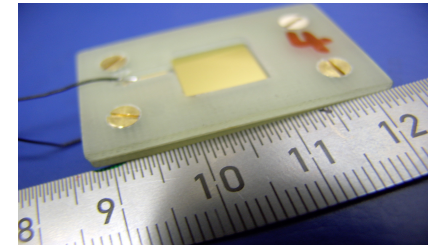
Materiały brane pod uwagę

- pCVD diament:
- sCVD diament
- GaAs:
- sCVD diamonds:
- Rad-hard Si
- inne...

Próbki napromieniowuje się do wielu MGy, np. na liniowym akceleratorze elektronów w Darmstadt

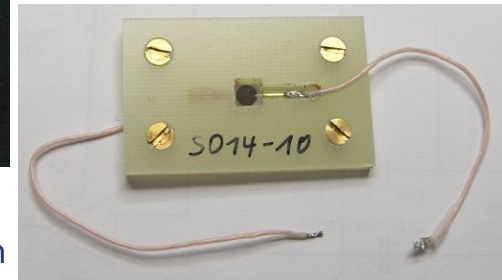


- Two manufacturers:
 - ❖ Element Six™
 - ❖ Fraunhofer Institute (IAF)
- 1 x 1 cm²
- 200-900 μm thick

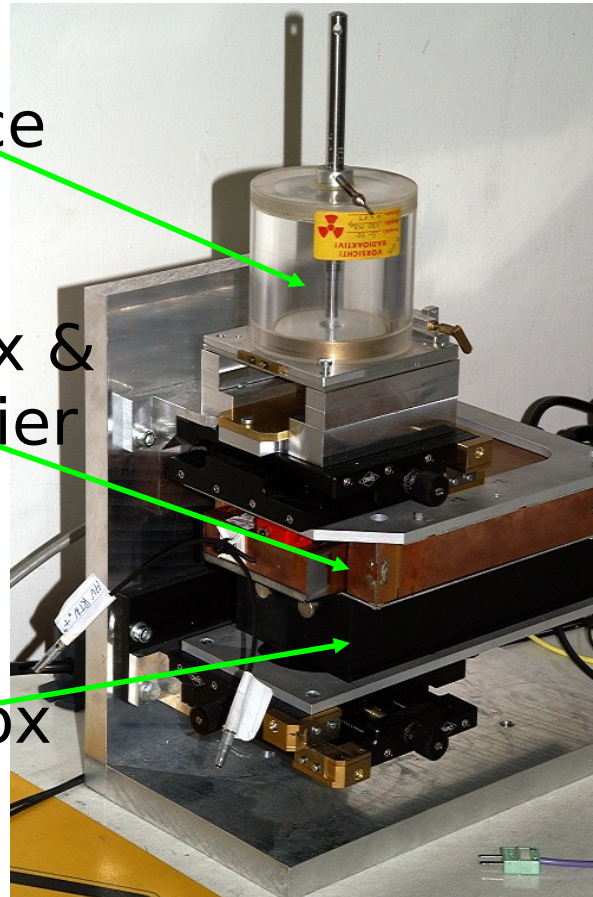


- 500 μm thick detector
- 87 5x5 mm pads
- Mounted with fanout
- Solid state ionization chamber

- sCVD diamond
- area 5x5 mm²,
- thickness 340 μm



Testy w laboratorium

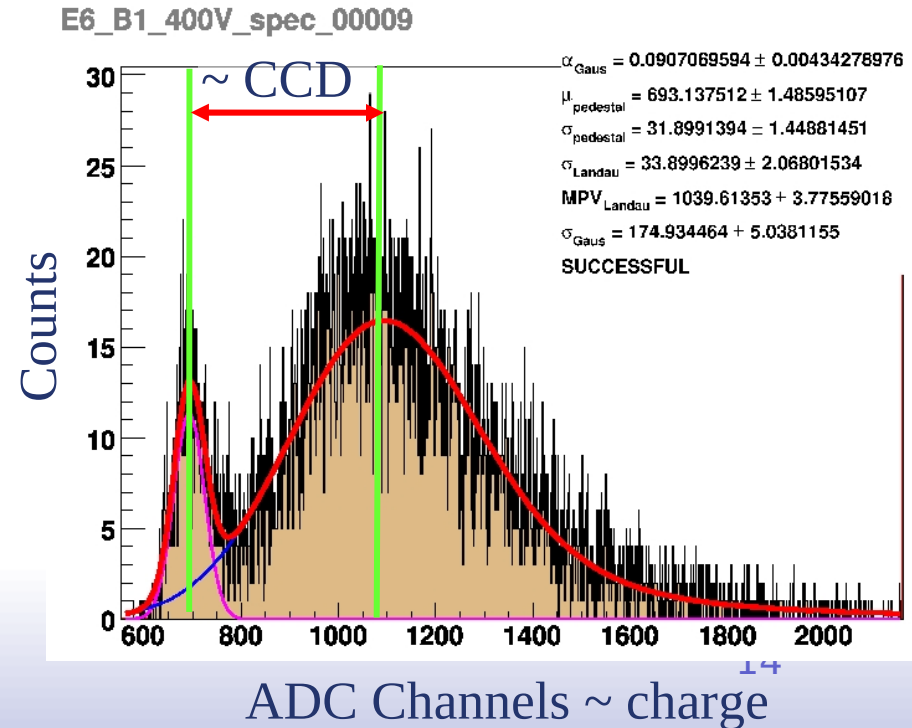


^{90}Sr Source

Sensor box & Preamplifier

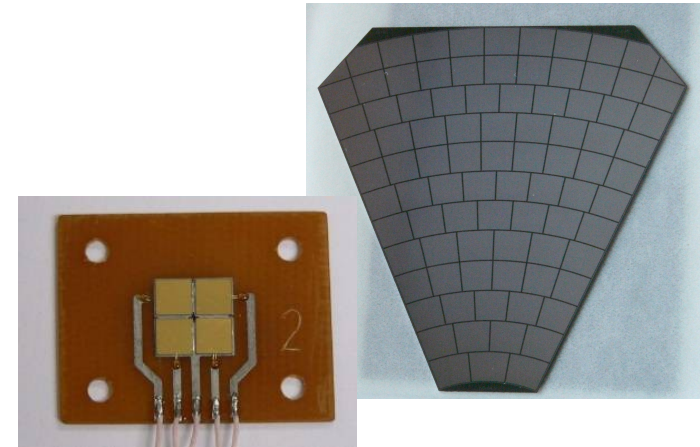
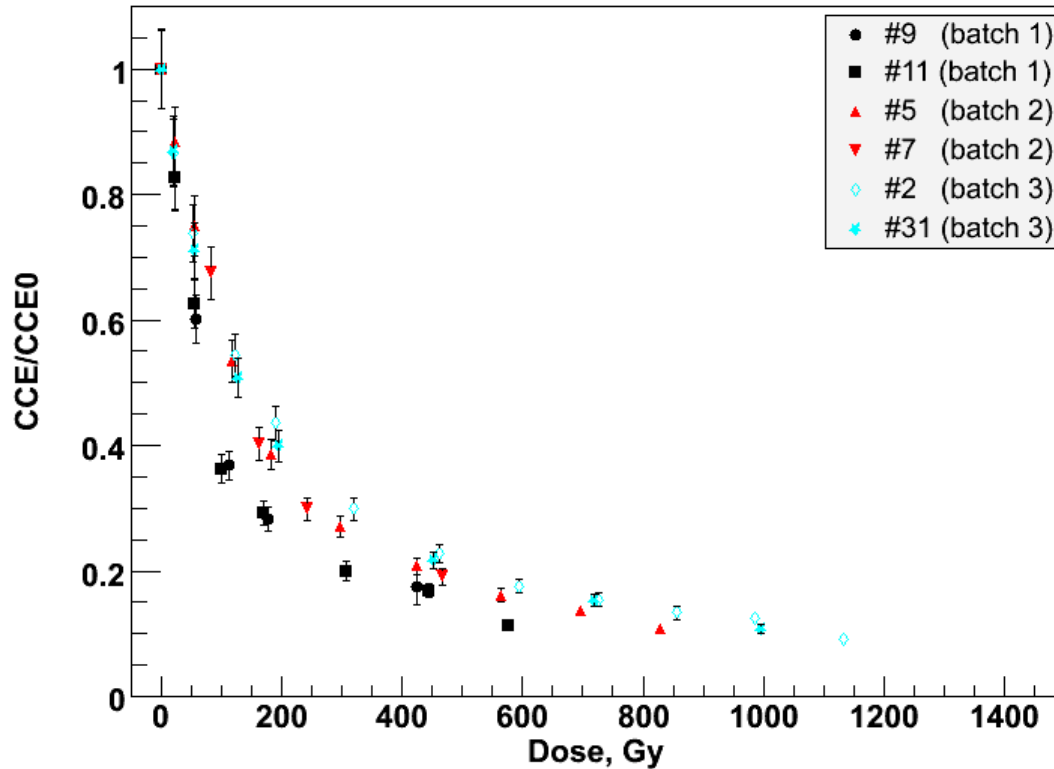
Trigger box

Po napromieniowaniu, oprócz krzywych C-V, I-V mierzy się CCD (charge collection distance) lub CCE (charge collection efficiency) przy przejściu cząstki minimalnie jonizującej.



Pomiary struktur GaAs

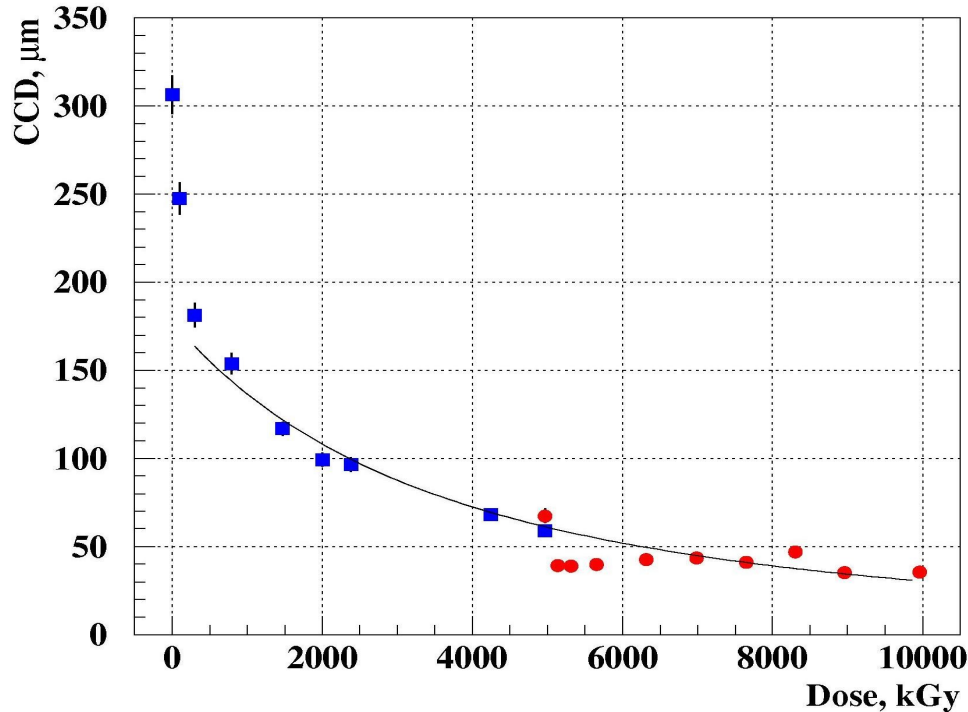
GaAs:Cr CCE vs dose



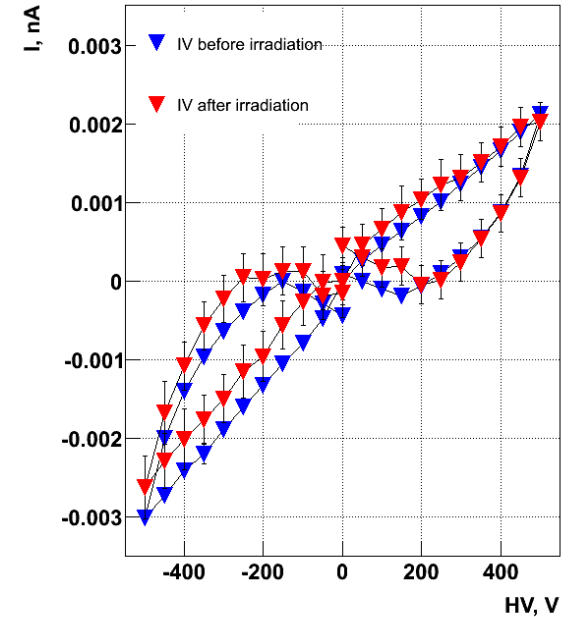
- ❑ Produkowane w Siberian Institute of Physics and Technology, Rosja
- ❑ Osiągalne cenowo
- ❑ Cząstki minimalnie jonizujące widoczne do około 0.6 MGy
- ❑ Duże prądy upływu (~uA)
- ❑ ~4.3 eV/parę e-h

