

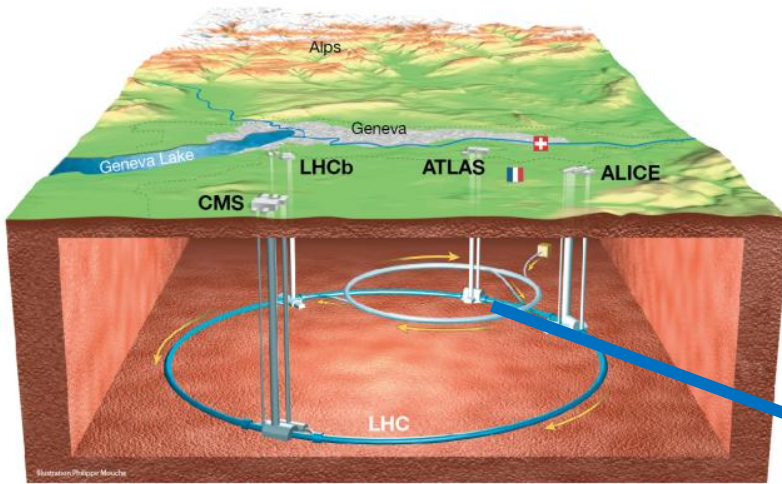
Studium radiační odolnosti stripových senzorů pro ATLAS Upgrade

ATLAS seminář
Marcela Mikeščíková

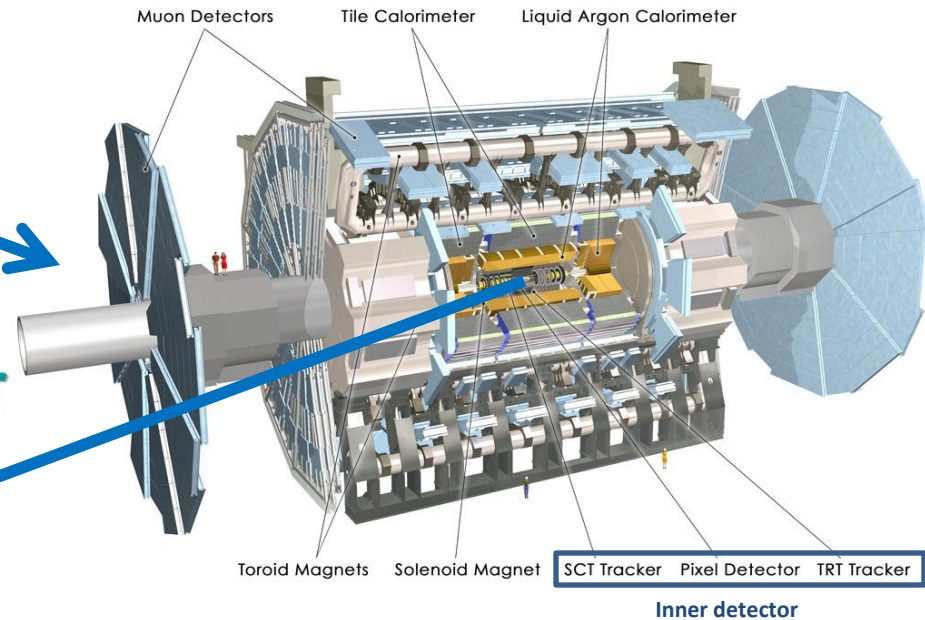
5.5.2016 Fyzikální ústav AVČR

ATLAS Experiment na LHC

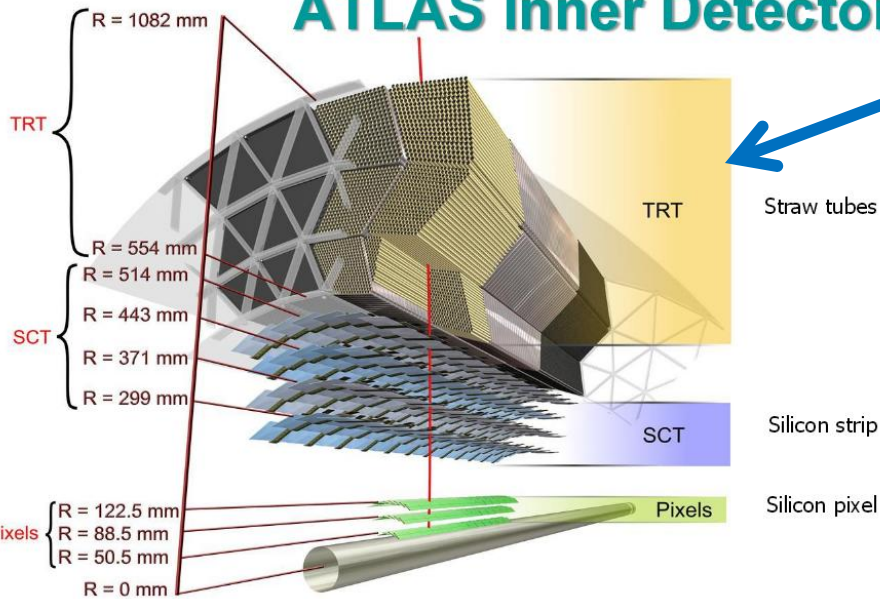
Large Hadron Collider



ATLAS experiment

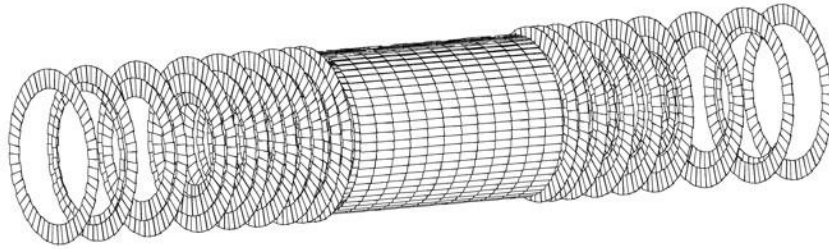


ATLAS Inner Detector

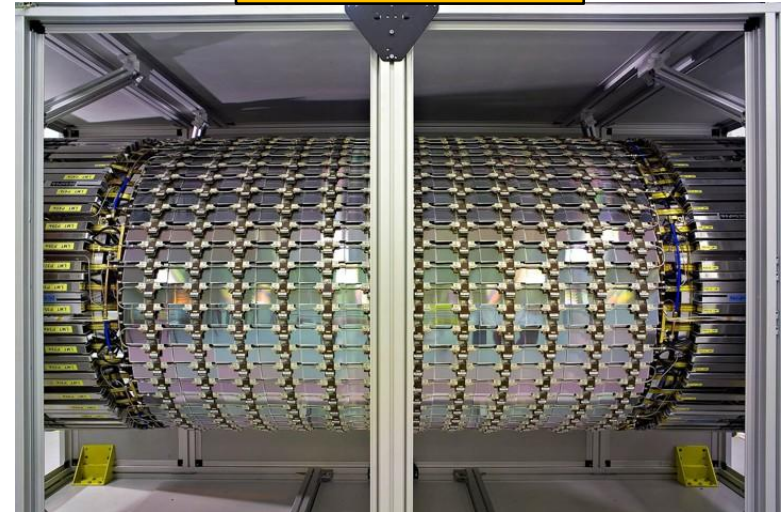


Stripový detektor SCT

SCT - schéma umístění SCT modulů ve válcové části a na 18 discích



Válcová část SCT



SCT: Semi-Conductor Tracker

- přesné určování dráhy a impulsu vzniklých nabitých částic

61m² Si-stripových senzorů (*p-na-n*) s 6,2 mil. snímacími kanály

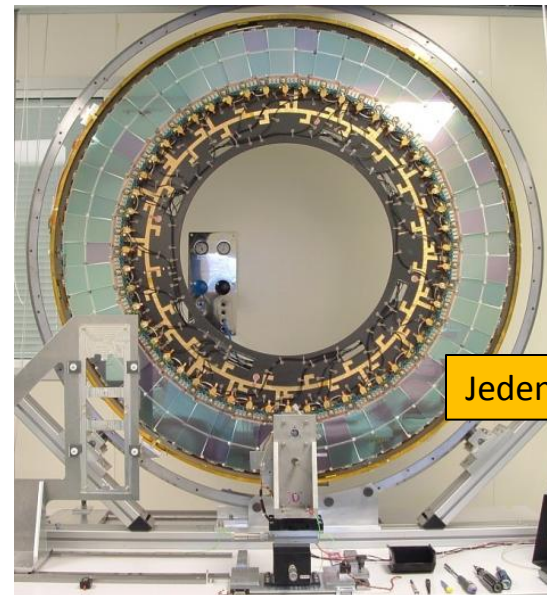
4088 křemíkových modulů

válce : pokrytí rapidit $|\eta| < 1.4$

disky : pokrytí rapidit 1.1 to 1.4 $< |\eta| < 2.5$

30cm $< R < 52$ cm

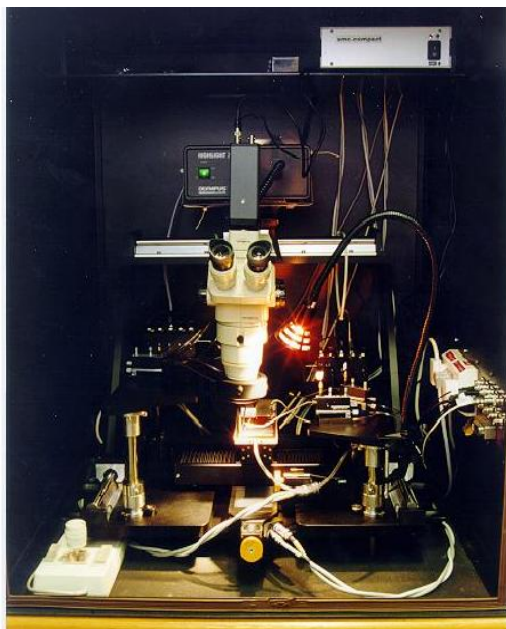
Prostorové rozlišení $r\phi \sim 16\mu\text{m}$ / $Z \sim 580\mu\text{m}$



Jeden z disků SCT

FZU AVČR pro SCT ATLAS

- Vývoj stripových senzorů pro SCT a studium radiační odolnosti prvních prototypů
- **Kvalifikační testy stripových senzorů typu p -na- n**
 - kvalifikační testy seriové produkce stripových senzorů pro SCT,
 - celkem testováno přes 2500 senzorů (16% z celkového počtu)



SCT Endcap Outer Module



Diskový modul

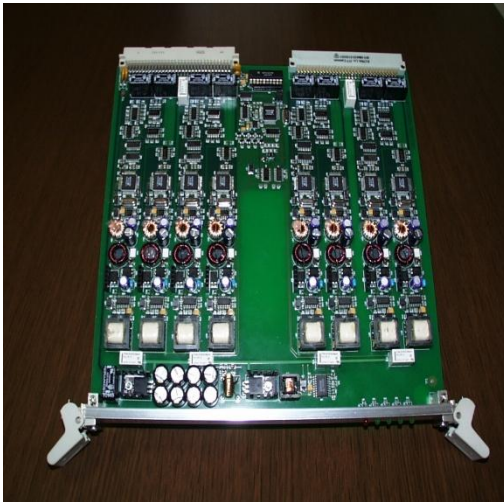


Detail senzoru pro diskový modul

Automatická testovací stanice v laboratoři FZU

FZU AVČR pro SCT ATLAS

- **Vývoj a konstrukce nízkonapěťových zdrojů pro SCT**



- **nízkonapěťový zdroj pro SCT vyvinul Jan Šťastný (FZU)**
- pro celý detektor SCT je vyrobila firma TTC Praha (celkem 4500 zdrojů).

Specifikace napětí pro SCT modul:

Analogové 0 - 5,1V
Digitální 0 - 5,1V
VCSEL 0 - 6,6V
PIN 0 - 10,5V
2 logické signály TTL
2 I-zdroje pro měření teploty SCT modulu
Monitorování všech napětí a proudů
Komunikace: CANbus

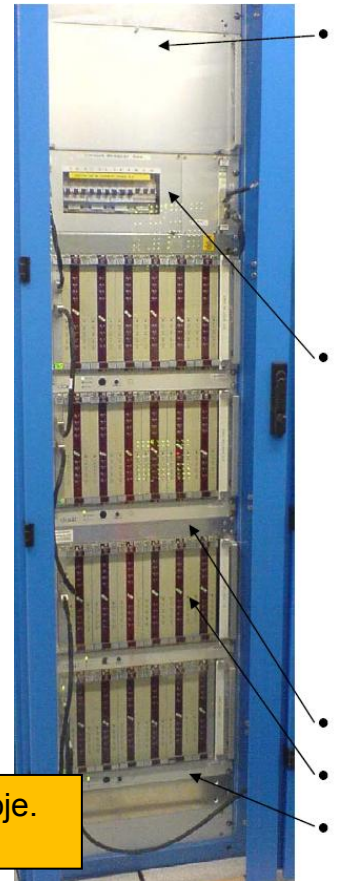
- **Vývoj napájení a chladicího systému EURO rámců a stojanů pro SCT**

Ve FZU bylo vyvinuto napájení a architektura technické bezpečnosti systému EURO rámců a byl navržen chladicí systém stojanů. (J.Bohm, J.Šťastný, J.Hrivňák, E.Grunthálová, A.Mocová; J.Brož and P.Kubík (both from Charles Uni.).

- **Finální instalace napájecího systému SCT**

V letech 2006-2008 byla pracovníky FZU provedena finální instalace napájecího systému pro 4088 detekčních modulů v podzemní hale USA15 a US15. CR (J.Bohm, J.Šťastný, J.Hrivňák, E.Grunthálová, A.Mocová; J.Brož and P.Kubík (both from Charles Uni.).

ATLAS stojan se čtyřmi EURO rámy, ve kterých jsou umístěny nízkonapěťové a vysokonapěťové zdroje. Celý napájecí systém SCT sestává z 88 EURO rámců ve 22 stojanech.



hlavním koordinátorem celé skupiny SCT napájecích zdrojů byl Jan Bohm

ATLAS SCT Performance

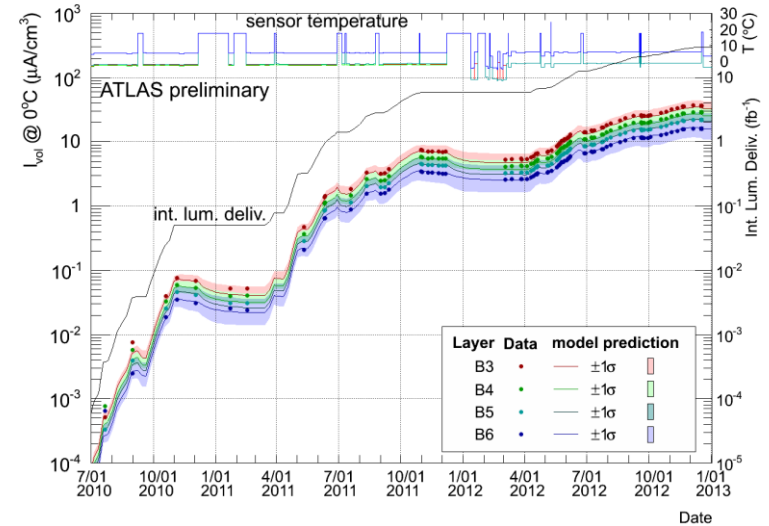
ATLAS pp 25ns run: August-November 2015

Inner Tracker		Calorimeters		Muon Spectrometer				Magnets		
Pixel	SCT	TRT	LAr	Tile	MDT	RPC	CSC	TGC	Solenoid	Toroid
93.5	99.4	98.3	99.4	100	100	100	100	100	100	97.8

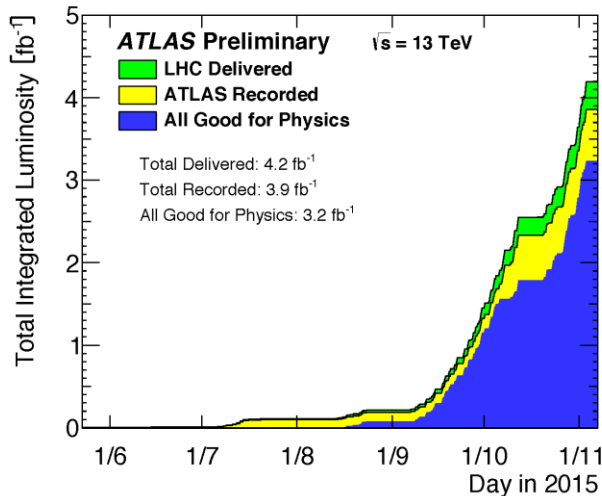
All Good for physics: 87.1% (3.2 fb⁻¹)

Luminosity weighted relative detector uptime and good data quality (DQ) efficiencies (in %) during stable beam in pp collisions with 25ns bunch spacing at $\sqrt{s}=13$ TeV between August-November 2015, corresponding to an integrated luminosity of 3.7 fb⁻¹. The lower DQ efficiency in the Pixel detector is due to the IBL being turned off for two runs, corresponding to 0.2 fb⁻¹. Analyses that don't rely on the IBL can use those runs and thus use 3.4 fb⁻¹ with a corresponding DQ efficiency of 93.1%.

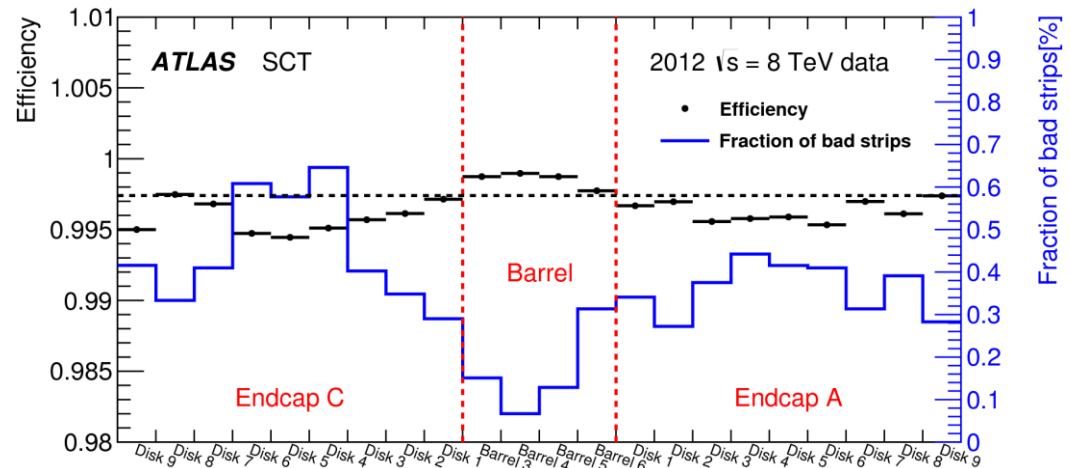
Leakage Current



Total Integrated Luminosity in 2015 (Run2)

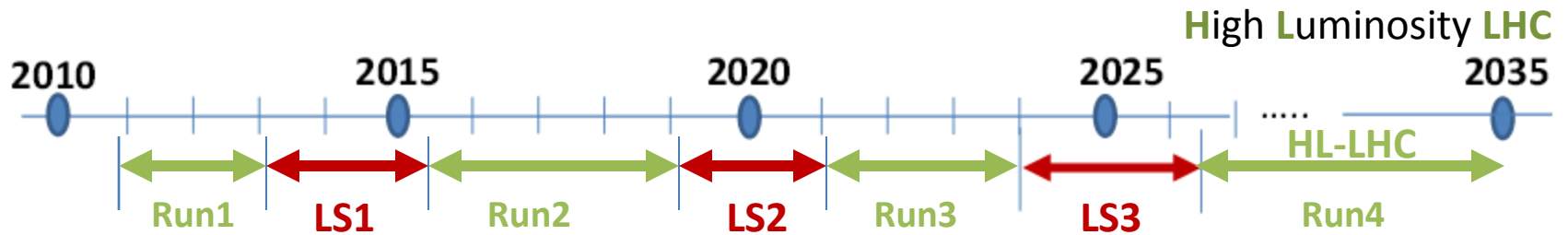


Hit Efficiency



od LHC k HL-LHC

Ugrade Vnitřního detektoru ATLAS



$v_s = 7-8 \text{ TeV}$
 $L = 6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Pile-up: $\langle \mu \rangle \sim 20-30$
 Int.Lum.: $\sim 30 \text{ fb}^{-1}$
 Bunch spacing: 50ns

$v_s = 13-14 \text{ TeV}$
 $L = 1-2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Pile-up: $\langle \mu \rangle \sim 25-50$
 Int.Lum.: $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$
 Bs: 25ns

$v_s = 14 \text{ TeV}$
 $L \sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Pile-up: $\langle \mu \rangle \sim 50-80$
 Int.Lum.: $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$
 Bs: 25ns

$v_s = 14 \text{ TeV}$
 $L = 2 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Pile-up: $\langle \mu \rangle \sim \mathbf{200}$
 Int.Lum.: $\sim \mathbf{3000} \text{ fb}^{-1}$
 Bs: 25ns

Phase 0 upgrade
 během **LongShutdown LS1**:
 nová urychlovací trubice
 s další pixelovou vrstvou IBL
 (Insertable B-layer)

Phase 1 upgrade
 během **LS2**

Phase 2 upgrade
 během **LS3 (HL-LHC)**:
 výměna celého Vnitřního
 detektoru za celokřemíkový

Proč upgrade Vnitřního detektoru?

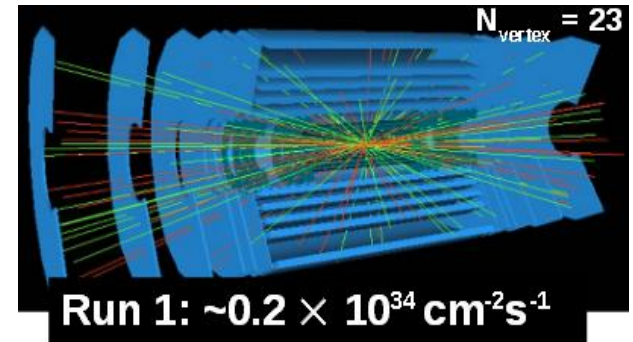
- zvýšení luminosity až 10x ($10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) v HL-LHC
- zvýšení “pile-up” z 20 na 200-300
- integrovaná luminosita až 3000fb^{-1}
- zvýšení radiačních toků na detektory

- **Radiační poškození**

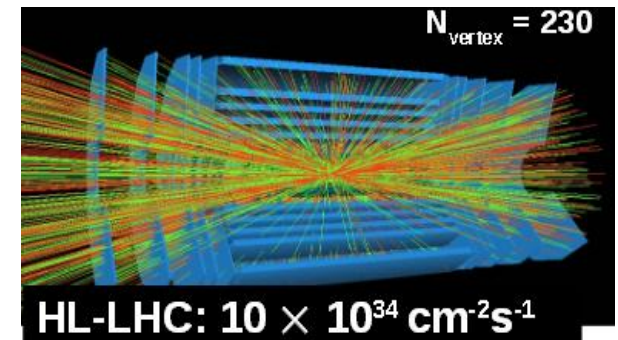
- současný pixel. detektor do $10^{15}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- SCT detektor do $2 \times 10^{14}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - ⇒ požadavek **radiační odolnost** pixelů do $2 \times 10^{16}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - ⇒ stripů do $2 \times 10^{15}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

- **Occupancy**

- současný Vnitřní detektor nemůže účinně rozlišit dráhy při pile-up >200
- TRT by dosáhl 100% **occupancy** (zahlcenosti)
- současná vyčítací elektronika do 50 pile-up,
 - ⇒ požadavek **jemnější granularity** senzorů
 - ⇒ elektronika s rychlejším přenosem většího objemu dat



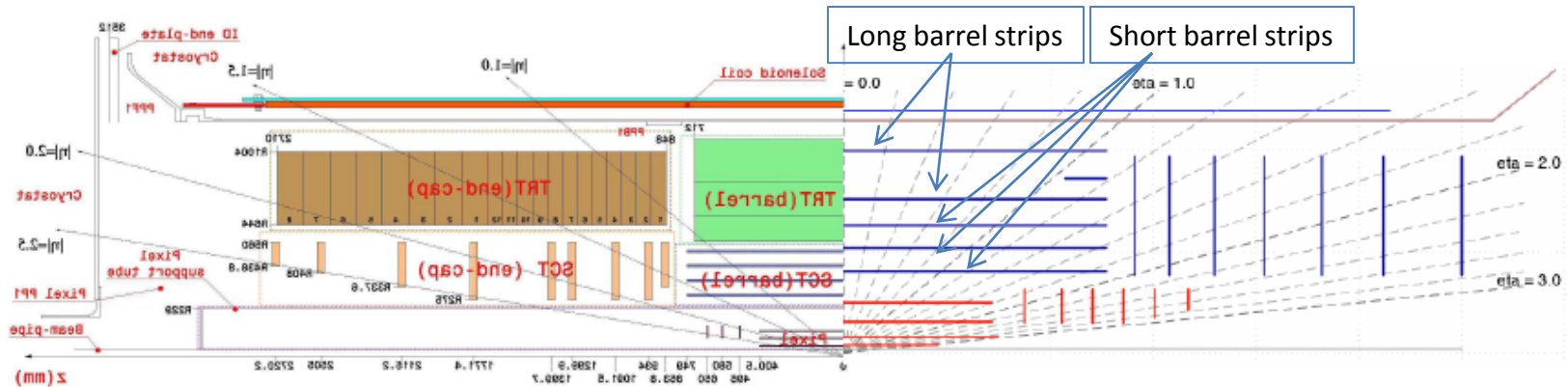
Run 1: vynikající výkon Vnitřního detektoru



Až 1000 drah na $\Delta\eta = 1.0$

- Ztráta dat nad $3 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
objemy dat by zahltily vyčítací linku mezi ABCD FE čipem a vyčítací ROD kartou

Inner tracker layouts



Inner Tracker (ITk)

- Current inner tracker
 - Pixels: 5-12 cm
 - Si area: 2.7 m²
 - IBL(2015): 3.3 cm
 - Strips: 30-51 (B)/28-56 (EC) cm
 - Si area: 62 m²
 - Transition Radiation Tracker (TRT): 56-107 cm
 - Occupancy is acceptable for $<3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - Phase-II at HL-LHC: $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Phase-II upgrade (LOI) 2012
 - Pixels: 4-25 cm
 - Si area: 8.2 m²
 - Strips: 40.-100 (B) cm
 - Si area: 122 (B)+71(EC)=193 m²
- Major changes from LHC
 - All silicon tracker
 - Large increase of Si area
 - both in Pixels and Strips
 - $\sim 3 \times$ LHC ATLAS

2016 nový layout – změny od Lol:

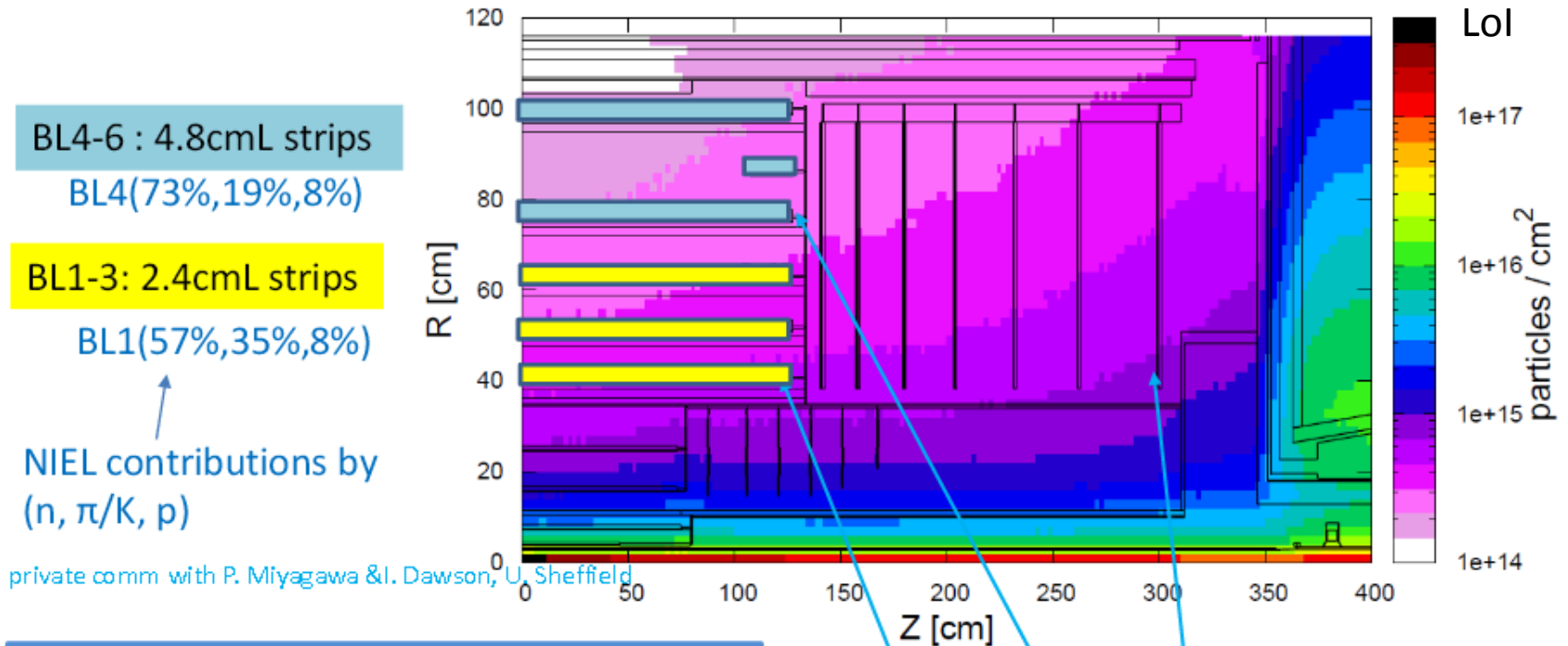
Válce: 4 → 5 pixelových vrstev

5.1 → 4 stripové vrstvy

Disky: 7 → 6 stripových disků

Radiační úrovně v ITk

Fluence evaluations per 3000 fb⁻¹
1 MeV neutron equivalent fluence



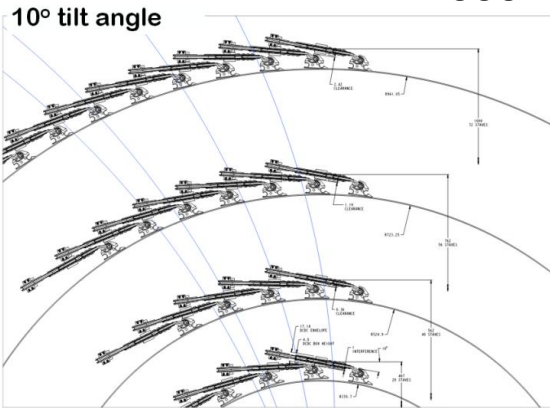
Taking a safety factor of 2,
Barrel short strips up to : $1.1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$
Barrel long strips up to : $0.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$
Endcap (8-48mm): $1.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$
Difference in n/p damages is an issue

EC7: $8.1 \times 10^{14} / \text{cm}^2$
BL4: $2.9 \times 10^{14} / \text{cm}^2$
BL1: $5.3 \times 10^{14} / \text{cm}^2$