Diament CVD

So14_04 scCVD Diamond Irradiation



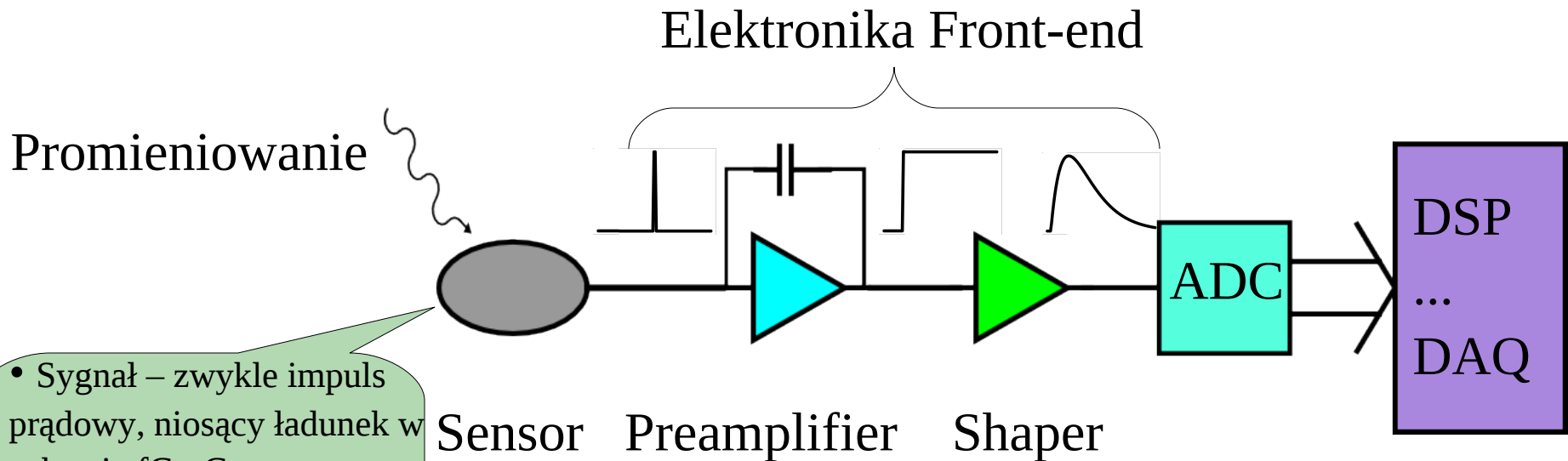
E6_B1



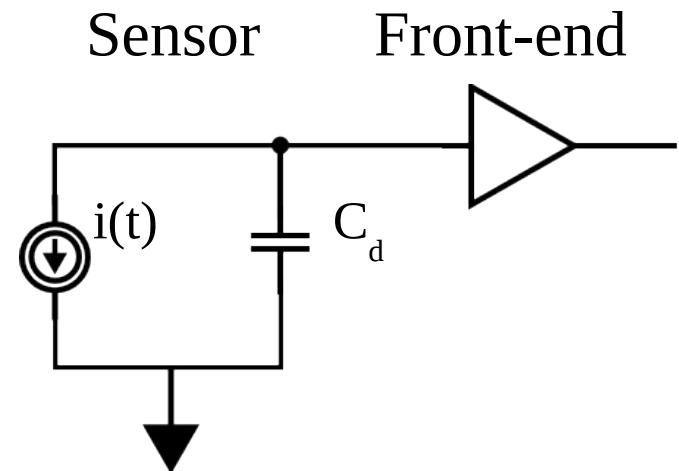
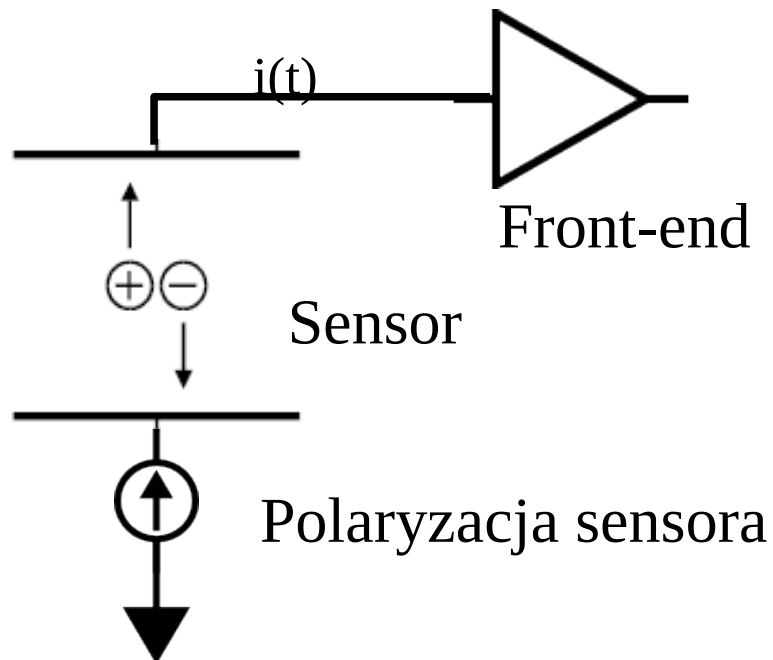
- ❑ Próbki z Element Six oraz Fraunhofer Institute
- ❑ Polikrystaliczny drogi, a monokrystaliczny bardzo drogi
- ❑ Cząstki minimalnie jonizujące widoczne do około 7 MGy
- ❑ Bardzo małe prądy upływu (~pA)
- ❑ ~13eV/parę e-h

System odczytu detektora

- Promieniowanie jonizujące indukuje impuls prądowy na elektrodach sensora
- Preamplifier - całkuje impuls prądowy sensora, dając sygnał proporcjonalny do ładunku zdeponowanego w sensorze (w Si ~ 3.6 eV/ parę elektron-dziura)
- Shaper - filtruje i wzmacnia sygnał by osiągnąć maksymalny stosunek sygnału do szumu (S/N), decyduje o czasie trwania sygnału zgodnie z oczekiwaną częstością zdarzeń
- ADC - konwertuje sygnał do postaci cyfrowej o zadanej rozdzielczości



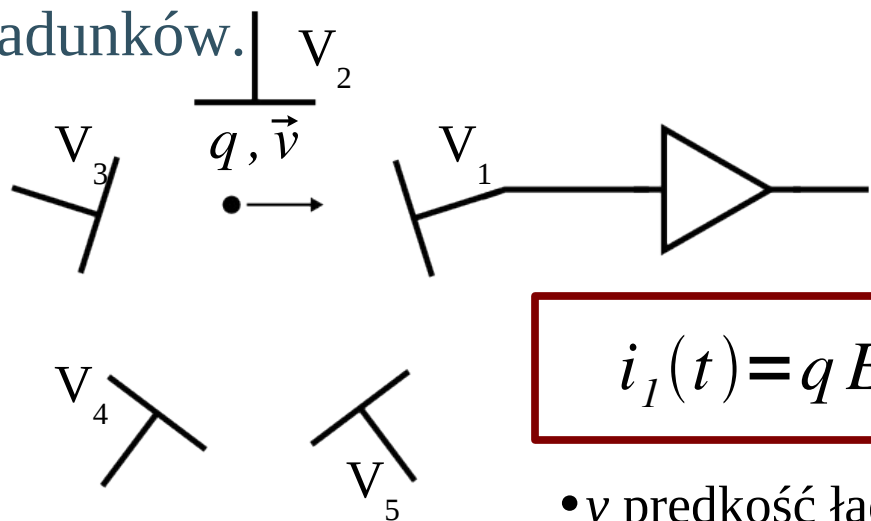
Sensor - schemat zastępczy



- Główne komponenty elektryczne:
- Pojemność sensora
 - Źródło prądu (sygnału i upływu)

Sensor - Sygnał - tw. Ramo

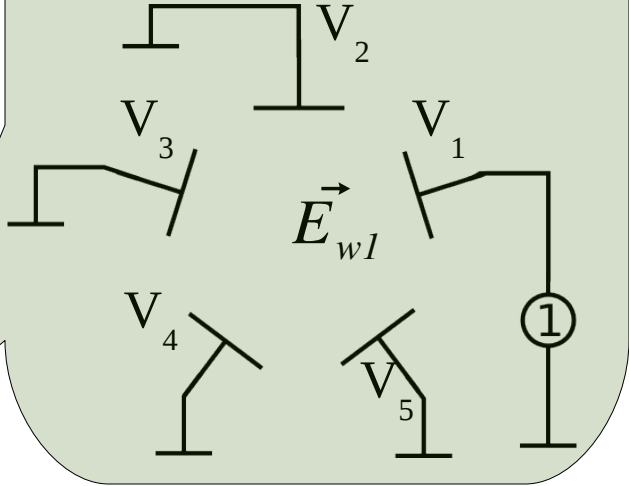
W większości detektorów promieniowania sygnał generowany jest jako impuls prądowy. Twierdzenie Ramo pozwala obliczyć prąd indukowany przez ruch ładunków.



$$i_I(t) = q \vec{E}_{w1} \cdot \vec{v}$$

- v prędkość ładunku
- E_w pole wagowe
- q ładunek

Pole wagowe E_w wylicza się ustawiając 1V na rozważanej elektrodzie, uziemiając wszystkie inne, i usuwając wszelkie ładunki z objętości sensora



Wyindukowany prąd jest proporcjonalny do prędkości ładunku i pola wagowego!