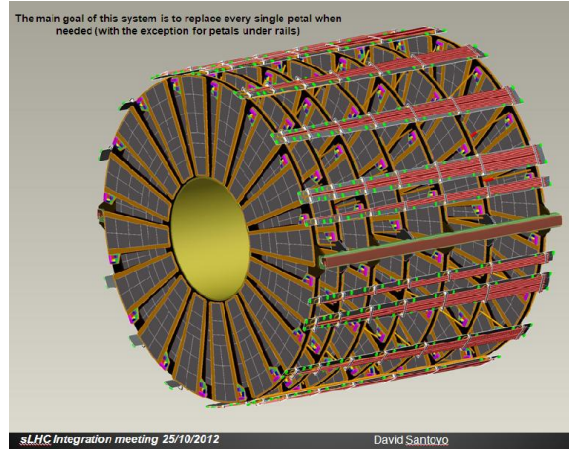
I. Dawson, PoS(VERTEX2012)015
ATL-GEN-2014-003

Stripový detektor

- **Barrelové vrstvy** - 4 válce se staves,
- celkem 392 staves,
- ~11000 modulů

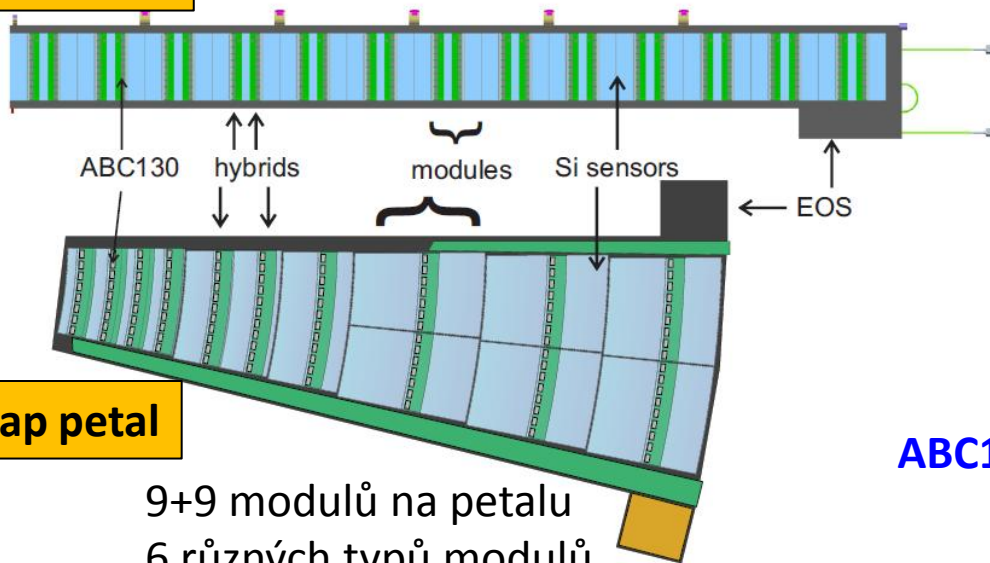


- **End-cap (EC) disk** - 12 EC disků,
- 32 petalů na disk,
- celkem 384 petalů
- ~7000 modulů

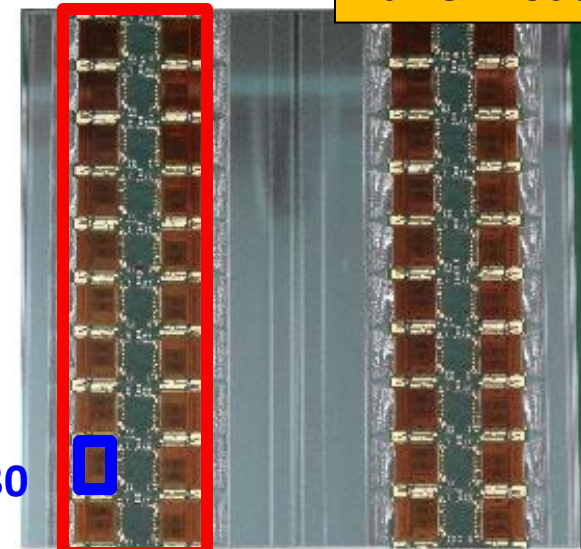


Barrel stave

140 cm, 14 + 14 modulů



Barrel module



End-cap petal

9+9 modulů na petalu
6 různých typů modulů

ABC130



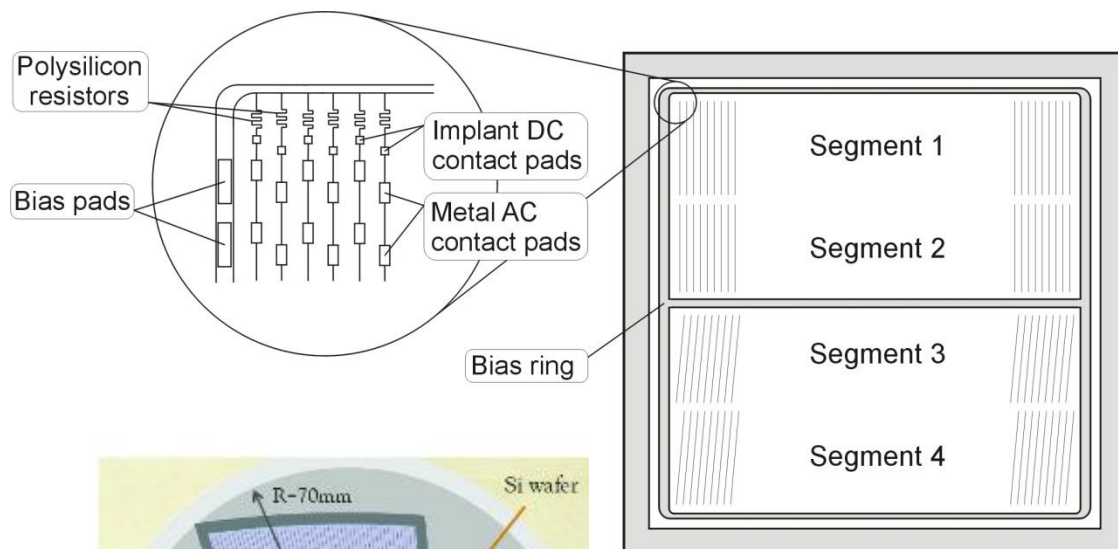
Hybrid

Design stripových senzorů pro ITK

- *n-in-p*
- tloušťka 300-320 μm
- nosič náboje: elektrony

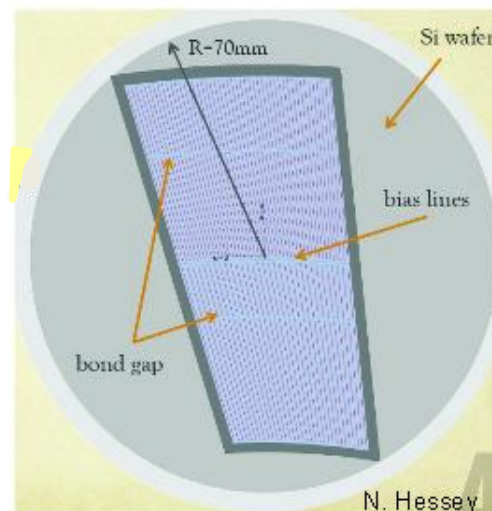
Válcový senzor

- velikost: 9.79 cm x 9.76 cm
- rozteč 75.5 μm , 1280 stripů
- 2 tvary senzorů:
 - délka stripů ~24 a ~48 mm
- úhel stripů +/- 26mrad



Diskový senzor

- vějířové uspořádání stripů
- stripy nesměřují do středu, ale jsou otočeny o malý úhel k zísání 2. souřadnice průletu
- 6 různých tvarů senzorů
 - délka stripů 15-60mm



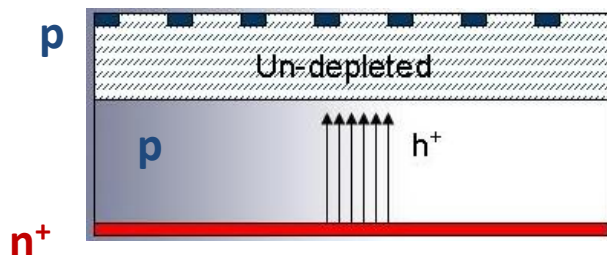
Rozměry stripů voleny aby "hit occupancy" <1%

Přehnané schema!

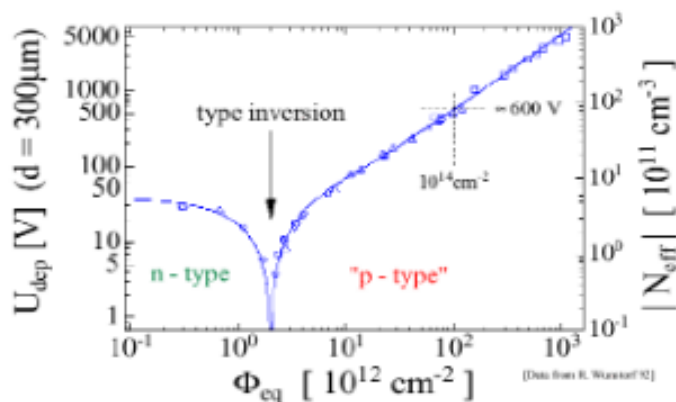
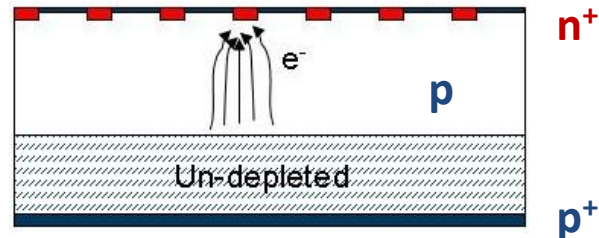
Výběr typu senzoru pro Upgrade

Senzor (p-in-n) v současném SCT

(po inverzi Si typu n na p)



Senzor (n-in-p) pro Strip ITk Upgrade



Radiační poškození vytváří v Si energetické úrovně akceptorového typu => změna Si typu n na typ p

Radiačně odolnější n-in-p

- sběr elektronů
 - jako v současném n -in- n pixel. detektoru
 - rychlejší signál
 - menší pravděpodobnost záchytu
- p-n přechod vždy na straně sběru signálu
 - bez změny typu Si
 - funguje i v režimu kdy není zcela vyprázdněn
- jednostranný litografický proces
 - ~50% levnější než n -in- n

Vývoj radiačně odolných stripových senzorů typu n -na- p

- FzU je členem mezinárodní skupiny “**ATLAS ITk Strip Sensor Collaboration**”, která vyvinula ve spolupráci s **HAMAMATSU Photonics (Japan)** nový radiačně odolný stripový senzor typu n^+ -in- p vhodný pro radiační úrovně v ITk na HL-LHC

• Senzor:

- n^+ - in - p (FZ) <100>
- kapacitně vázané n -stripy s vyčítacími stripy
- n -stripy biasovány přes polysilikonové odpory
- hlavní senzor (9.75cmx9.75cm) obklopen mini senzory
- rozteč 74.5 μm , 1280 stripů ve 4 segmentech
- společná p -stop izolace (4e12 ions/cm²)

Verze **ATLAS07:**

- 6 typů různých izolací n -stripů
- popis vlastností velkoplošného senzoru a ozářených mini senzorů ve 4 článcích v *Nucl. Instr. and Meth. A636* (2011) spoluautoři z FzU AV: J. Bohm, M. Míkestikova

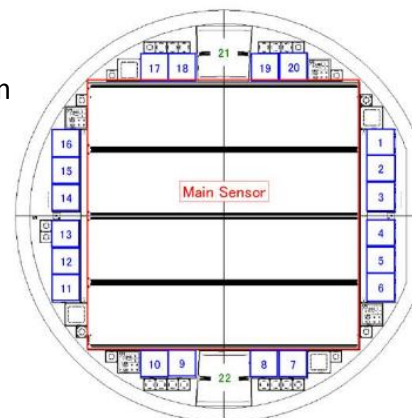
Verze **ATLAS12:**

New features from 07 design:

- implementation of 2 dicing lines
- **a new gated PTP structure in main sensor**
- bonding pads modified for the new ASIC readout
- end-cap mini sensors for irradiation studies

ATLAS12A Wafer Layout

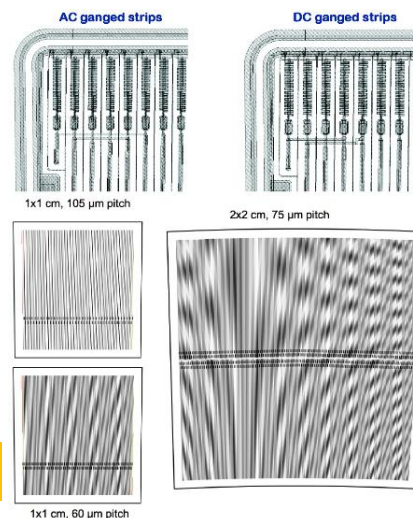
6-inch
320 μm



1	BZ1 (PTP 10 μm)
2	BZ3C
3	BZ3F
4	BZ3C
5	BZ3F
6	BZ3C-unpassivation
7	EC-small pitch-C (AC gang)
8	EC-large pitch-C (AC gang)
9	EC-large pitch-C (AC gang)
10	EC-large pitch-E (AC gang)
11	BZ1 (PTP 10 μm)
12	BZ3C
13	BZ3F
14	BZ3C
15	BZ3C
16	BZ3C-unpassivation
17	EC-small pitch-C (DC gang)
18	EC-small pitch-E (DC gang)
19	EC-large pitch-C (DC gang)
20	EC-large pitch-E (DC gang)
21	EC-skewed-C
22	EC-skewed-E

- Main sensor at the center of the wafer
- 1-24 Baby sensors in the peripheral of the main sensor

[Y. Unno et al. Nucl. Instr. Meth. A765 (2014) 80-90]



Diskové mini senzory

ATLAS12 sensor evaluation program

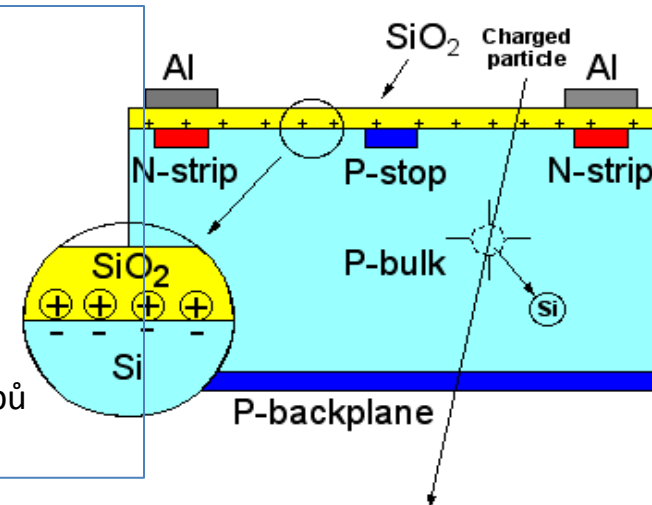
➤ Ověřování vlastností senzorů ATLAS12 před a po ozáření v několika světových institutech

- Large Sensors before irradiation (Cambridge, UCSanta Cruz), B. Hommels
 - sensor shape, IV, CV, Inter-strip characteristics
 - Full strip tests
- Bulk radiation hardness (Ljubljana, Liverpool, KEK/Tsukuba, Freiburg, Valencia, Cambridge), K. Hara
 - Charge collection, Edge TCT (Transient Current Technique)
- Surface radiation studies (Prague, UCSC, Freiburg, Lancaster, Tsukuba), M. Mikestikova
 - Cinter, Rinter, PTP
- Forward sensor studies (Valencia, Freiburg), R. Mori
 - Laser scans, Strip ganging performance
- Embedded pitch adapters (Barcelona), M. Ullan

➤ Ozařování prováděno do dvojnásobné maximální fluence očekávané v ITk ($2 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$) různými částicemi a energiemi

Radiační poškození křemíkových senzorů:

- **objemové**
 - > zvětšení závěrného proudu
 - > změna napětí úplného ochuzení
 - > změna účinnosti sběru náboje
- **povrchové**
 - > akumulace kladných nábojů a pastí v SiO_2 a na rozhraní Si- SiO_2
 - > vytvoření elektronové akumulační vrstvy na rozhraní Si- SiO_2
 - > indukce vodivých kanálů v Si- SiO_2 => zkraty implantovaných stripů
 - > ovlivní napětí průrazu (breakdown voltage)



Irradiation for surface studies

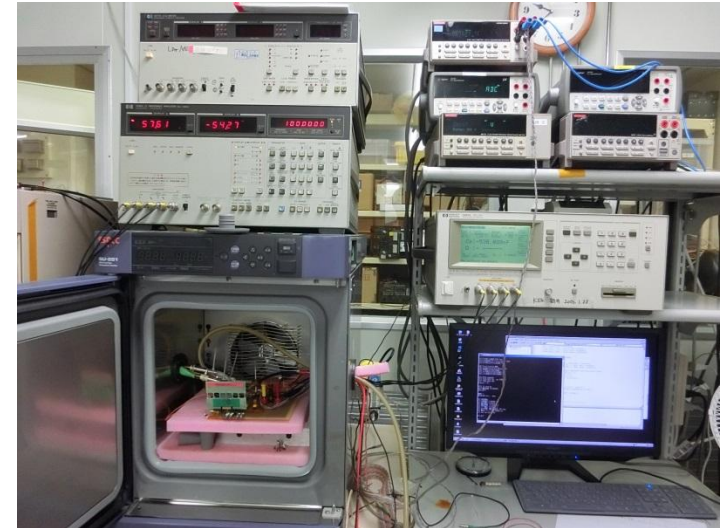
- ATLAS12A end-cap and barrel mini sensors irradiation:
 - **gammas** (^{60}Co) at BNL and **UJP Prague** to 1MGy
 - **protons (27 MeV)** at Birmingham, UK fluences 1E12- 1E16 $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - **(25 MeV)** at Karlsruhe Inst. Tech., DE
 - **(70 MeV)** at CYRIC, Tohoku University, JPN
 - **neutrons** – JSI Ljubljana reactor, SLO: fluences 1E15 $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- ATLAS12A, A12M and A07 barrel mini sensors irradiation (for comparison):
 - **protons** CYRIC, fluences 1E14- 1E16 $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

Barrel TYPE	PTP	FDV [V]	Dicing cut	Strip isolation
ATLAS12A	C	~350	standard (950 μm)	p-stop 4E12
ATLAS12A	F	~350	standard	p-stop 4E12
ATLAS12M	C	~225	slim (450 μm)-inner cut	p-stop 4E12
ATLAS07	F	~200	standard	p-stop 4E12

Electrical tests of irradiated ATLAS12 mini sensors

~200 mini sensors of different types tested for surface studies in:

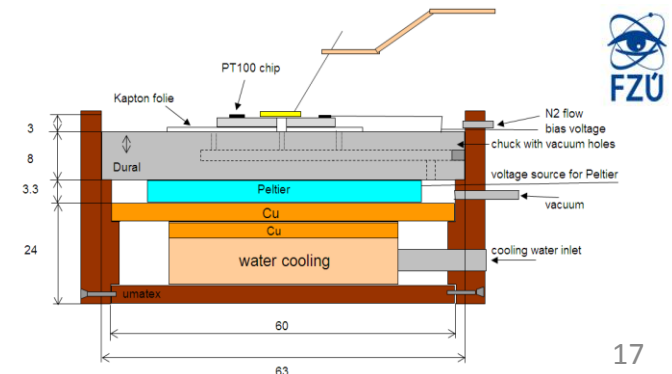
- **IoP AS, Prague** (Řešitelský tým z FzU: M.Mikeščíková, J. Šťastný, Z. Kotek, od 2015 J.Kroll)
- **UC Santa Cruz**
- **U. Tsukuba**
- **U. Freiburg**
- **Lancaster U**
- **IFIC Valencia**



- IV (current, breakdown voltage)
- Inter-strip Capacitance (C_{int})
- Inter-strip Resistance (R_{int})
- Stability measurements
- Bias Resistance (R_{bias})
- Punch-through Protection (beam loss protection) effectiveness (PTP)

Measurement conditions:

- Sensors bonded to PCB board and tested in freezer (up to -50°C) or in probe station with cooled chuck (up to -30°C)
- Nitrogen environment (humidity $< 10\%$)



Silicon lab in IP ASCR Prague



Semi-Clean room (24 m²)

- with temperature and humidity control, vertical air flow,
- electrically conductive flooring

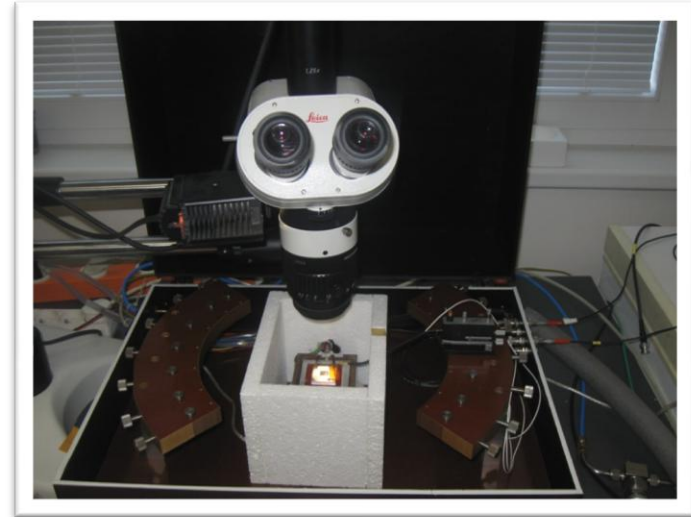
Laboratory Equipment of silicon lab in IP ASCR Prague

For Sensors tests

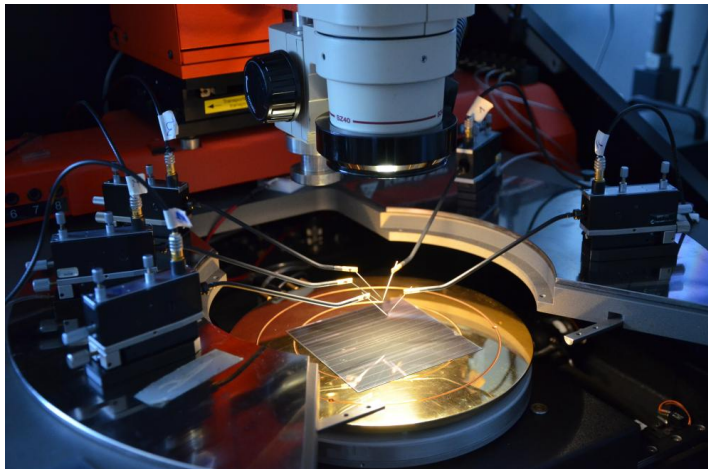


Automatic probe station KarlSuss PA200

equipped with probe heads with vacuum and magnetic support, microscope, video camera and monitor

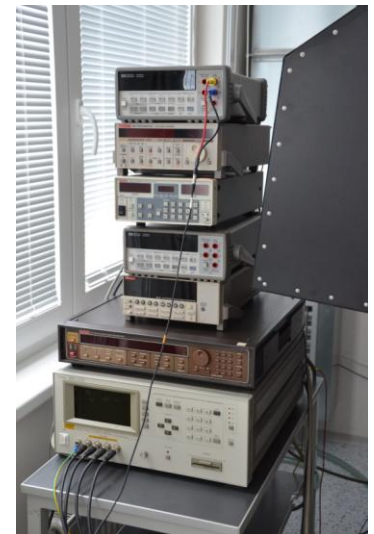


Manual probe-station with cooled chuck (-30°C)
Nitrogen flow in probe-station, humidity $< 5\%$



Measuring devices:

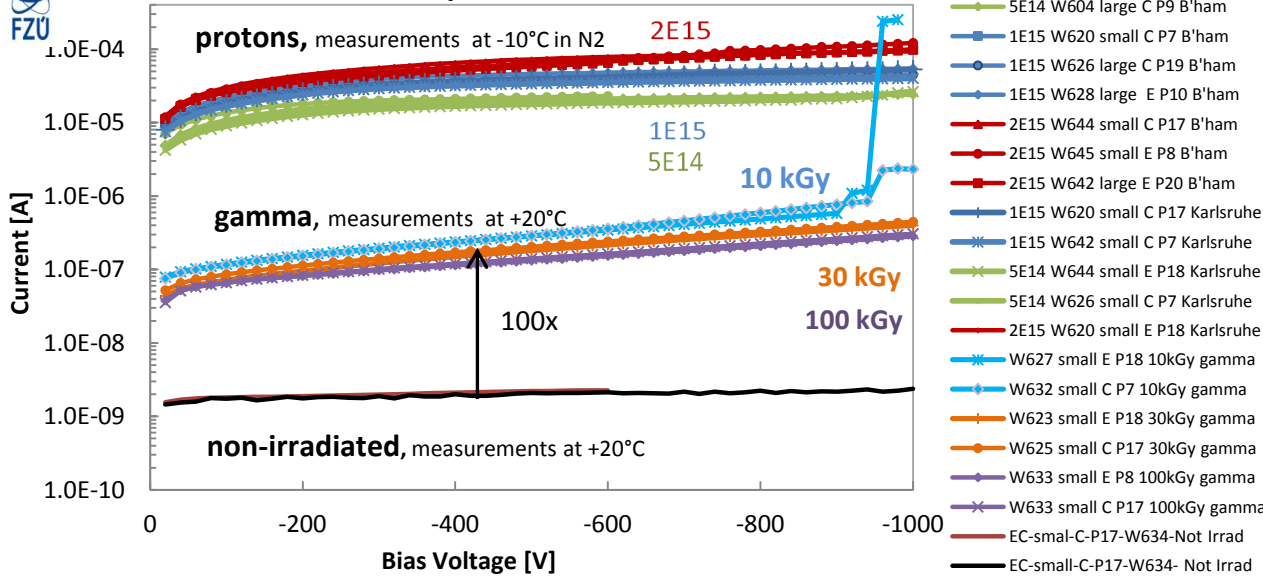
- LCR meter HP4284A
- SMU Keithley 237
- HP34401A multimeter
- Picoammeter Keithley 487
- Electrometer K6517A
- HV Supply K248 up to 3000V



Total Leakage Current: Pre- and post proton and gamma irradiation ATLAS12 mini sensors



End-Cap mini's ATLAS12A



Non-irradiated:

- Very low current $I = 4.8 \pm 1.5 \text{ nA/cm}^2$ (average of 28 EC minis)
- Tech. spec. $< 2 \mu\text{A/cm}^2$ (600V)
- Breakdown voltage $> 600/1000\text{V}$

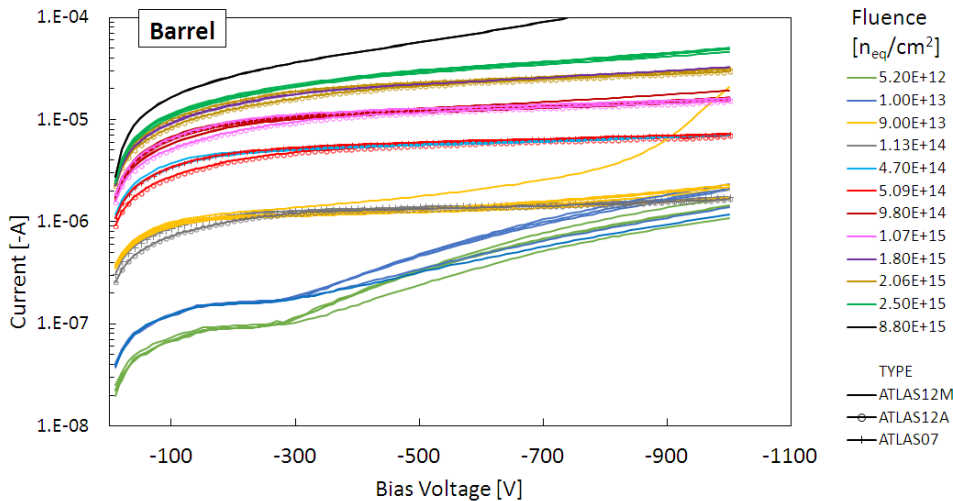
Proton-irradiated:

- $I = 114 \mu\text{A/cm}^2$ for $2\text{E}15 \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ (-10°C)
- Breakdown voltage $> 1000\text{V}$

Gamma-irradiated:

- 100 x current increase
- The higher the gamma dose the lower the current - subject of further studies.

Barrel mini's - CYRIC proton irradiation



All type of EC and barrel sensors before and after irradiation have a high micro-discharge breakdown, well above the maximum operational voltage (500V).

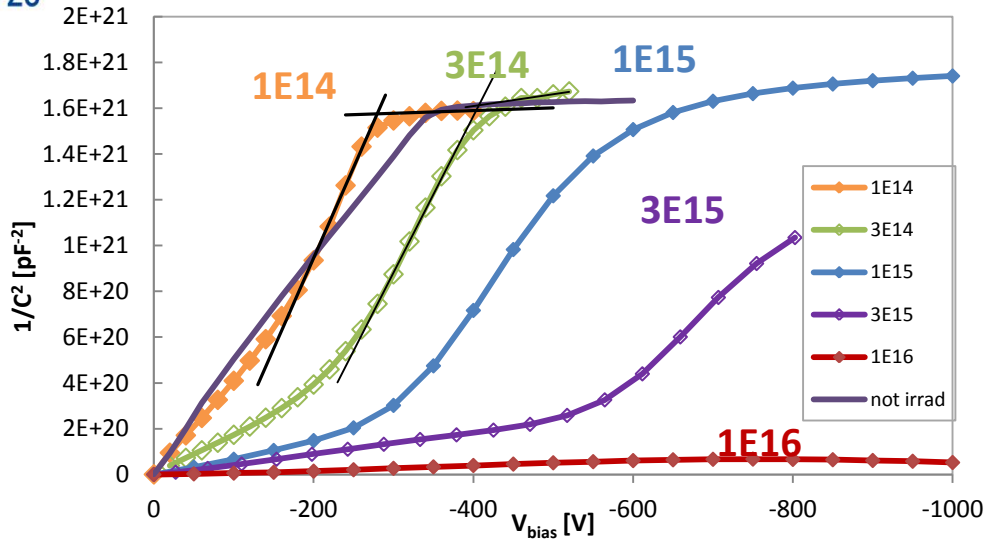
Sensor stability not influenced by:

- PTP structure type,
- strip pitch,
- strip ganging,
- wafer.

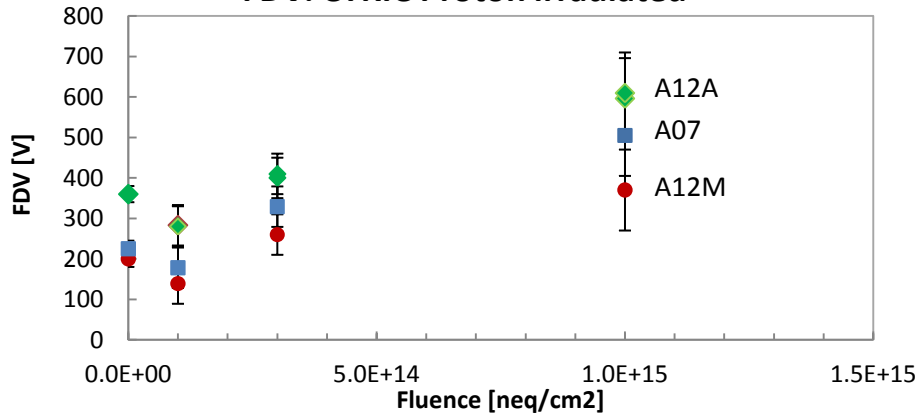
CV characteristics for Full depletion voltage (FDV) estimation



1/C² ATLAS12A CYRIC Proton Irradiated



FDV: CYRIC Proton irradiated



FDV extracted from CV characteristics as crossing of the part of rising straight line of $1/C^2$ and the saturated value

Non-irradiated:

- $FDV = 354 \pm 20$ V (average value of 28 EC mini's)
- Resistivity: $\rho = 2.8 \pm 0.15$ $k\Omega \cdot cm$, calculated from:
 $\rho = d^2 / (2\epsilon \cdot \mu \cdot V_{FD})$, $d = 302 \mu m$ is active thickness

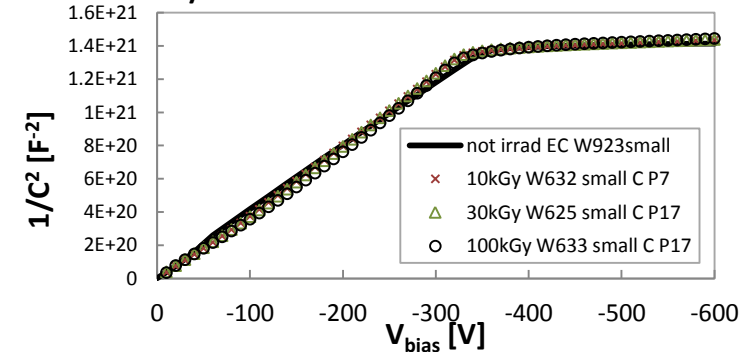
Protons:

- FDV increases with increasing fluence
- little variation at low fluence - FDV decreases up to $1E14$ n_{eq}/cm^2 (hypothesis: initial acceptor removal process in p-type Si)
- $FDV > 1000V$ for $3E15$ and $1E16$ n_{eq}/cm^2 (expected for $302 \mu m$ silicon)

Gamma:

- FDV and thus effective doping concentration (N_{eff}) are independent on gamma irradiation.