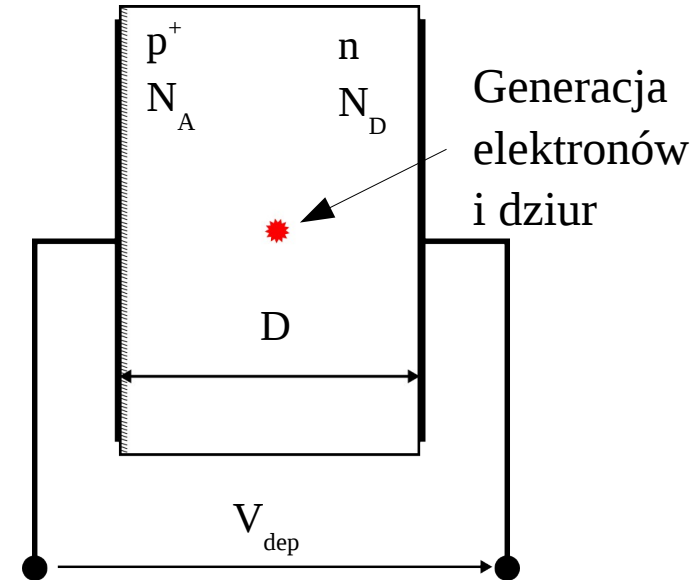
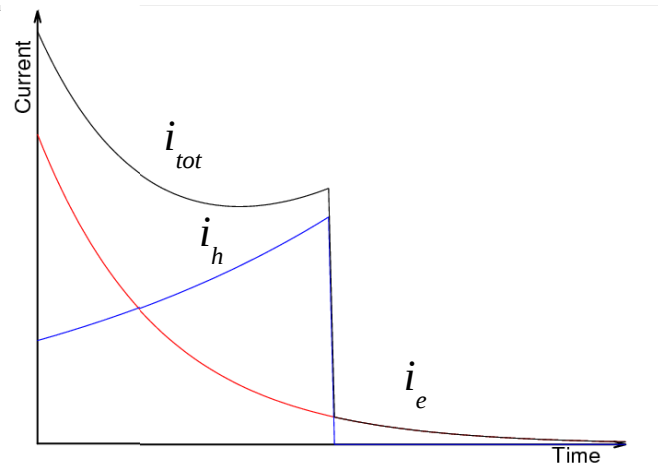
Formowanie sygnału w złączu

$$i(t) = \vec{E}_w \cdot (q_e \vec{v}_e + q_h \vec{v}_h) = E_w (q_e v_e + q_h v_h)$$

$$E_w(x) = \frac{1}{D}$$

$$v_e = -\mu_e E(x), v_h = \mu_h E(x)$$

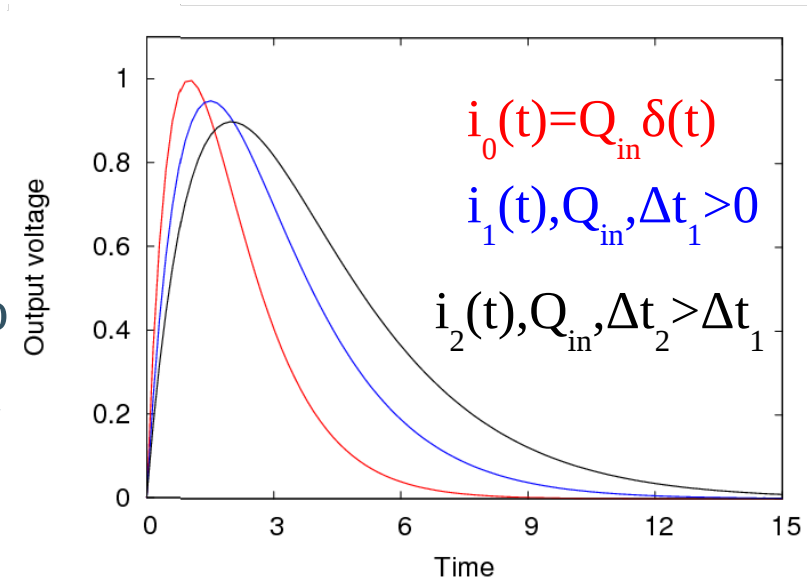
Równanie Poissona dla złącza p-n, etc....



$$i(t) \simeq \frac{2qV_{dep}}{D^3} (D - x_0) \left[\mu_e \exp\left(-\frac{2V_{dep}\mu_e}{D^2} t\right) + \mu_h \exp\left(\frac{2V_{dep}\mu_h}{D^2} t\right) \right]$$

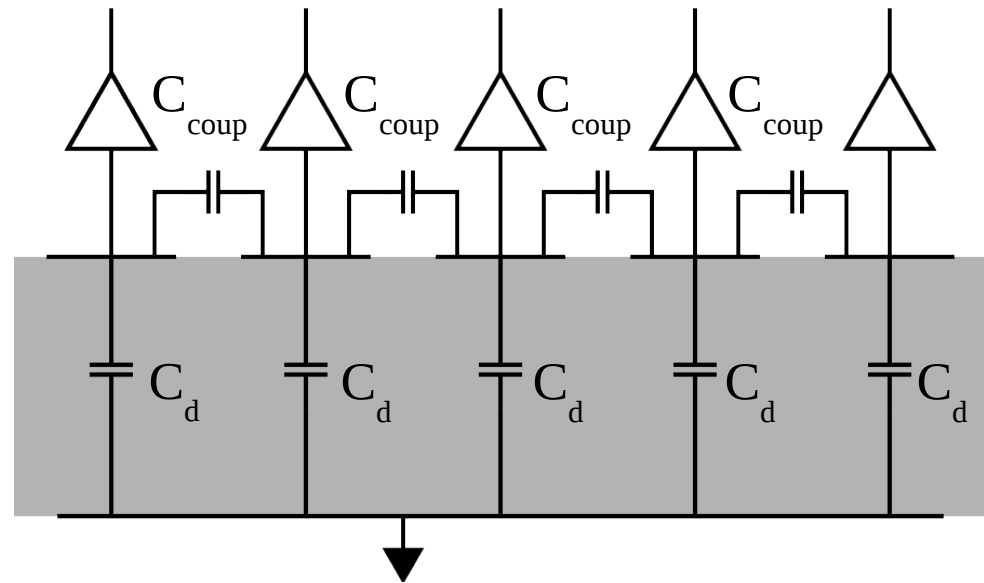
Sygnal - efekt balistyczny

- ❑ W przetwarzaniu sygnału zwykle zakłada się, że wyindukowany w detektorze impuls można aproksymować przez deltę Diraca, tzn. $i(t) = Q_{in} \delta(t)$
- ❑ W praktyce impuls z sensora powinien być zanedbywalnie krótki w stosunku do czasu kształtowania elektroniki front-end
- ❑ Jeśli tak nie jest pojawia się efekt balistyczny, tzn. elektronika front-end daje sygnał rozciągnięty w czasie i o mniejszej amplitudzie
- ❑ Większe napięcie polaryzacji sensora krótszy impuls...



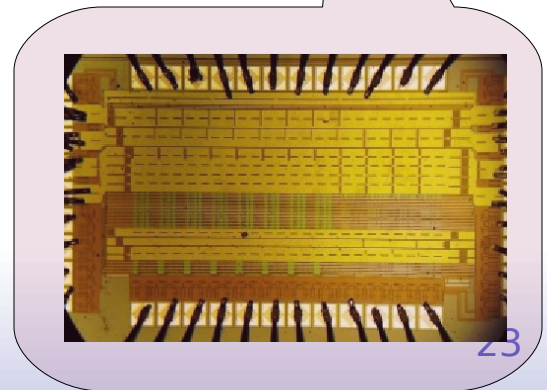
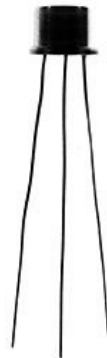
Sensor - schemat zastępczy wielokanałowy

- W sensorach wielokanałowych jak np. mikrostripy czy piksele istnieje pojemność sprzęgająca pomiędzy kanałami
- Zwykle $C_{\text{coup}} \gg C_d$, a często dochodzi jeszcze fanout
- Niska impedancja elektroniki front-end jest decydująca dla efektywnej detekcji sygnału

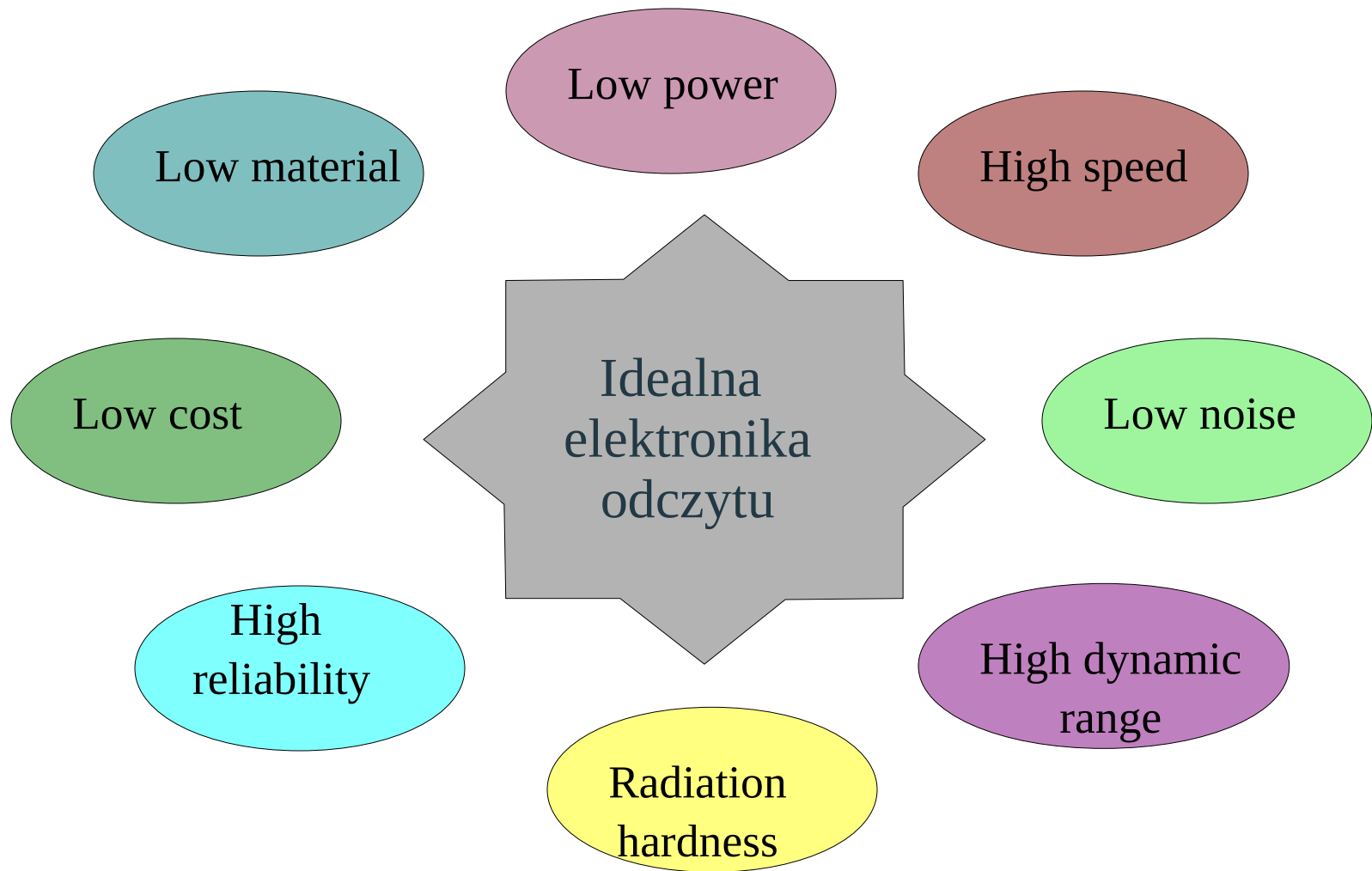


Odczyt wielokanałowy

- ❑ Jedną z najważniejszych cech współczesnych detektorów jest gęsta wielokanałowa architektura (pitch $\sim 100\mu\text{m}$), wymagająca dopasowanej wielokanałowej elektroniki odczytu, a zatem także minimalizacji mocy wydzielanej przez pojedynczy kanał (zniszczenia termiczne).
- ❑ Jest to możliwe tylko dzięki dedykowanym wielokanałowym układom odczytu wykonywanym w coraz gęstszych technologiach CMOS.
- ❑ Nasze (AGH) obecne prototypy wykonane są w procesie $0.35\mu\text{m}$. W badaniach naukowych używa się obecnie procesów aż do $\sim 90\text{nm}$ (koszt!!!), a przemysł (INTEL, XILINX) o połowę mniejszych $\sim 45\text{nm}$.



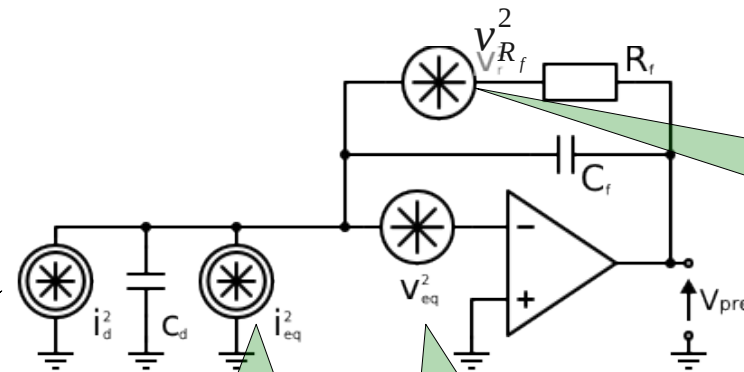
Wymagania systemu odczytu



Szum systemu detekcji

Zakłada się że do szumów kontrybuuje sensora, a z całej elektroniki odczytu tylko przedwzmacniacz (bo po nim sygnał jest już wzmacniony)

Ekwiwalentny schemat szumowy układu sensor-przedwzmacniacz:



Sum śrutowy prądu upływu sensora

Ekwiwalentny wejściowy napięciowy i prądowy (biały i 1/f) szum przedwzmacniacza

Szum termiczny rezystancji sprzężenia

Szum wyrażamy przez jego gęstość widmową mocy

$$v^2 \equiv S(f) = \frac{d\langle v^2 \rangle}{25 df}$$

Szum - główne składniki

Szum termiczny – fluktuacje prędkości

$$S(f) = \frac{d\langle v^2 \rangle}{df} = 4kTR$$

Szum śrutowy – fluktuacje ilości nośników

$$S(f) = \frac{d\langle i^2 \rangle}{df} = 2qI$$

Szum 1/f (flicker) – fluktuacje ilości nośników, pułapki

$$S(f) = \frac{d\langle v^2 \rangle}{df} = \frac{K_f}{f}$$

Stosunek sygnału do szumu

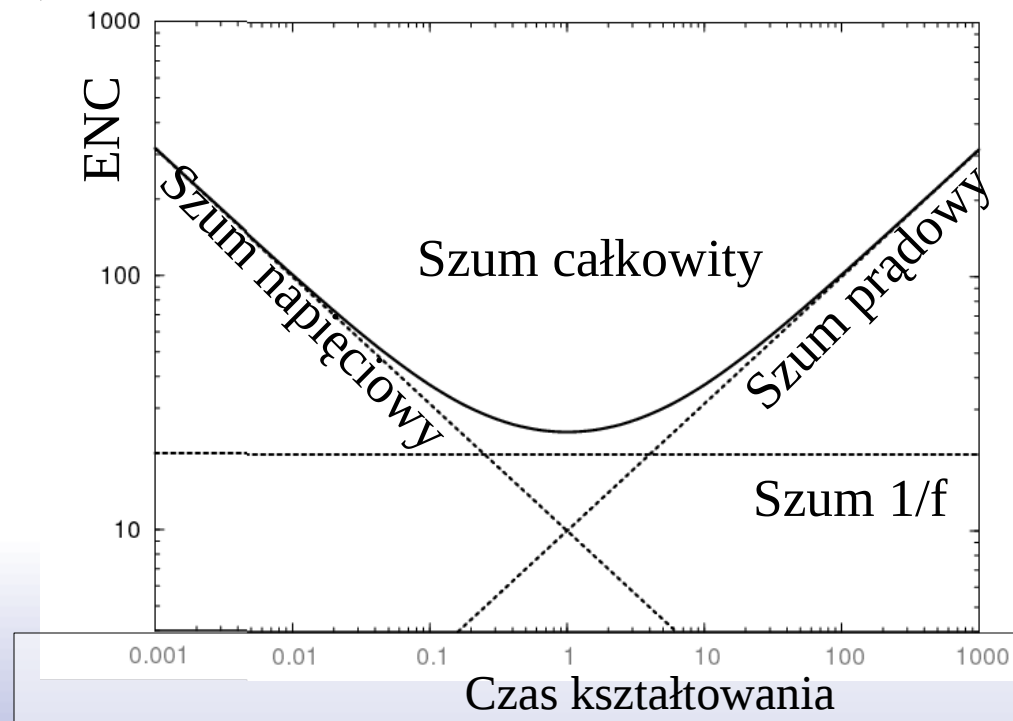
$$ENC = \sqrt{\frac{F_v C_{in}^2 v_e^2}{\tau} + F_i i_e^2 \tau + F_f K_f C_{in}^2}$$

szum napięciowy
 $\propto 1/\tau$
 $\propto C_{in}^2$

szum prądowy
 $\propto \tau$
niezależny od C_{in}

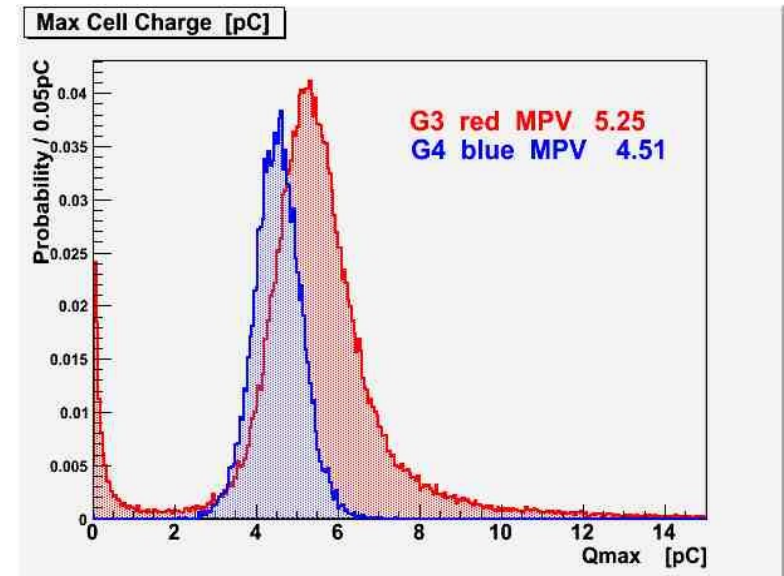
szum 1/f
niezależny od τ
 $\propto C_{in}^2$

- F_v, F_i, F_f - stałe
- v_e^2, i_e^2 - gęstości widmowe szumu
- K_f - współczynnik szumu 1/f
- C_{in} - pojemność wejściowa
- τ - czas kształtowania (np. T_{peak})



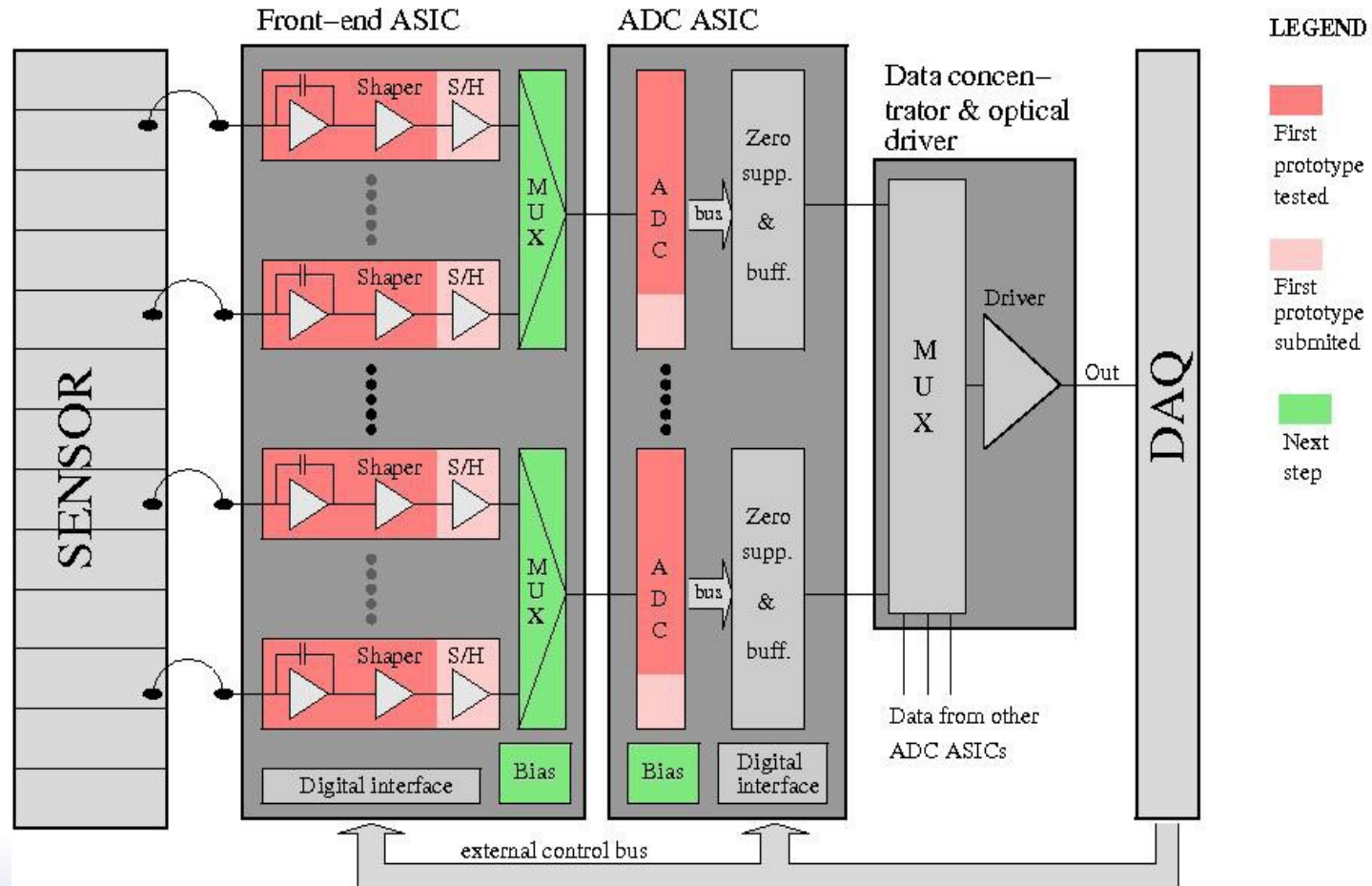
Istotne parametry LumiCal-a

- ❑ Zakres sygnałów: od 2 fC (miony w modzie kalibracyjnym) do ponad 10 pC (w modzie fizycznym)
- ❑ Okupancja: do ~4% (beam-strahlung), poniżej 1% (bhabha)
- ❑ Sensory Si ze sprzężeniem DC
 $C_{det} \sim 10-100 \text{ pF/pad}$, plus fanout $\sim 1 \text{ pF/cm}$, prąd upływu $\sim 1-10 \text{ nA/pad}$)
- ❑ Czas pomiędzy zderzeniami $\sim 350 \text{ ns}$
- ❑ Po $\sim 1 \text{ ms}$ wiązki $\sim 200 \text{ ms}$ przerwy, by uzyskać mały średni pobór mocy należy wyłączać elektronikę w przerwie