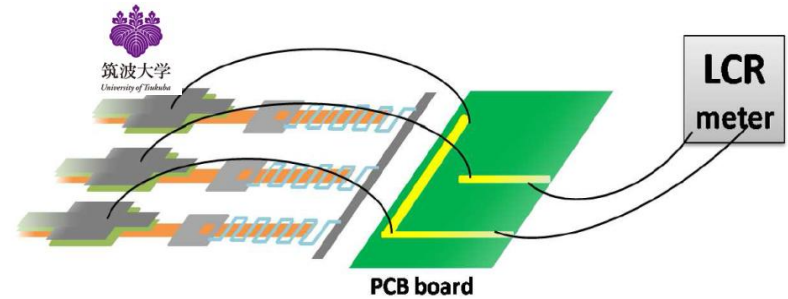
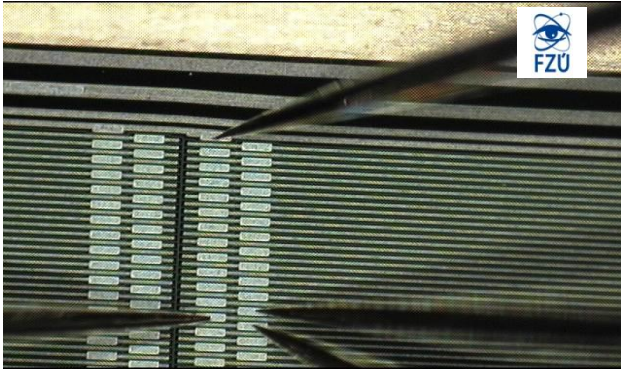
1/C² ATLAS12A-EC- Gamma Irradiated



The operational voltage in ITk will be max 500V, n-in-p sensors will be operated under partial depletion

Inter-Strip Capacitance

- C_{int} contributes to the input capacitance of FE electronics and determines the noise level of the detector
- C_{int} measured by LCR meter between the central strip and its first neighbors (others floating)
- next 2nd and 3th neighbors add $\sim 10\%$

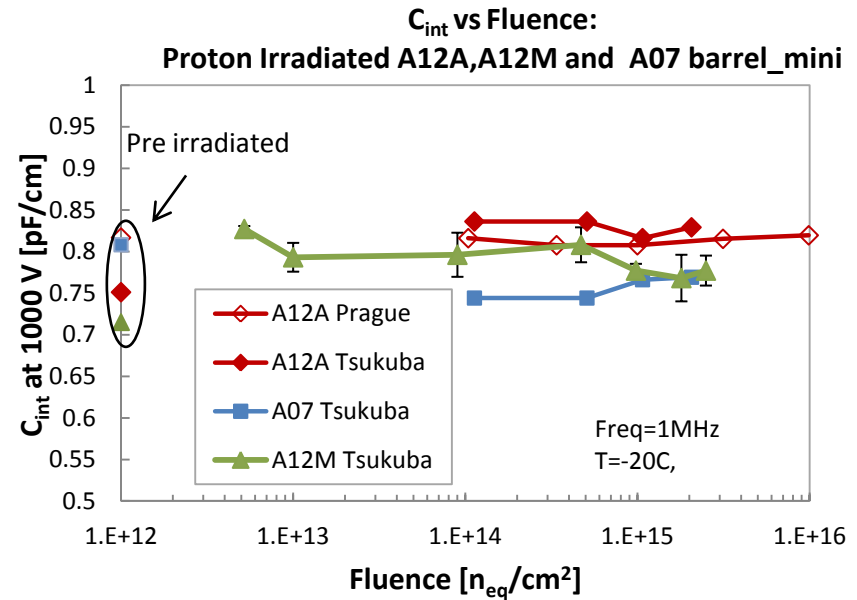


ATLAS12A	Average pitch [μm]	C_{int}/cm [pF] 100kHz, CPRP
Barrel mini	74.5	0.76 ± 0.02
EC Small pitch	64.3	0.79 ± 0.01
EC Large pitch	103.4	0.55 ± 0.01
EC Skewed	69.4 S2 66.1 S1	0.74 ± 0.01 0.76 ± 0.01

average values of 25 sensors (Freiburg, Prague, Santa Cruz and Tsukuba)

All tested sensors : $C_{int} < 0.85 \text{ pF/cm}$ (**Spec. $< 0.9 \text{ pF/cm}$**)

- no radiation induced change of C_{int} at V_{bias} above FDV
- no PTP type dependence
- no wafer type dependence

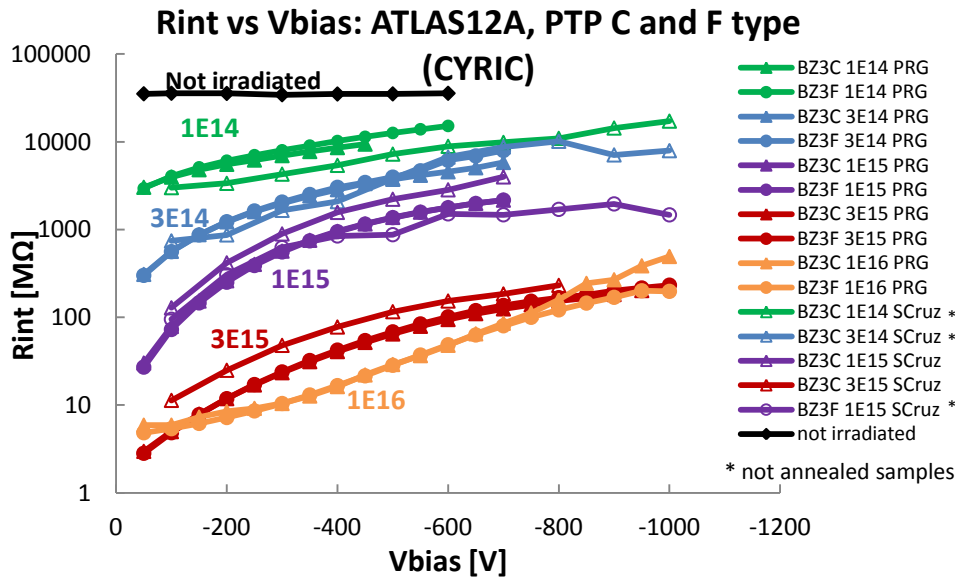
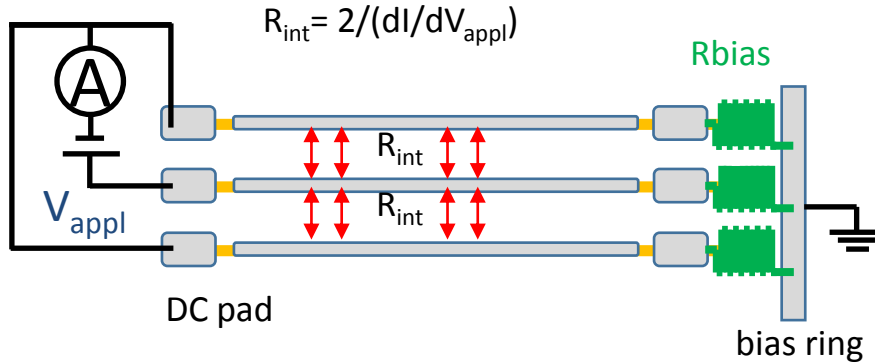


Inter-Strip Resistance

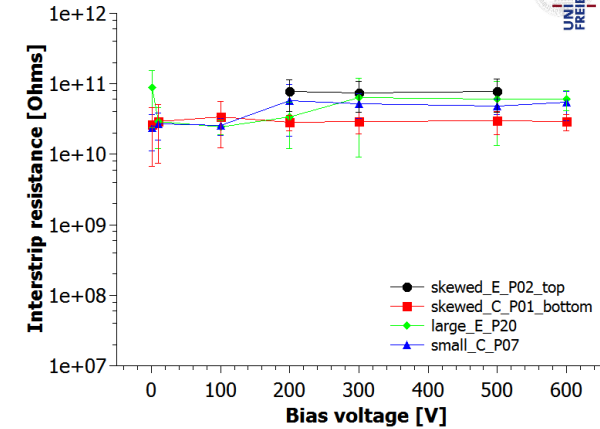
R_{int} measurements - verification of neighboring strips isolation

Measuring method:

- 3 adjacent DC pads are contacted. On the central strip is applied voltage V_{appl} by SMU, the current is measured on the outer strips.



Interstrip resistance
HPK_mini_ATLAS12A_EC



Summary for not irradiated sensors:

- R_{int}/strip = 18-78 GΩ
- Values in GΩ range agree with Spec: R_{int} > 15 MΩ
- R_{int} is independent on V_{bias}

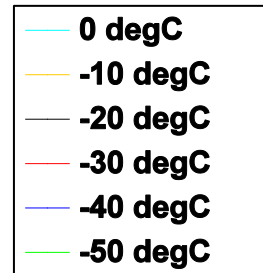
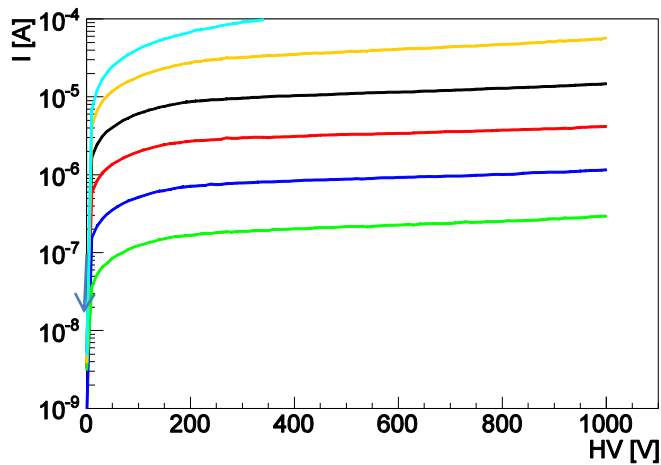
Proton irradiated sensors:

R_{int} decreases with increasing fluence and increases with bias voltage
Bias field reduces conductivity between strips

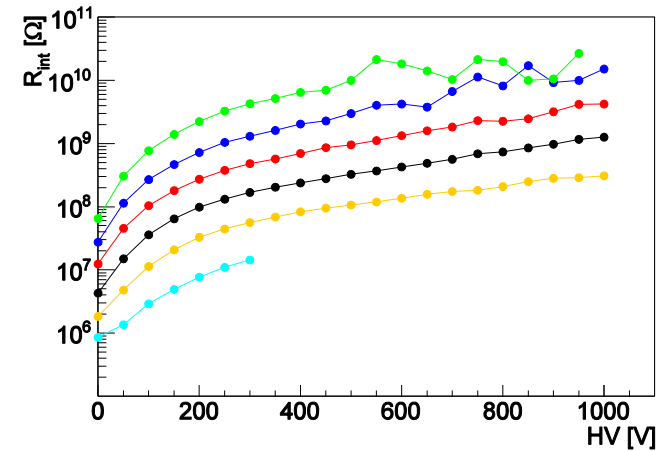
Temperature dependence of R_{int}

- Inter-strip resistance of irradiated sensors is temperature dependent
- Inter-strip current has the same temperature dependence as bulk generation current
- all R_{int} data in this talk are normalized to -20°C $R(T_{-20})=R(T_M)*(T_{-20}/T_M)^2*\exp[-E/2k_B*(1/T_{-20}-1/T_M)]$
with energy $E=1.2\text{eV}$

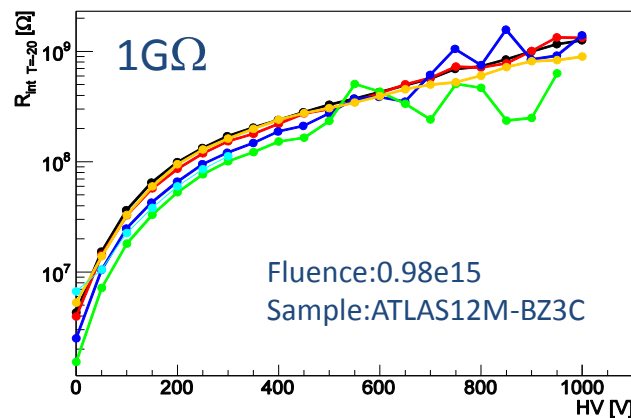
I-V: temperature dep.