Architektura odczytu detektora LumiCal

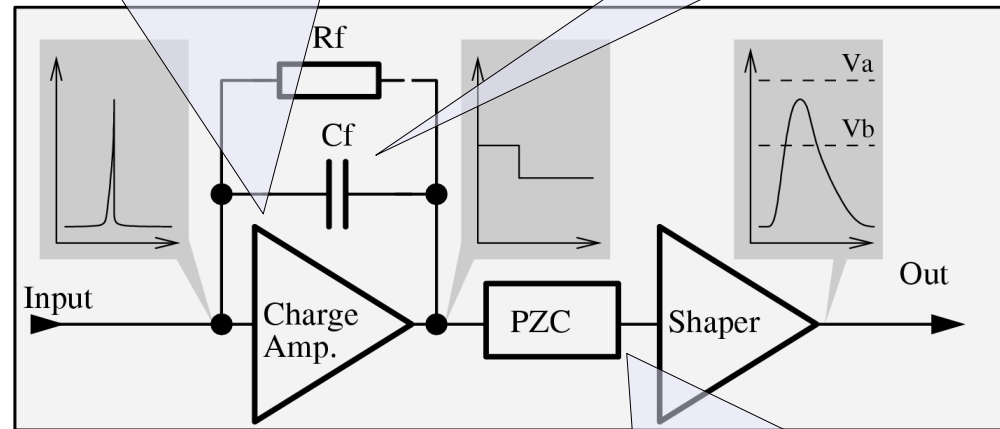
- Front-end ASIC 32-64 kanały
- ADC na 1 (lub 8) kanałów
- Prototypy w AMS 0.35 μm



Wyzwania i rozwiązania front-end-u LumiCal-a

Duży zakres C_{det} 10-100 pF
 Mod kalibracyjny S/N~10 for MIP
 Przedwzmacniacz ładunkowy

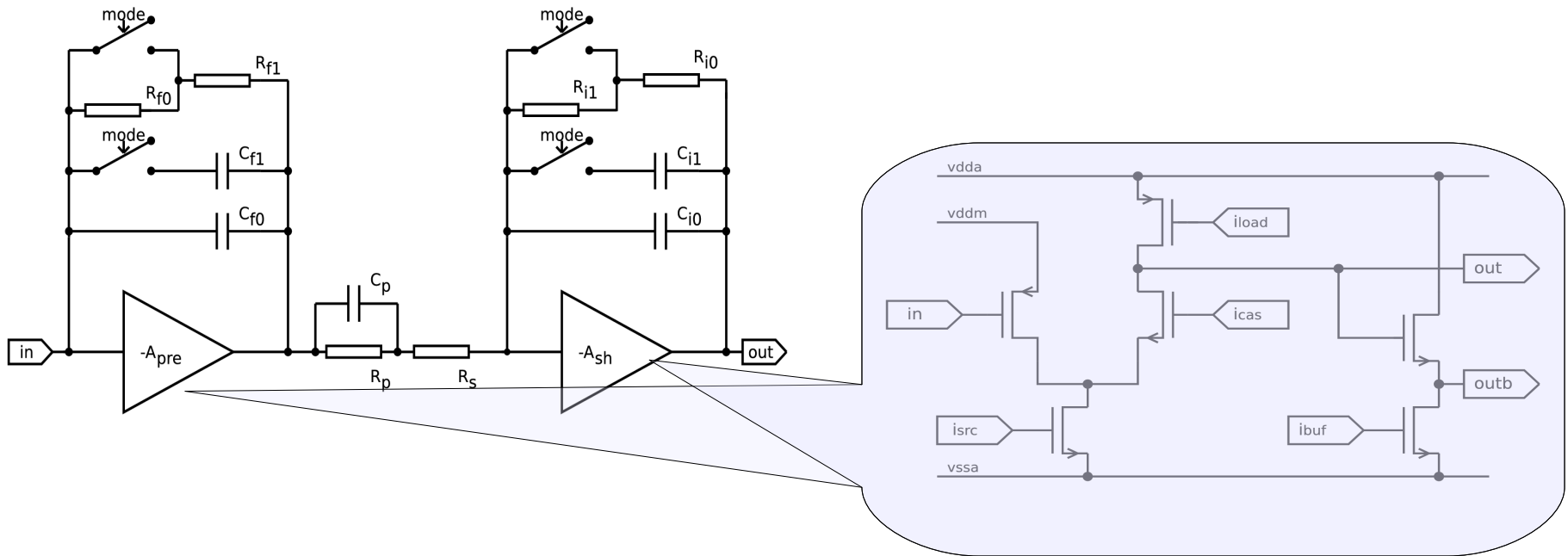
$Q_{max} \sim 10$ pC
 $C_f \sim 10$ pF



Mod kalibracyjny&fizyczny
 Zmienne wzmocnienie

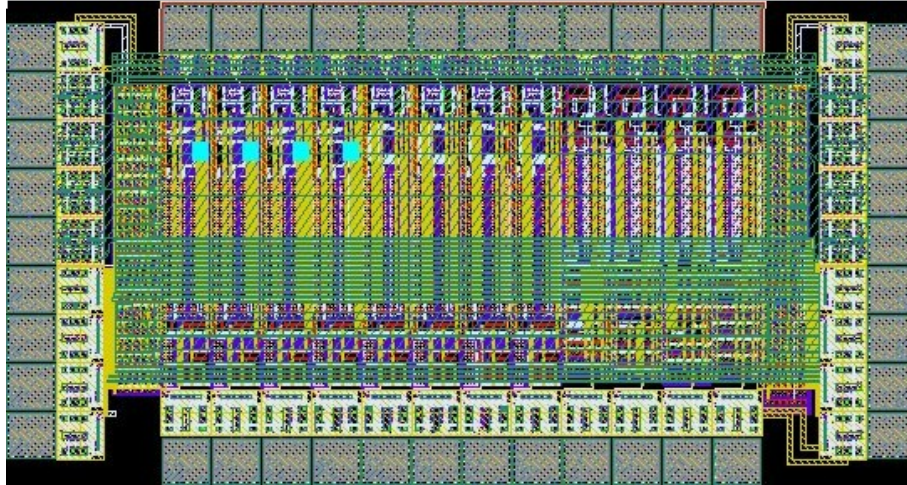
$\Delta t \approx 300$ ns, wysoka okupancja
 PZC + Shaper $T_{peak} \sim 60$ ns

□ Preamplifier + PZC + CR-RC Shaper

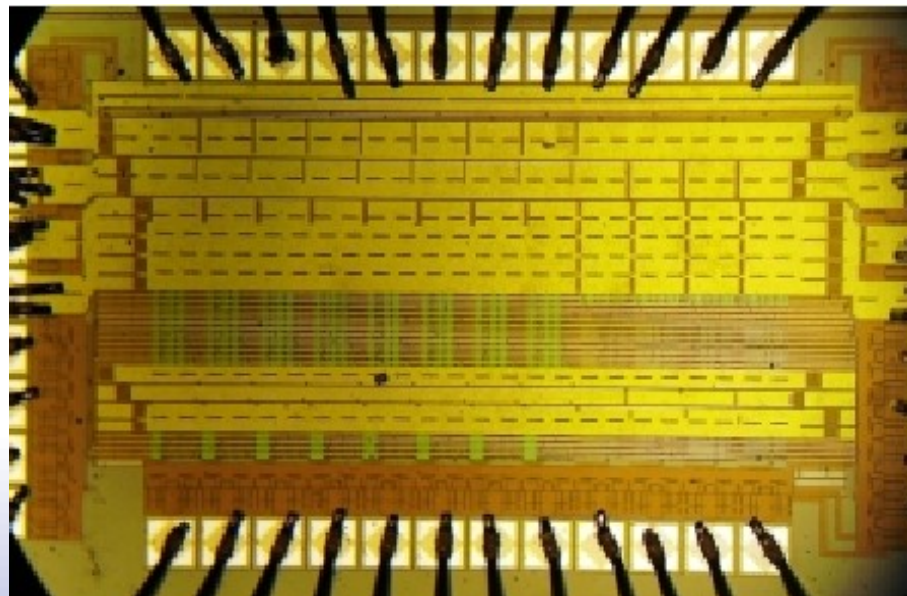


$$\frac{U_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{1}{C_f C_i R_s} \cdot \frac{s + 1/C_p R_p}{s + 1/C_f R_f} \cdot \frac{1}{(s + 1/C_i R_i)(s + 1/C_p (R_p \parallel R_s))}$$

Front-end: layout i produkcja



Layout – projekt masek technologicznych układu

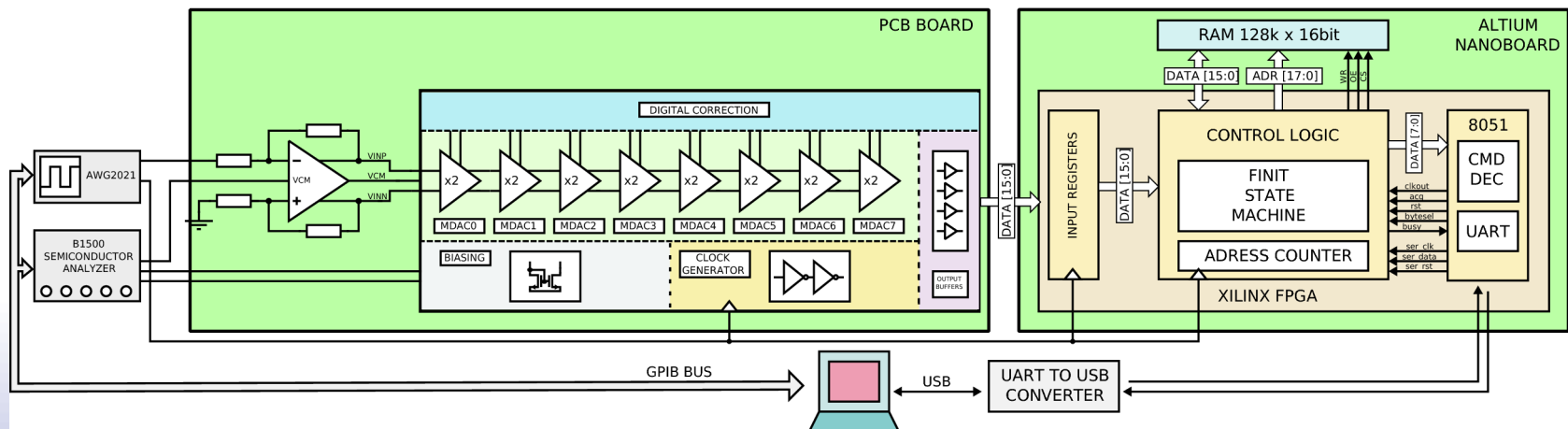


Fotografia zbondowanego układu scalonego

Pomiary prototypów układów front-end i ADC

Stanowiska pomiarowe

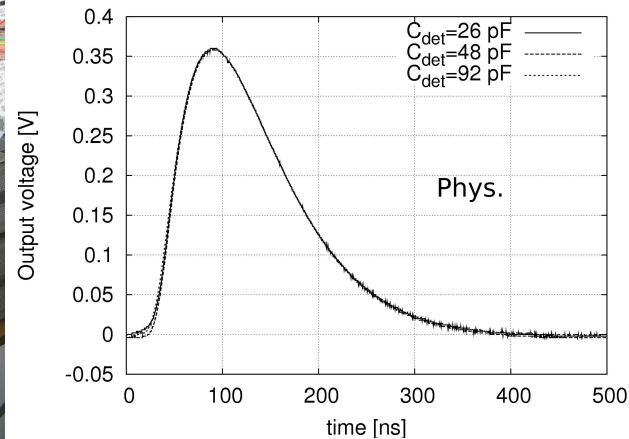
- ❑ System akwizycji oparty na FPGA
- ❑ Widmo szumów - spectrum analyzer (np. Agilent 4395A)
- ❑ Pomiary statyczne U,I - semiconductor device analyzer (np. Agilent B1500A)
- ❑ Generacja sygnałów sinusoidalnych i schodkowych - waveform generator (np. AWG2021)