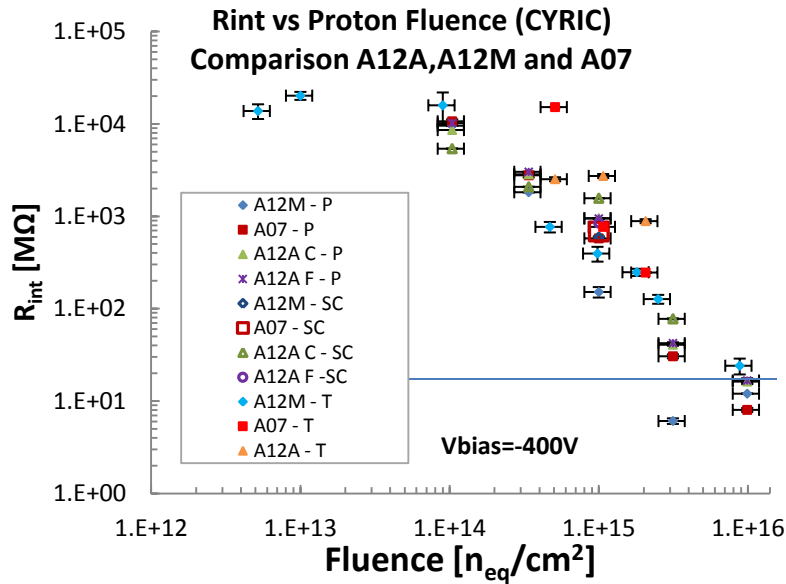
R_{int} at different temperatures



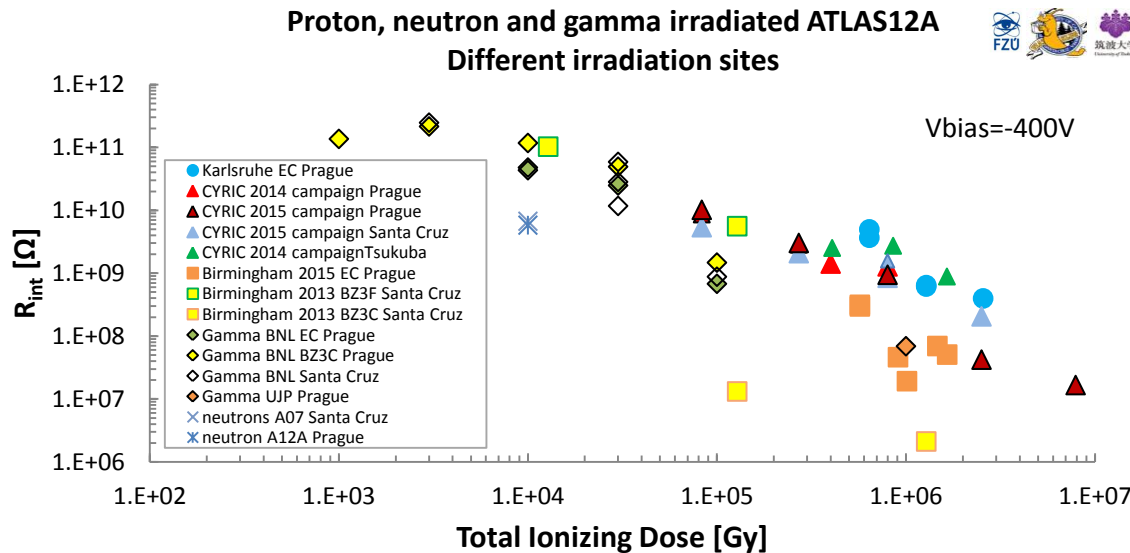
R_{int} normalized to -20°C



Inter-Strip Resistance – Irradiated sensors



- R_{int} decreases with increasing fluence
- All sensor types A12A/A12M/A07 – same degradation with proton fluence
- No influence of PTP structure type
- R_{int} values exceed the minimum limit ($10 \times R_{bias} \approx 15 \text{ M}\Omega$) required in specs up to $3 \times 10^{15} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$
- Up to $1 \times 10^{16} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ R_{int} still larger than the amplifier's input impedance (kΩ)

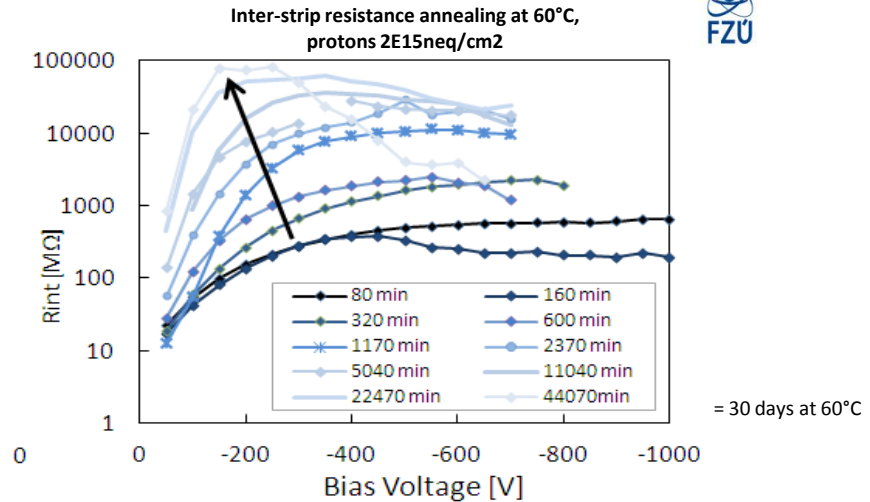
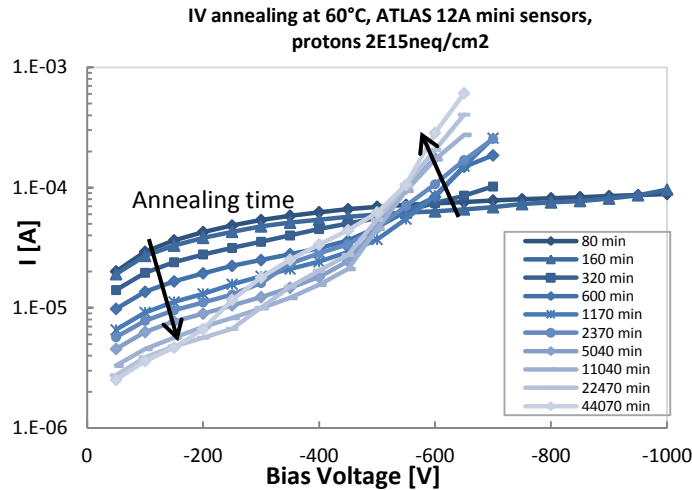


Total Ionizing dose (TID) vs R_{int}

- Most sensors have similar degradation of R_{int} with TID (except samples from Birmingham 2013 campaign – low energy proton background)
- Suggesting the ionizing dose is the dominant factor for R_{int}

Annealing of R_{int} at 60°C

Karlsruhe proton irradiation



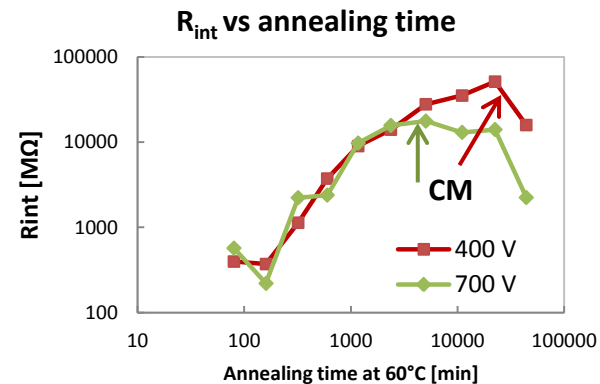
Annealing of Leakage current

- At low V_{bias} current decreases in time
- At high V_{bias} current increases with annealing due to charge multiplication (CM)
- With annealing time the space charge concentration rises and higher electric field near strips causes CM [I. Mandic, NIMA629 (2011) 101]
- With longer annealing time multiplication starts at lower bias voltages

Annealing of Inter-strip resistance

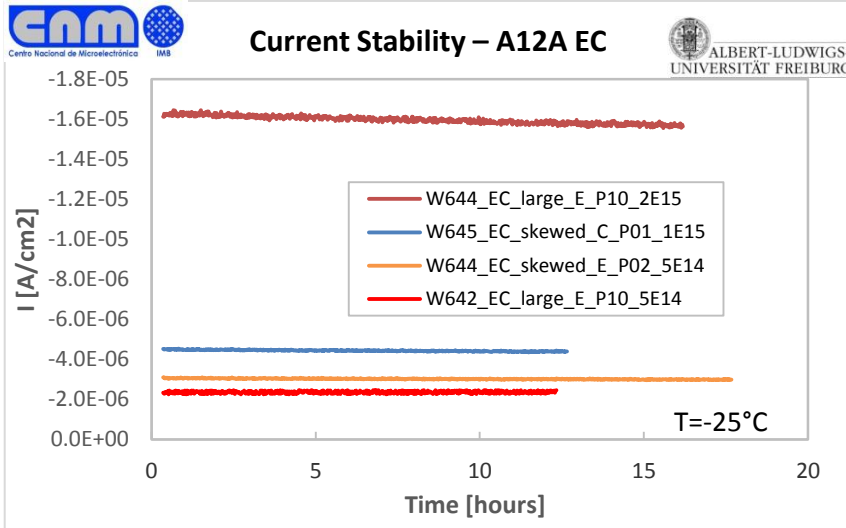
- R_{int} increases with annealing time significantly as the leakage current decreases
- Annealing 5000 min causes R_{int} increase to pre-rad value but the leakage current is still 4 orders of magnitude higher than before irradiation

Charge multiplication near the strips influences the R_{int} at 700V after annealing time 5000 min and at 400V at > 22000 min



Stability measurements

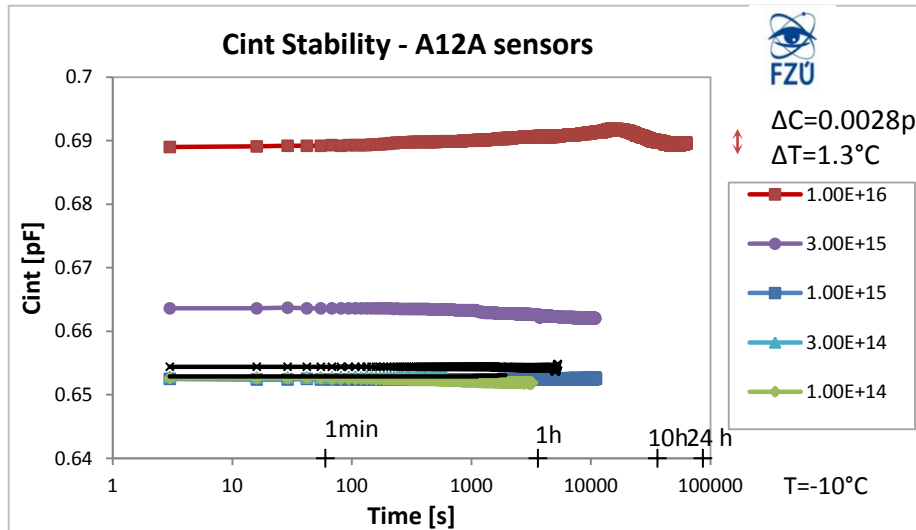
B'ham proton irradiation



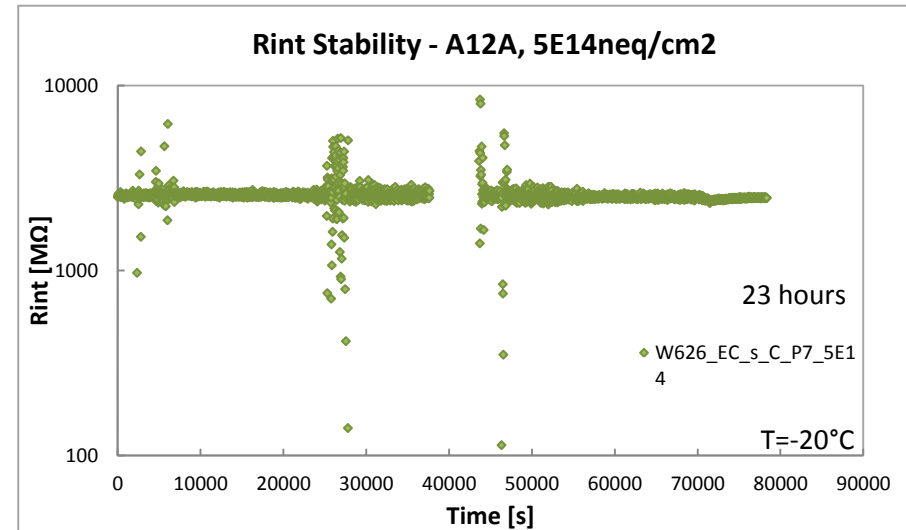
Leakage current, C_{int} and R_{int} are stable in time

- Measurements at cold, rel. humidity <10% (N2 flow)
- after annealing 80min at 60°C
- Current: Relatively small decrease ~3% in 16 hours (some sensors)
- Agrees with previous studies with SCT sensors
- C_{int} changes copies the temperature changes
- Instabilities in R_{int} are not caused by instabilities in sensor but in set-up (e.g. external electromagnetic disturbance of measuring devices)

CYRIC proton irradiation

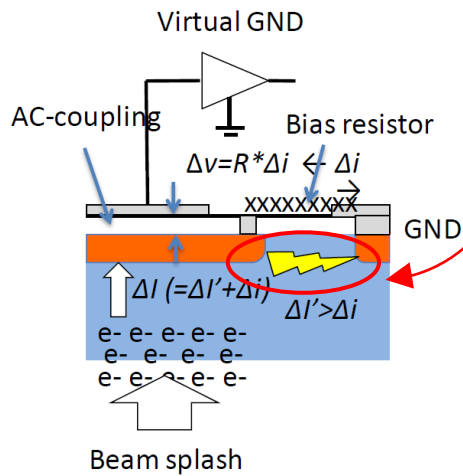


Karlsruhe proton irradiation



Punch –Through Protection Structure

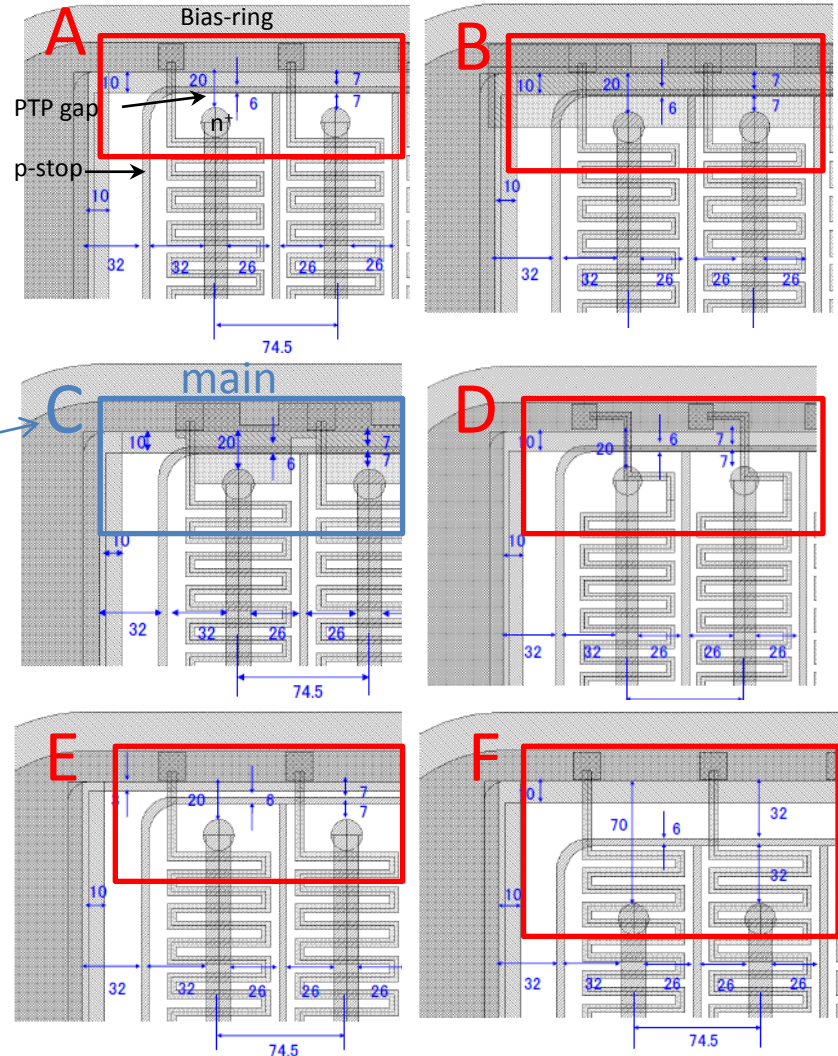
PTP structures: to protect the AC coupling capacitors against large signal current, induced for example by beam splash



AC-coupling capacitors are tested to hold-off ~100V

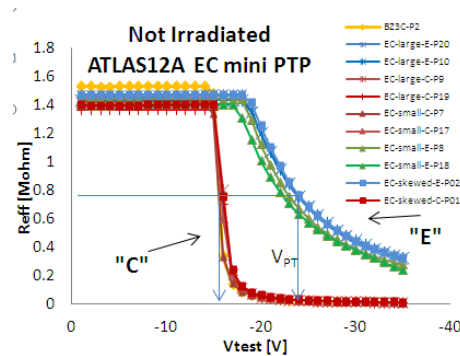
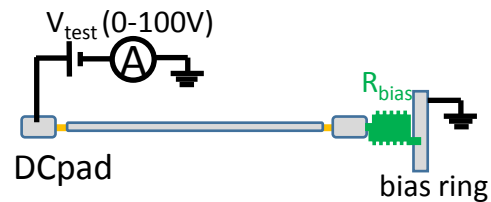
PTP structure with full gate coverage in main ATLAS12

PTP designs



The effectiveness of PTP structure was measured using:

- DC method

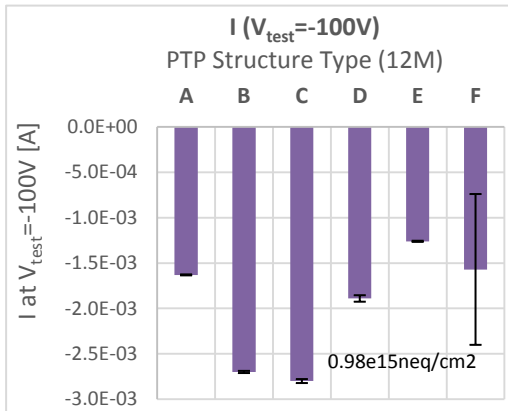
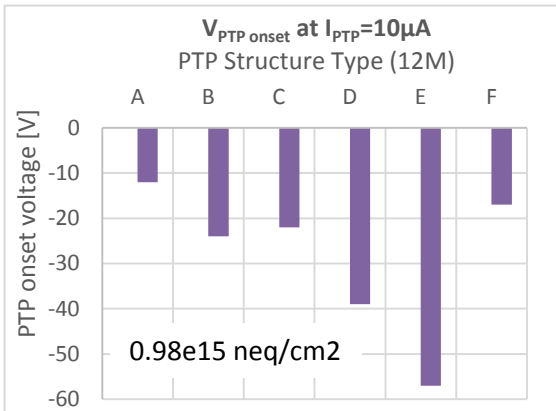


$$Reff = V_{test} / I_{test}$$

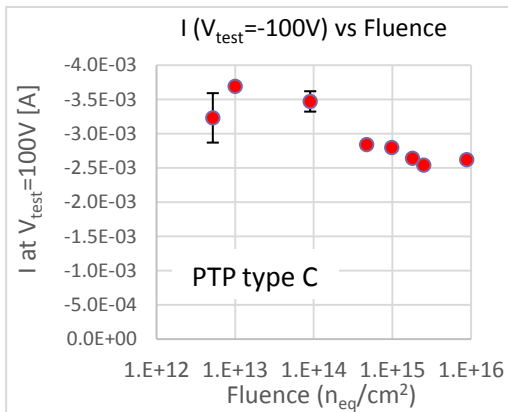
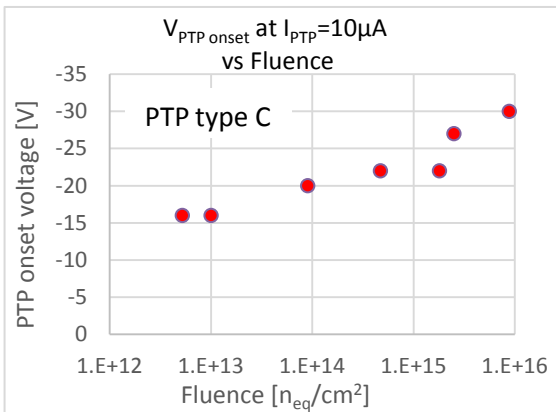
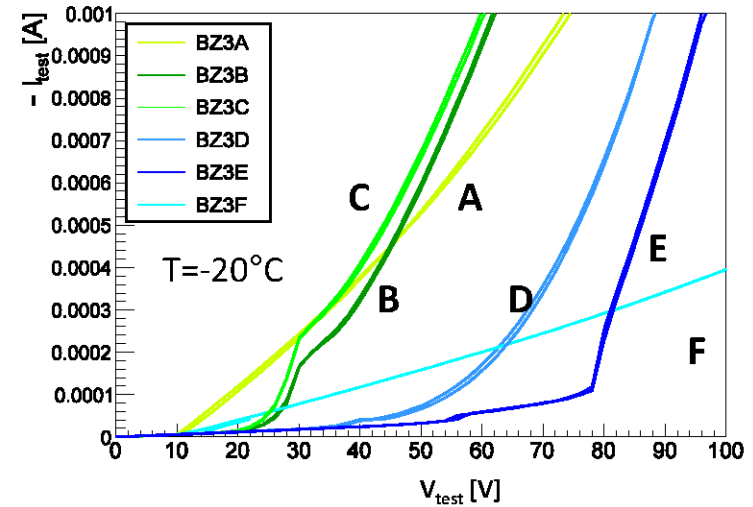
PTP - Structure dependence

Very good performance of “C” type (full gate) structure also after proton irradiation:

- steep increase in current
- small PTP onset voltage ($\sim 20V$)
- largest current at $V_{PTP}=-100V$.



PTP: ATLAS12M, HV:-1000V & Fluence: 0.98e15



The novel full gate PTP structure “C” doubles the allowable current without increasing the onset voltage.

modest increase of $V_{PTP\ onset}$ up to 2×10^{16}
 $V_{PTP\ onset} < 25V$

large $I (V_{TEST}=-100V)$ even at 1×10^{16}
 $2.5mA=2.5mC/s= 6e11$ mips/s/strip

Surface studies conclusions

Surface properties of ATLAS12 n⁺-in-n strip sensors intended for upgraded ATLAS Itk fabricated by Hamamatsu were evaluated by several participating institutes before and after irradiation to verify if they can cope with predicted high radiation environment:

- **High micro-discharge breakdown** > the maximum operational voltage (before and after irradiation)
- **Interstrip capacitance** < 0.9pF/cm and does not change with irradiation
- **Interstrip resistance** - decreases with proton and gamma irradiations
 - is temperature dependent and changes with annealing, both through leakage current
 - **however for HL-LHC fluences the strip isolation is sufficient**
- **Bias resistance** - slightly increasing with proton fluence, agrees with specs up to fluence 3E15n_{eq}/cm²
- **Punch through protection** - is efficient after irradiation 2E15n_{eq}/cm².

ATLAS12 sensor shows appropriate performance for operation in ATLAS Upgrade ITK

	Pre- radiation	Protons 1×10 ¹⁵ [n _{eq} /cm ²]	Protons 2×10 ¹⁵ [n _{eq} /cm ²]	Gamma 100kGy
Leakage current [μA/cm ²] (at V _{bias} =600V)	<0.0048 (+20°C)	51 (-10°C)	103 (-10°C)	0.22 (+20°C)
Inter-strip capacitance [pF/cm] (at 1MHz)	0.75-0.82	0.82	0.82	0.77
Coupling Capacitance [pF/cm] (at 1kHz)	24	24	24	-
Inter-strip resistance [GΩ/cm] (at V _{bias} =400V)	15-65 (+20°C)	0.5-2.2 (-20°C)	0.3-0.7 (-20°C)	0.0086 (+20°C) 0.6-1.1 (-20°C)
Bias resistance [MΩ]	1.5±0.1 (+23°C) 1.7-1.8 (-10,-20°C)	2.0 (-20°C)	2.1 (-20°C)	1.7 (+23°C)

Výsledky studia radiační odolnosti

Prezentace a publikace

- **10th Hiroshima symposium on the Development and Application of Semiconductor Devices, Xian, China, 2015:** „*Study of surface properties of ATLAS12 Strip Sensors and their Radiation Resistance*“, (M. Mikeščíková)
- **RD50 workshops 2013, 2014, 2015** (Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders), M. Mikeščíková, Z.Kotek, J. Šťastný:
- **Strip Sensor meetings**, Vidyo Meetings
- **Inner Tracker weeks**, CERN
- **ATLAS Upgrade weeks**, CERN

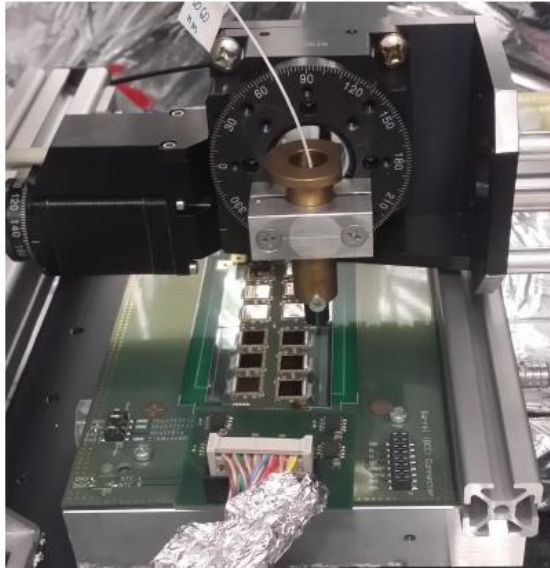
Publikace:

- *M. Mikeščíková, J. Šťastný, Z. Kotek: Evaluation of Bulk and Surface Radiation Damage of Silicon Sensors for the ATLAS Upgrade*, PoS Vertex2014 (2015) 050, Conference: C14-09-15.2 Proceedings
- *M. Mikeščíková, ...J.Bohm, J.Stastny, Z.Dolezal, P.Kodys: Study of surface properties of ATLAS12 strip sensors and their radiation resistance*, NIMA(2016) In Press
- *B. Hommels, Z.Dolezal, P.Kodys, J. Bohm, M.Mikeščíková, J. Stastny: Detailed studies of full-size ATLAS12 sensors* NIMA(2016) In Press
- *K.Hara, Z.Dolezal, P.Kodys, J. Bohm, M.Mikeščíková: Charge collection and field profile studies of heavily irradiated strip sensors for the ATLAS inner tracker upgrade* NIMA(2016) In Press
- *R. Mori, ... Z.Dolezal, P.Kodys, J. Bohm, M.Mikeščíková, J.Stastny: Evaluation of the performance of irradiated silicon strip sensors for the forward detector of the ATLAS Inner Tracker Upgrade upgrade* NIMA(2016) In Press
- *M.Ullan, ... Z.Dolezal, P.Kodys, J. Bohm, M.Mikeščíková: Embedded pitch adapters: A high-yield interconnection solution for strip sensors* NIMA(2016) In Press
- *Y.Unno, ... Z.Dolezal, P.Kodys, J. Bohm, M.Mikeščíková: Development of n⁺-in-p large-area silicon microstrip sensors for very high radiation environments – ATLAS12 design and initial results*, NIMA765(2014)p.80

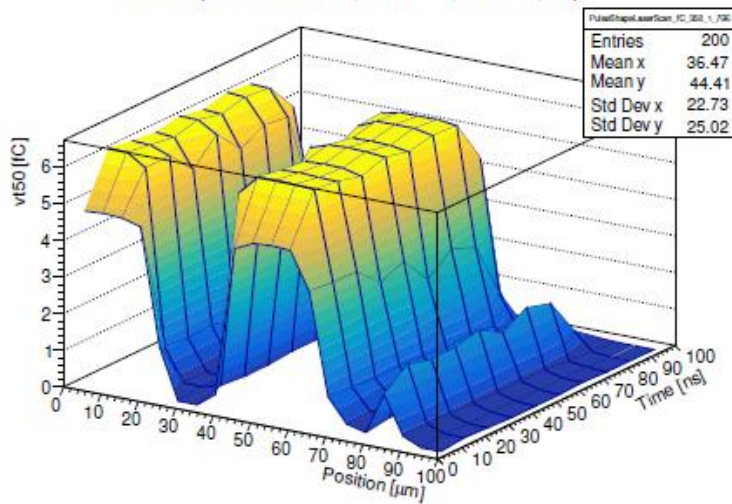
Laser a beta testy ITk testovacích stripových modulů

Jiří Kroll ve spolupráci s MFF UK (Z. Doležal, P. Kodyš, M. Sýkora)

Laser setup



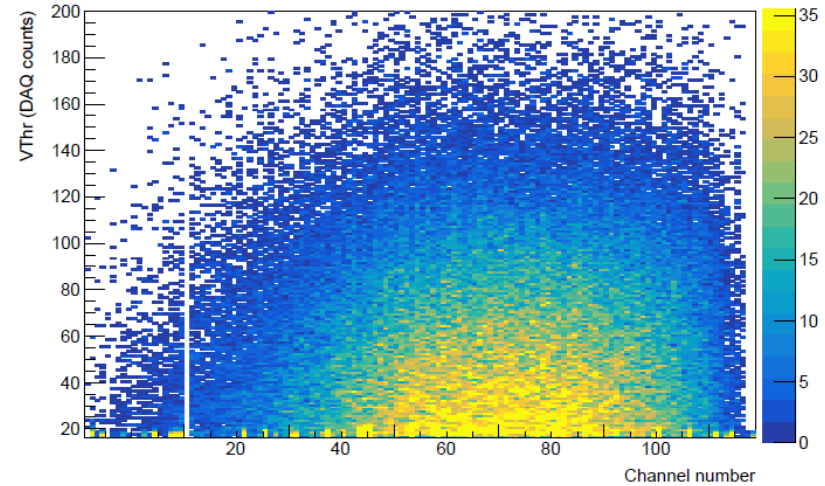
Pulse Shape Laser Scan in fC, RunNo 358, ScanNo 1, Strip 796



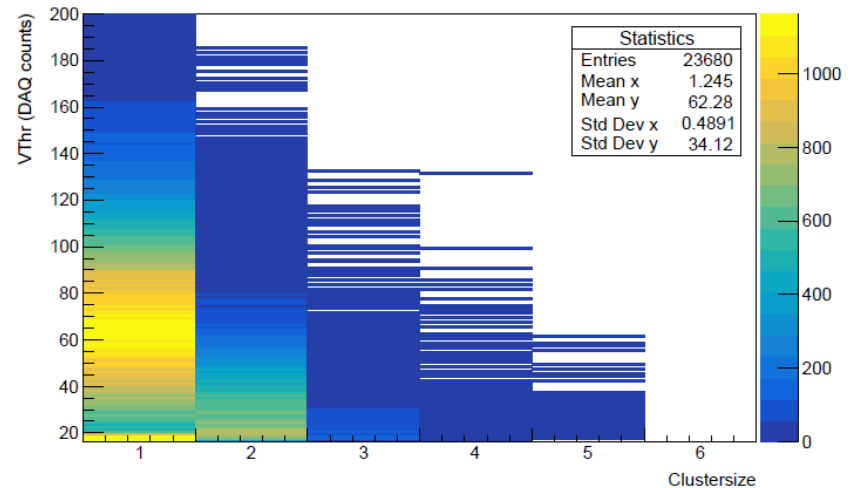
Beta source testy

Threshold scan

Channel hits for bias_400V_1500trg



Clustersize distribution for bias_400V_1500trg



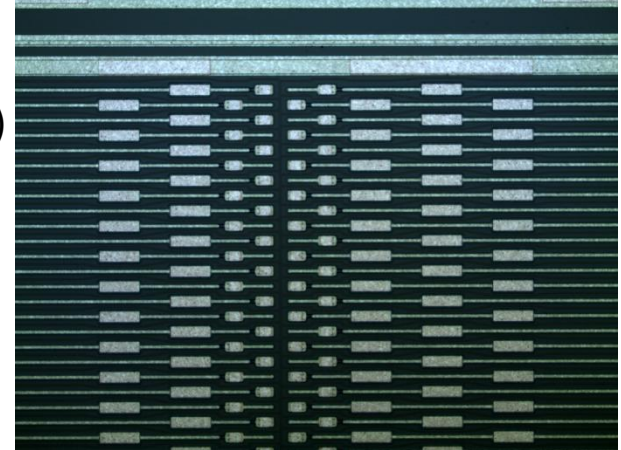
V rámci projektu ATLAS Itk Upgrade Phase II se Česká Republika zavázala dodat cca 1100 diskových stripových modulů. FZU se bude na tomto závazku významně podílet zejména v oblastech:

- 1. Testování velkoplošných stripových senzorů (tzv. QA quality assurance)**
- 2. Implementace metodiky sestavování modulů (modul = senzor + hybrid + ASICs)**
- 3. Testování kvality sestavených modulů (QA)**
 - Metrologické vlastnosti
 - Termomechanické vlastnosti
 - Elektronické vlastnosti