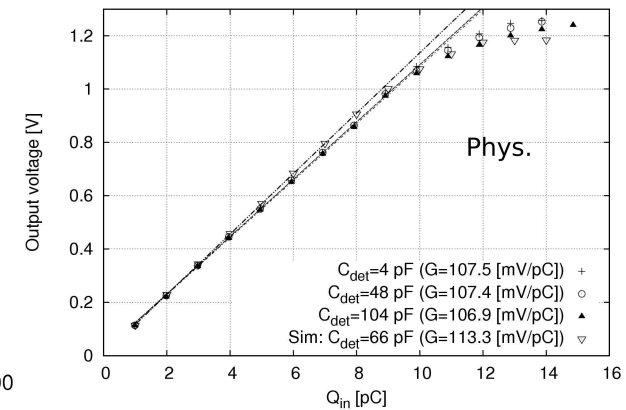
Pomiary Front-end-u



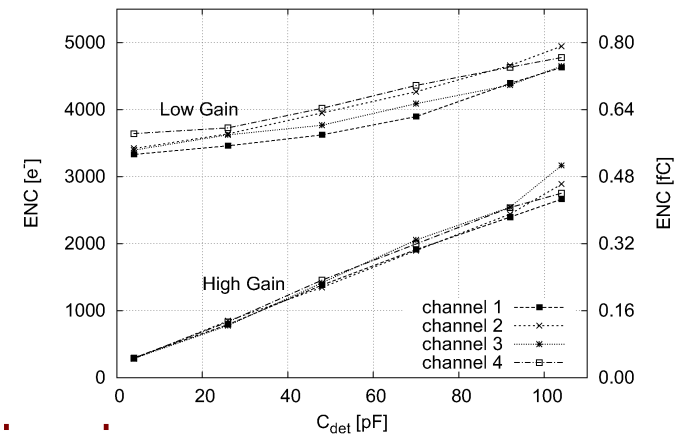
Kształt impulsu



Wzmocnienie

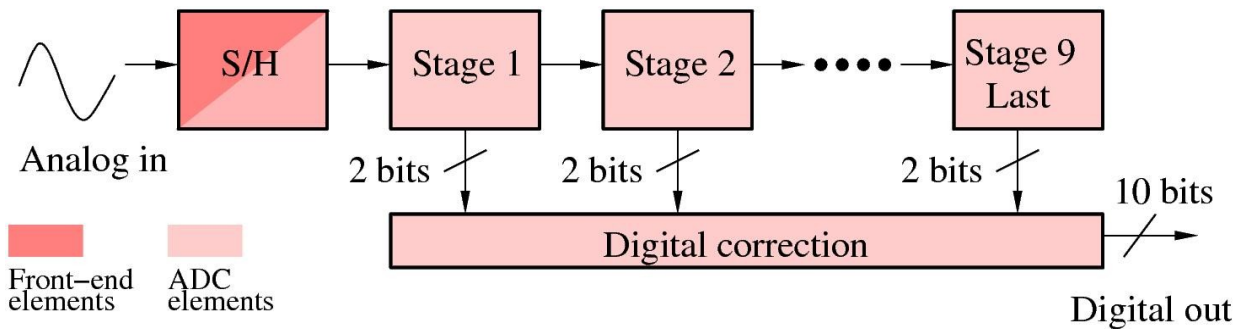


Szumy

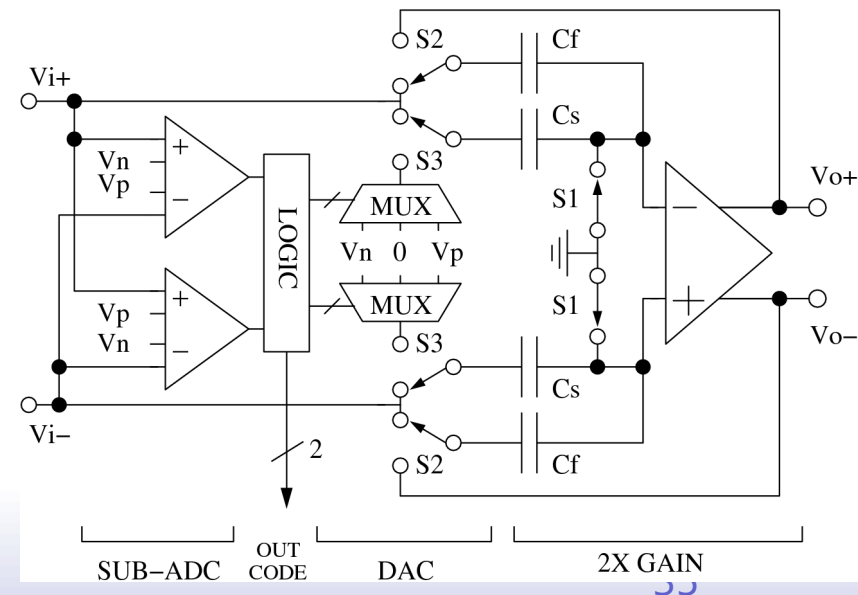


Wyniki pomiarów zgodne z założeniami

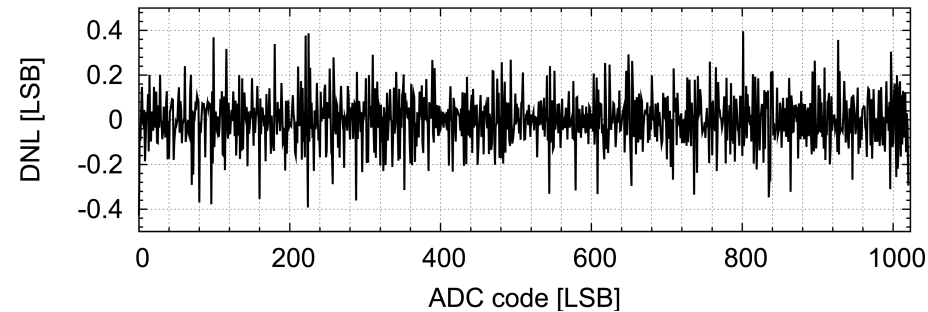
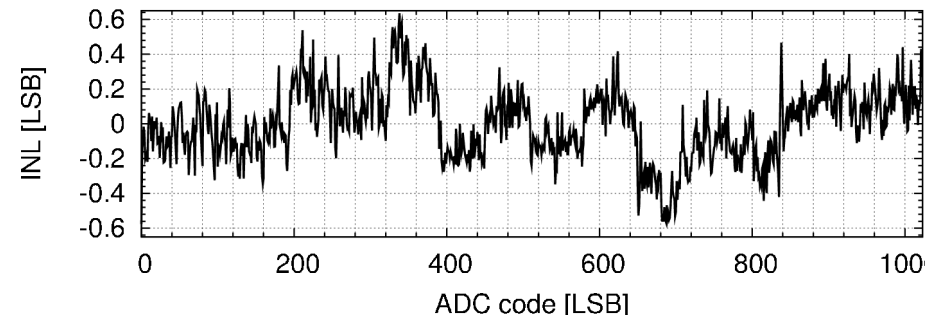
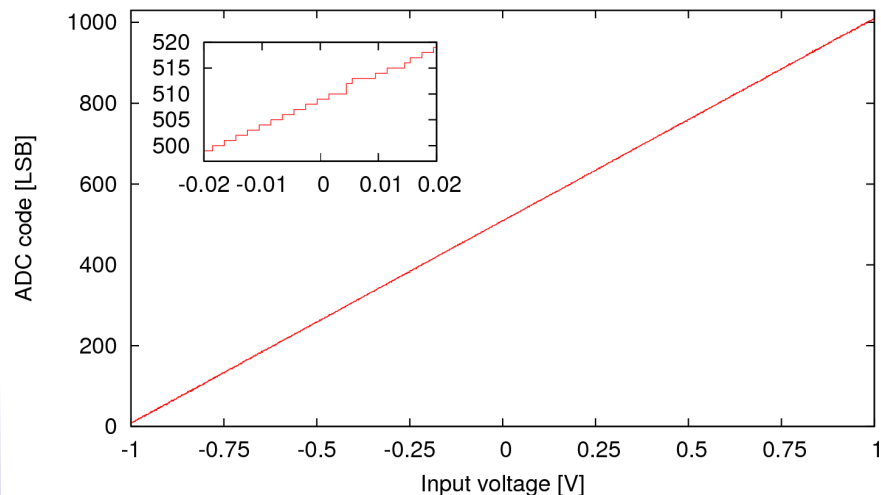
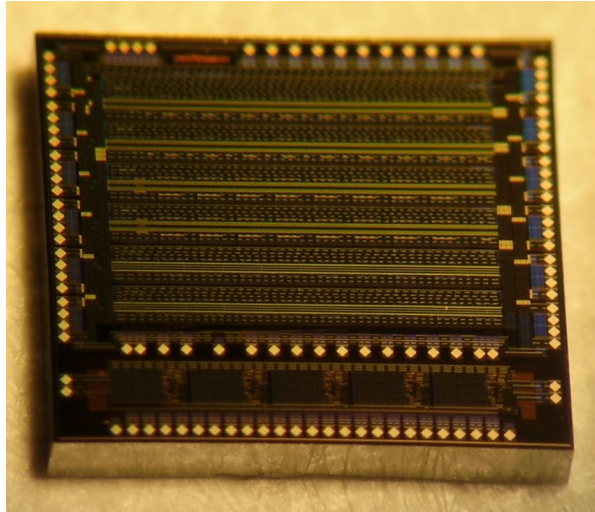
Projekt ADC typu pipeline



- ❑ 10 bit pipeline ADC 1.5 bit na stopień
- ❑ Próbkowanie 3-30 Ms/s
- ❑ W pełni różnicowa architecture
- ❑ Możliwość wyłączenia w przerwie pomiędzy wiązkami



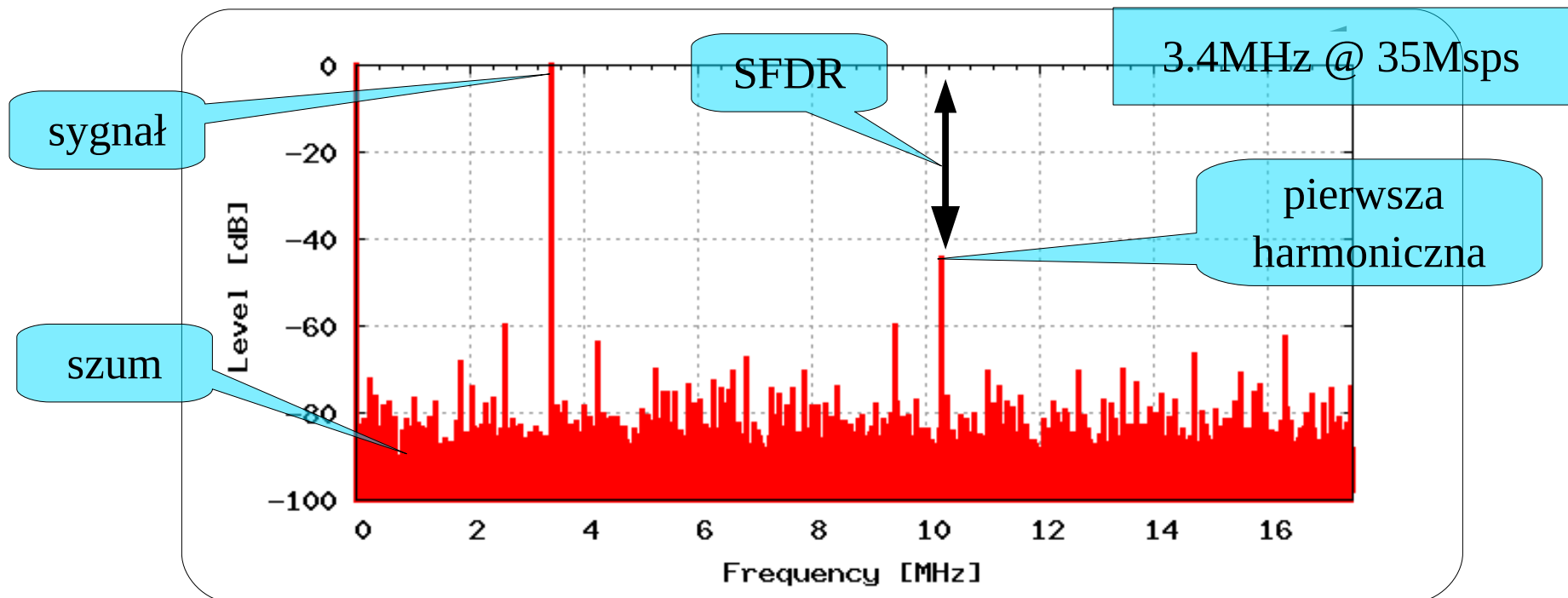
Pomiary statyczne ADC



Bardzo dobra liniowość
INL < 1LSB, DNL < 0.5 LSB

Pomiary dynamiczne ADC

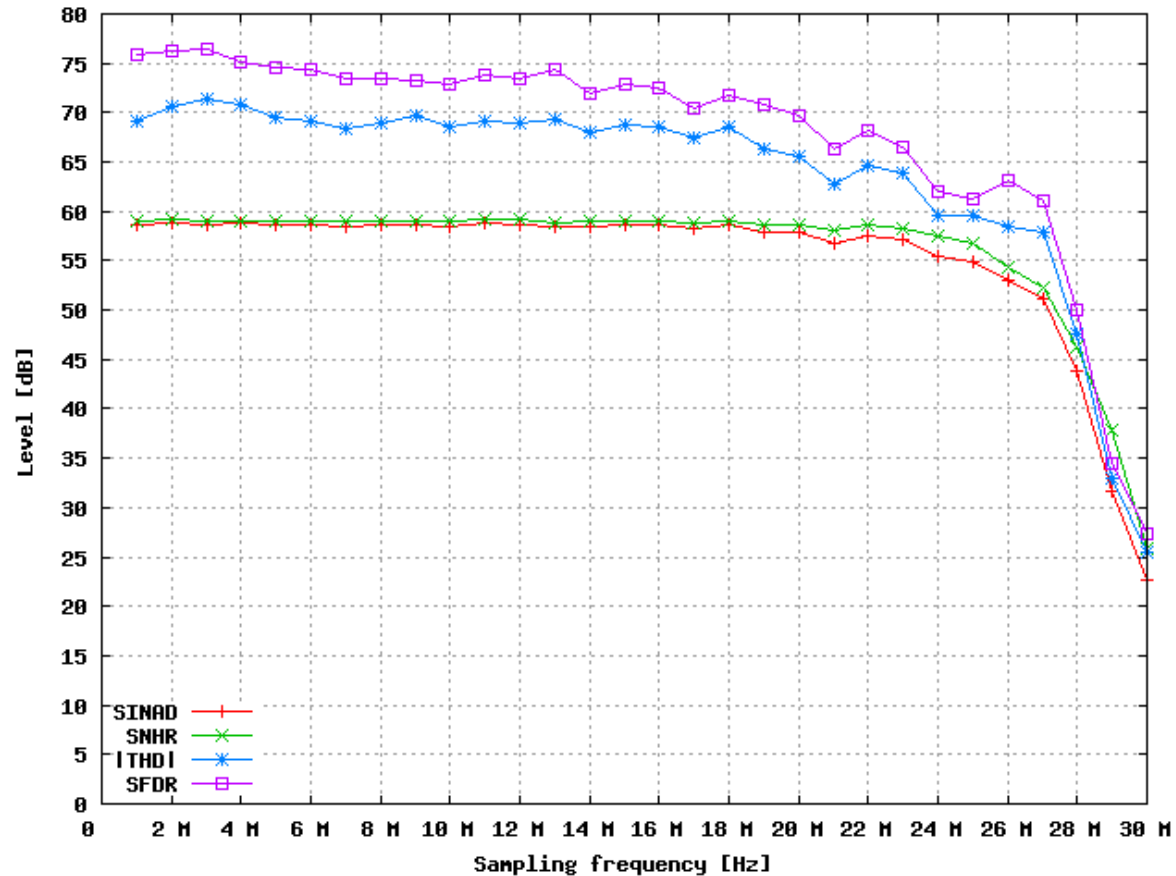
Przykład widma FFT: sygnał sinusoidalny na wejściu, robimy transformatę Fouriera z kodów wyjściowych...



Dyskretna transformata Fouriera najlepszym narzędziem do charakteryzacji ADC

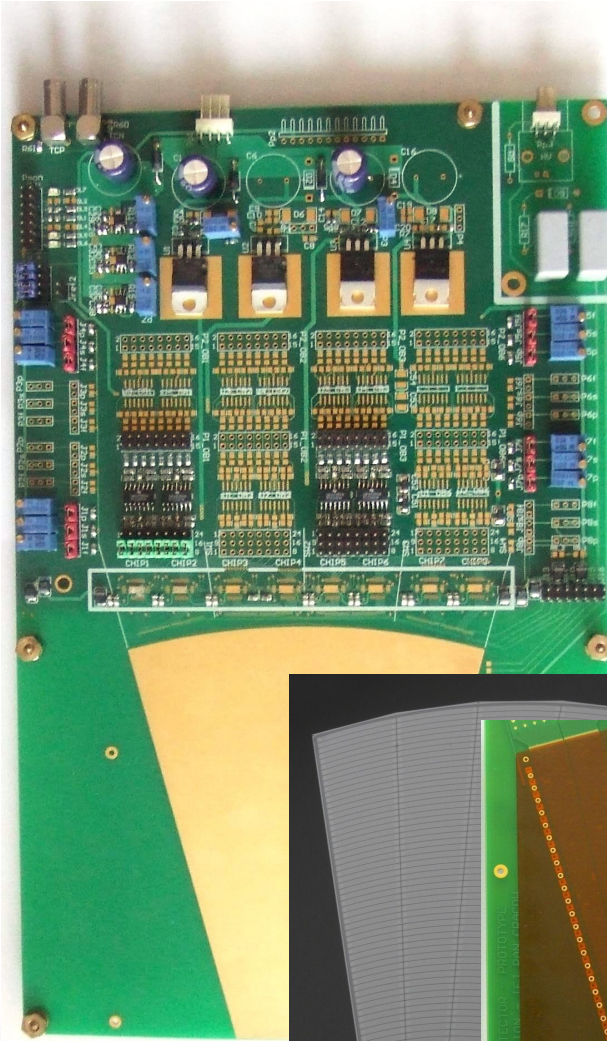
Pomiary dynamiczne ADC

- ❑ SNHR stosunek sygnału do szumu bez harmonicznych
- ❑ THD stosunek sygnału do harmonicznych
- ❑ SINAD stosunek sygnału do szumu
- ❑ Efektywna liczba bitów
 $ENOB = (SINAD - 1.8) / 6 = 9.5$



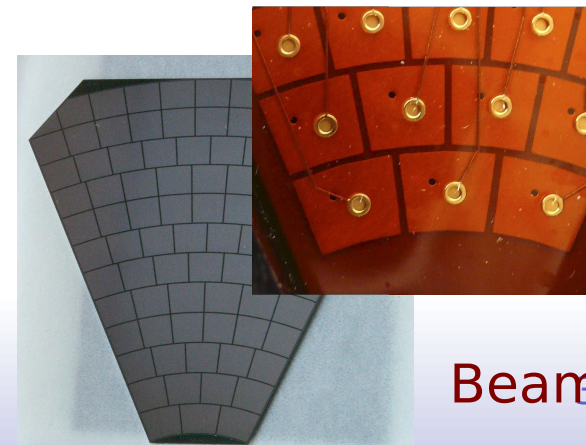
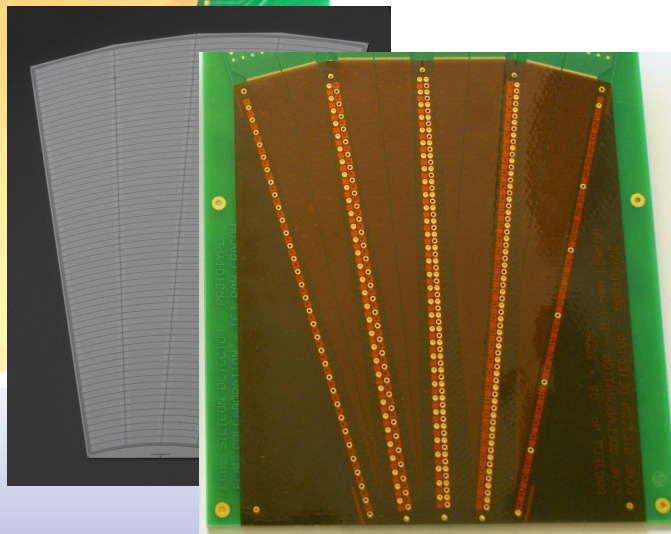
Zmierzone parametry zgadzają się z symulacjami

Przygotowanie *beam-testu*



- ❑ Dedykowana płytka PCB
- ❑ Sensory dla LumiCal-a (Si) i BeamCala-a (GaAs)
- ❑ 8 ASIC-ów front-end (64 kanały)
- ❑ Fanout-y (LumiCal, BeamCal)
- ❑ ADC zewnętrzne (na razie)

LumiCal



BeamCal

FCAL: ILC vs CLIC

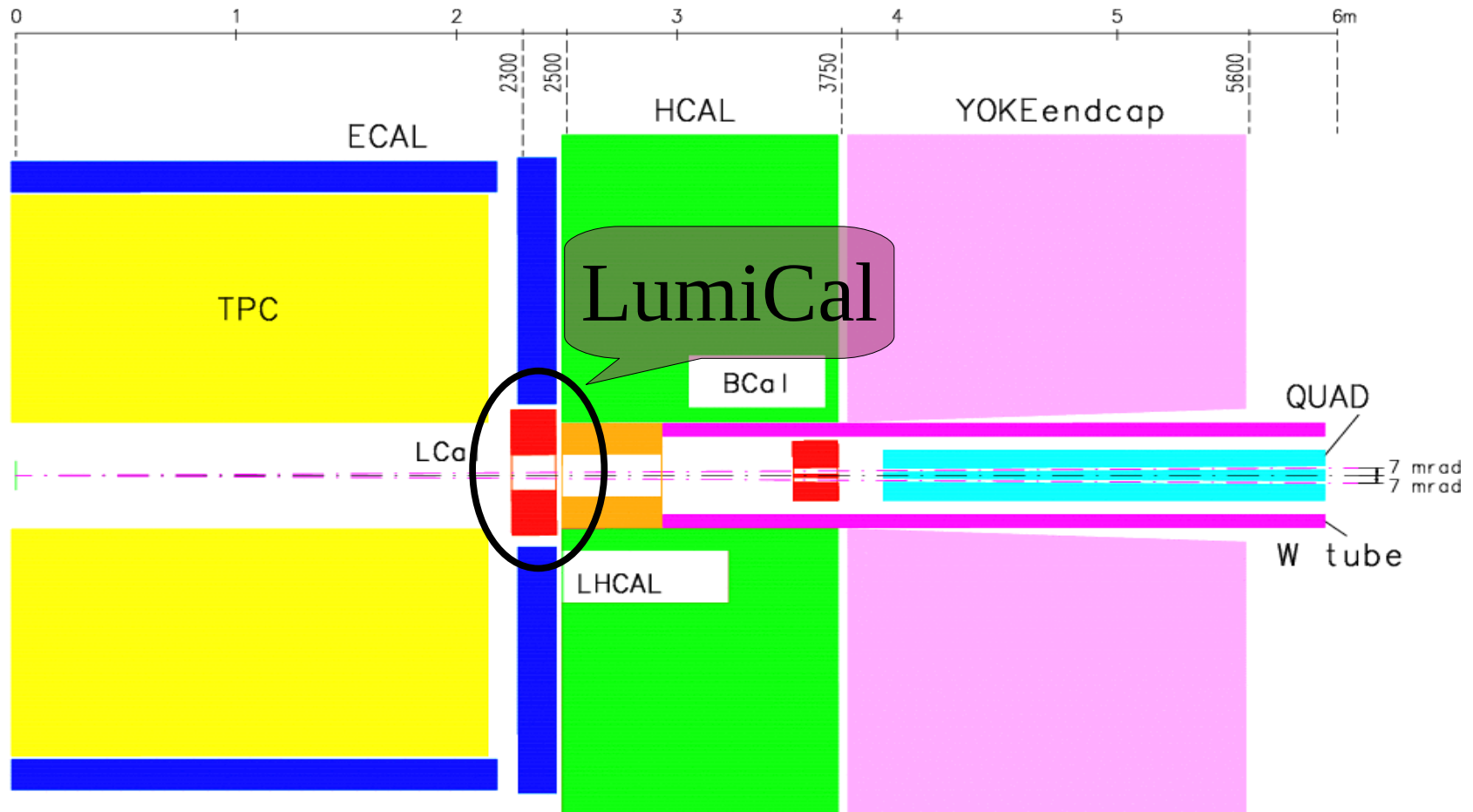
- ❑ Kolaboracja FCAL rozwija detektory LumiCal i BeamCal także z myślą o CLIC
- ❑ FCAL rozpoczęło prace dla CLIC niedawno, więc ich zaawansowanie jest niewielkie
- ❑ Koncepcja architektury detektorów jest podobna w obu przypadkach
- ❑ Bardzo istotne różnice występują w odczycie detektorów ze względu na parametry czasowe wiązki:
 - w ILC sygnał wyzwalający co 369ns, w CLIC ze względu na bardzo krótki czas pomiędzy zderzeniami, każdy kanał będzie się musiał samowyzwalać
 - 5Hz ILC / 50 Hz CLIC będzie miało konsekwencje w wyłączaniu odczytu i poborze mocy
- ❑ Uszkodzenia radiacyjne w CLIC ???
- ❑ Wiele innych różnic...

	LEP 2	ILC 0.5 TeV	CLIC 0.5 TeV	CLIC 3 TeV
L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5×10^{31}	2×10^{34}	2×10^{34}	6×10^{34}
BX/train	4	2670	350	312
BX sep	247 ns	369 ns	0.5 ns	0.5 ns
Rep. rate	50 kHz	5 Hz	50 Hz	50 Hz
L/BX [cm^{-2}]	2.5×10^{26}	1.5×10^{30}	1.1×10^{30}	3.8×10^{30}
$\gamma\gamma \rightarrow X$ / BX	neg.	0.2	0.2	3.0
σ_x/σ_y	240 / 4 mm	600 / 6 nm	200 / 2 nm	40 / 1 nm

Podsumowanie

- ❑ Kolaboracja FCAL rozwija detektory dla obszaru małych kątów dla zderzaczy liniowych e+e- ILC, CLIC
- ❑ Prace przy projekcie i budowie detektora świetlności LumiCal dla zderzacza ILC znajdują się już w zaawansowanej fazie, tzn. istnieją już działające prototypy kluczowych elementów systemu detekcji
- ❑ W ciągu następnych 3 lat będziemy chcieli stworzyć rozsądny prototyp modułu detektora (np. kilka warstw zawierających po 4-8 sektorów detektora każda) z kilkoma tysiącami kanałów
- ❑ Równolegle zaczęliśmy prace nad wersją systemu detekcji spełniającą wymagania zderzacza CLIC
- ❑ **Zaangażowanie polskich grup w projekt i budowę przyszłych zderzaczy liniowych e+e- jest na razie bardzo małe !**

FCAL architecture



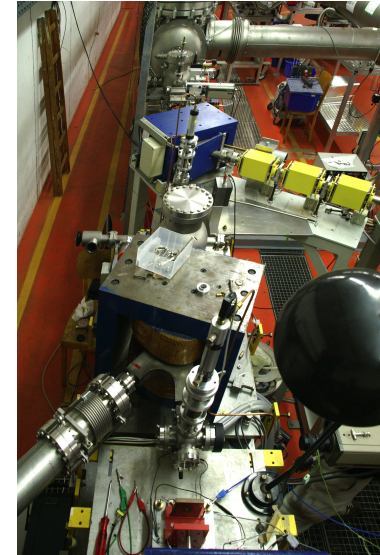
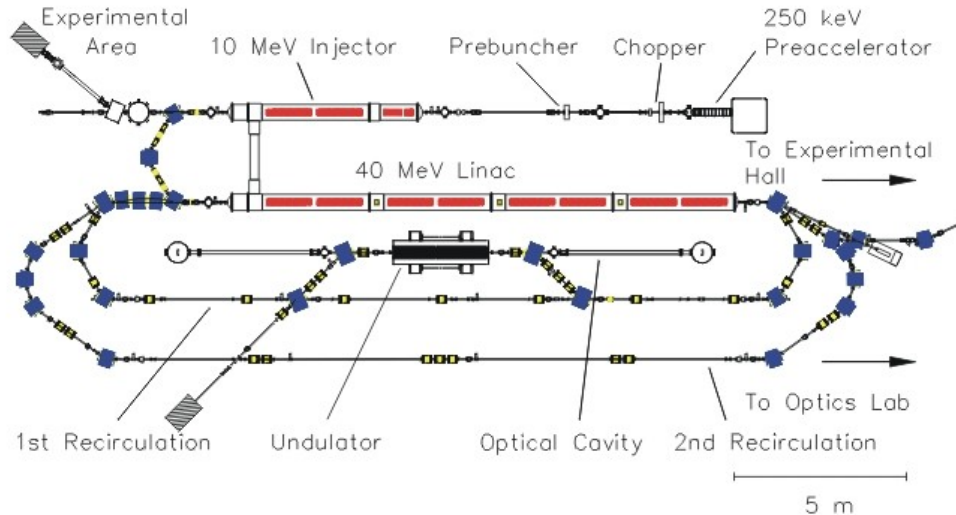
LCaI $R_i = 100$ mm
 $R_o = 350$ mm
 $z_1 = 2270$ mm
 $z_2 = 2470$ mm

LHCAL $R_i = 120$ mm
 $R_o = 290$ mm
 $z_1 = 2500$ mm
 $z_2 = 2950$ mm

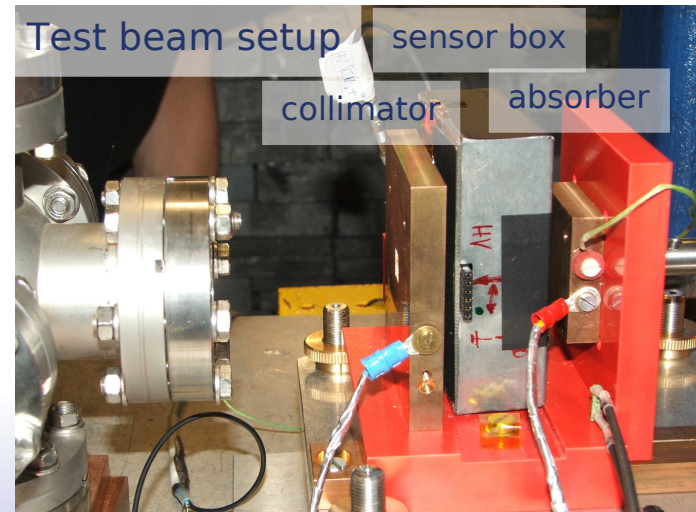
BCaI $R_i = 20$ mm / 15 mm
 $R_o = 165$ mm
 $z_1 = 3550$ mm
 $z_2 = 3750$ mm

High Dose Irradiation

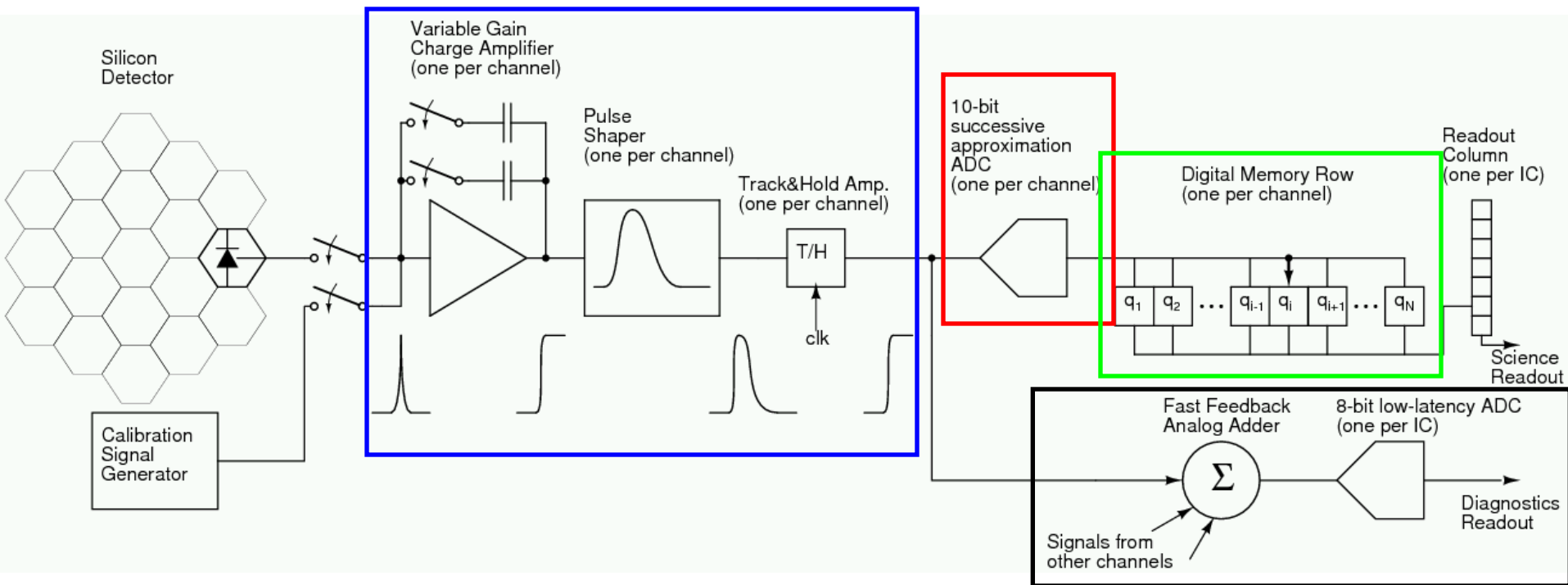
Superconducting **D**armstadt **L**inear **A**ccelerator
 Technical University of Darmstadt



- Irradiation up to several MGy:
 10 ± 0.015 MeV and beam currents from 10 to 50 nA corresponding to 60 to 300 kGy/h.
 - Keeping the sensor under bias permanently.
 - This is a much higher dose rate compared to the application at the ILC (~ 1 kGy/h)
- (1 MGy = 100 Mrad is deposited by about 4×10^{15} e⁻/cm²)



BeamCal Readout Electronics



- ❑ Dual-gain front-end electronics: charge amplifier, pulse shaper and T/H circuit
- ❑ **Successive approximation ADC, one per channel**
- ❑ **Digital memory, 2820 (10 bits + parity) words per channel**
- ❑ Analog addition of 32 channel outputs for fast feedback; low-latency ADC