1. Testování stripových senzorů

Testování velkoplošných diskových senzorů - QA

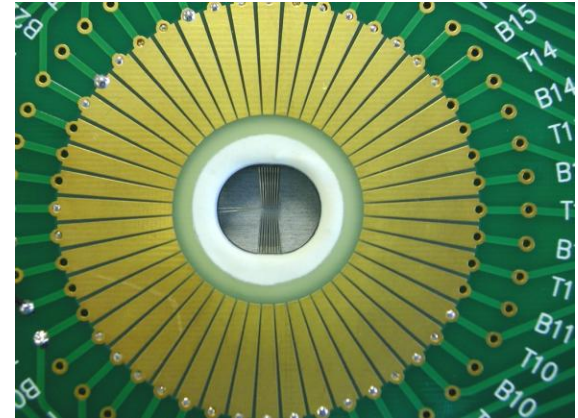
- Testy na 100% senzorů (ve FzU cca1100):
 - vizuální kontrola pod mikroskopem (defekty, poškrábání)
 - zkřivení senzoru
 - IV charakteristiky
 - Testy na cca 5-10% senzorů (ve FzU až 110)
 - Detailní testování všech stripů –
vazebná kapacita, svodový proud, bias rezistor..
 - 1 diskový senzor – počet stripů v závislosti na typu senzoru
např. R0 senzor: 4360stripů
 - Detailní testování všech stripů jednoho senzoru metodou strip-by-strip trvá
cca 12 hodin!
 - **zkrácení doby testování** pomocí 32 bodové sondy (~2.5hod)
 - zakoupení nutných komponent do automatické stanice a vytvoření softwaru pro ovládání automatického posuvu
- (Řešitelský tým M. Mikeščíková, J.Kroll, Z. Kotek, O. Korchak)



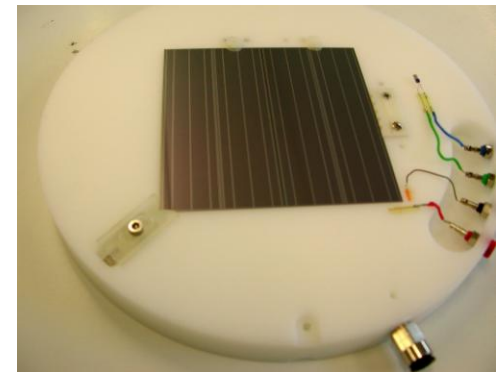
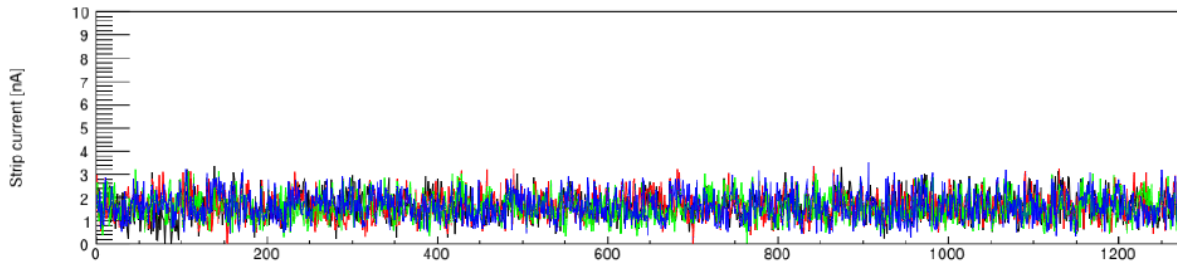
1. Testování stripových senzorů

Nutné komponenty k pořízení pro automatické testování s 32 bodovou sondou:

- Switch unit crate
- HighVoltage 12x4 switch matrix
- USB-GPIB adapter
- 2x dual 8:1 multiplexer units
- Probecard holder for probestation
- Probecard low leakage, 32 channel + edge sense



32 bodová sonda v Cambridge Uni



Vybudování čistého prostoru kolem probestation

Pokud se chce FZU kvalifikovat pro proces testování stripových senzorů, je nutné prokázat dostatečnou čistotu testovací laboratoře (ISO 7, třída10000)

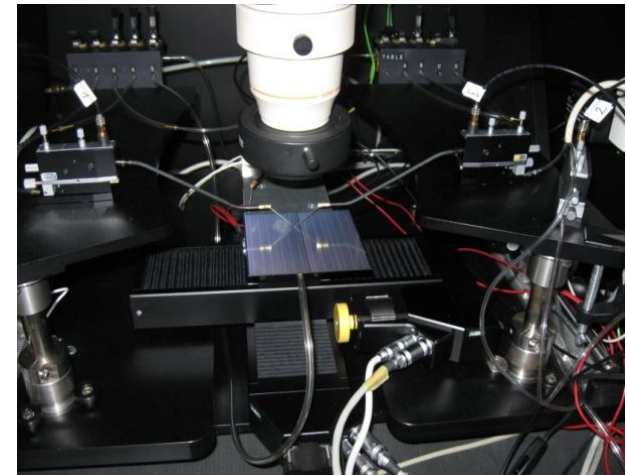
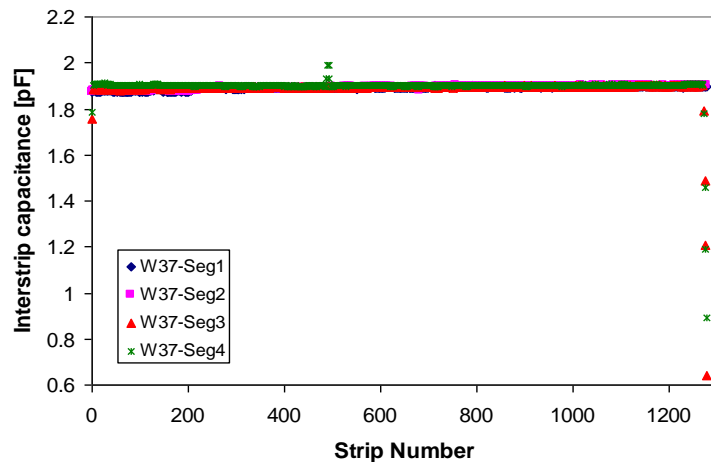
Řešení:

- Předělení čistého prostoru měření systémem překrývajících se PVC lamel.
- Pořízení laminárního flow- boxu

Testování prvních velkoplošných prototypů ve FZu

2009 – 2010:

- testování elektrických charakteristik prvních prototypů (verze ATLAS07) válcových senzorů (10x10cm)
- kvalifikační testy před ozářením.

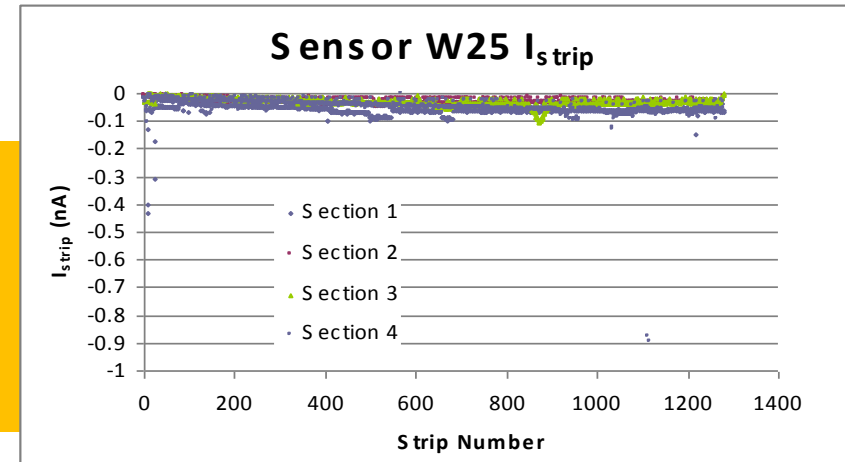


Z článku:

J. Bohm, M. Míkestiková, A.A. Affolder, P.P. Allport, ...

Z. Doležal, P. Kodyš, *et al.*

Evaluation of the bulk and strip characteristics of large area n-in-p silicon sensors intended for a very high radiation environment, NIM A636,S104-S110,2011

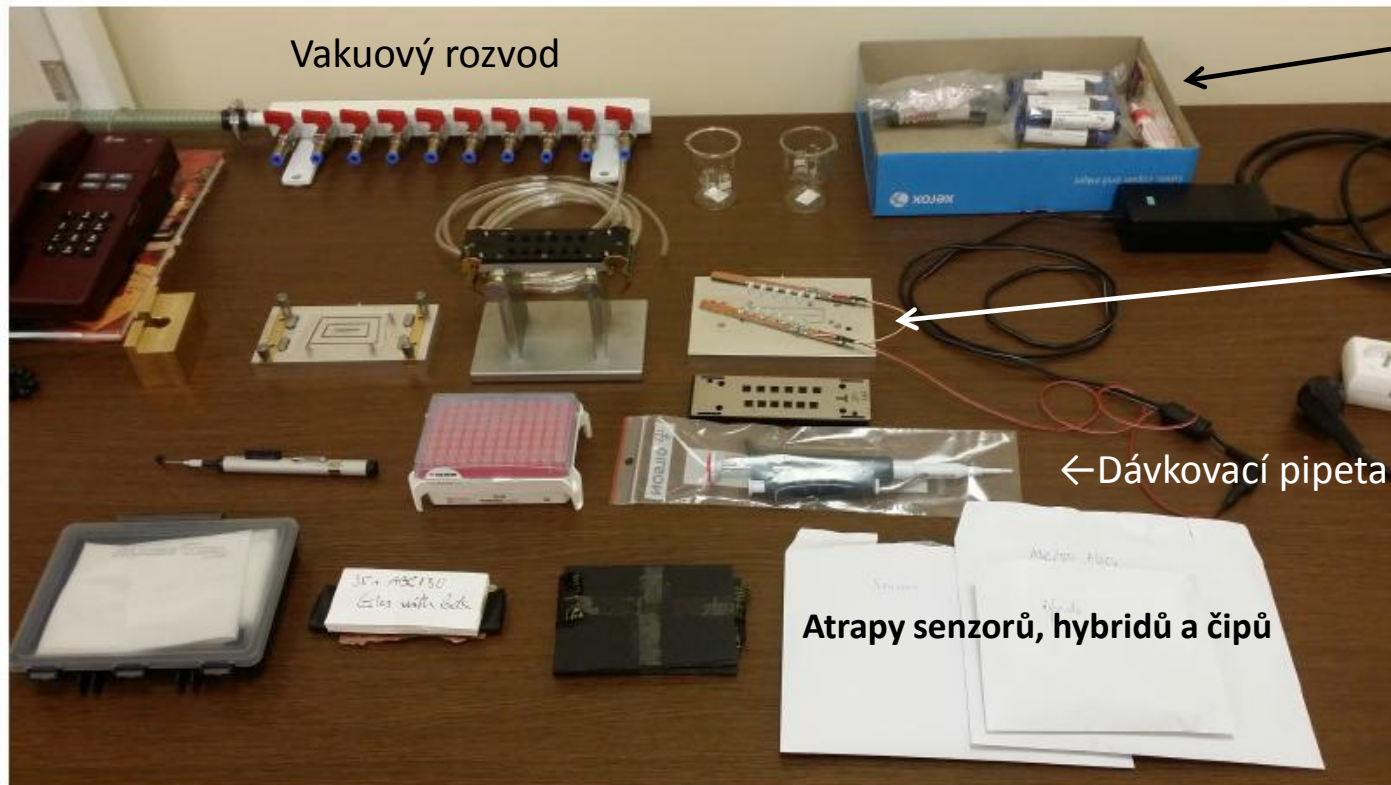


2. Metodika sestavování modulů

Hlavní koordinátor Jiří Kroll

Příprava na sestavování ITk stripových modulů na FZÚ

- kompletní setup pro testování lepení ITk stripových modulů byl připraven na FZÚ (Zdeněk K., Jiří K., Marcela M.)



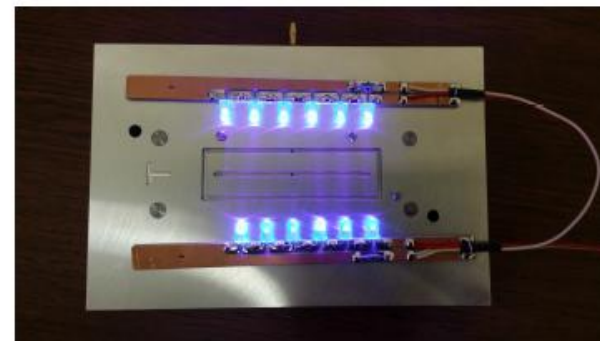
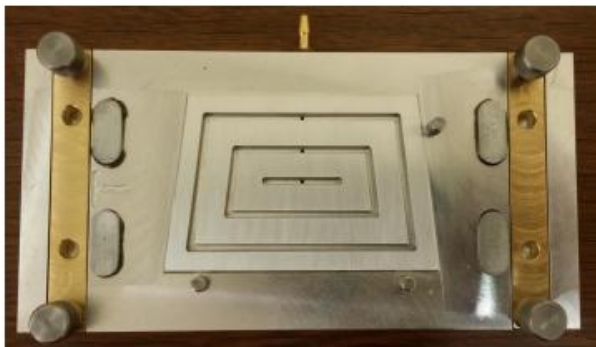
2. Metodika sestavování modulů

Příprava na sestavování ITk stripových modulů na FZÚ

- detail vybraných komponent



Jigy pro sestavování modulů



2. Metodika sestavování modulů

Příprava na sestavování ITk stripových modulů na FZÚ

- detail vybraných komponent



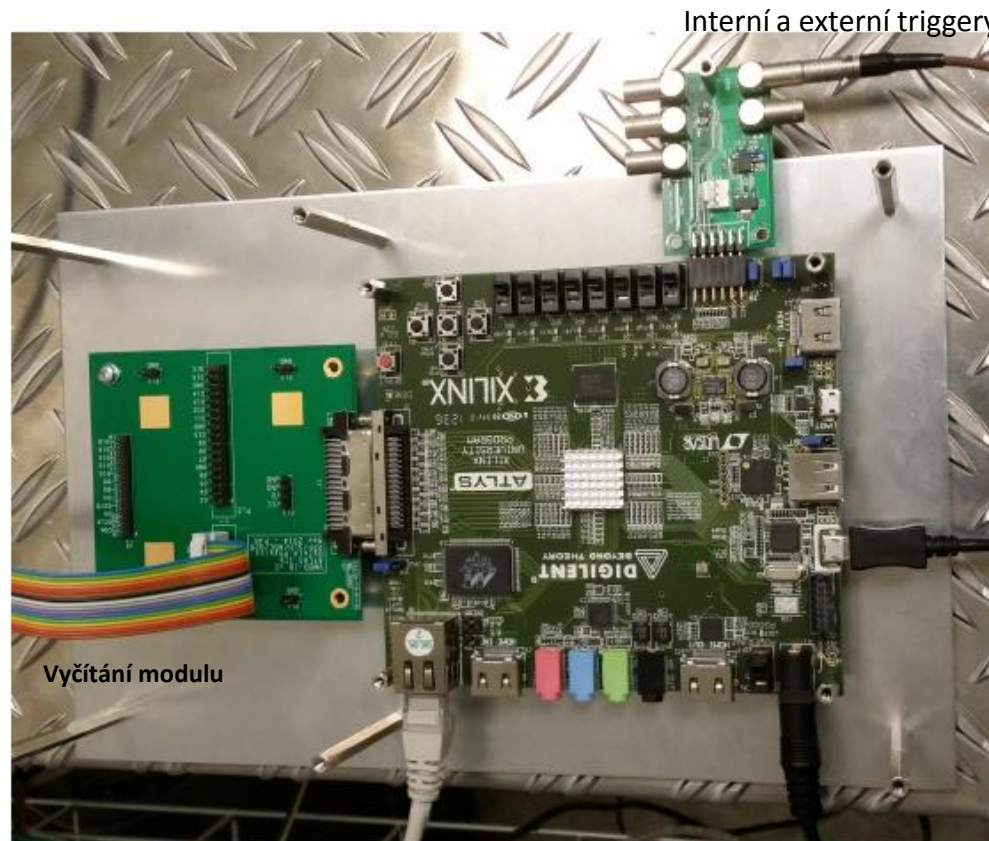
Made by Zdeněk Kotek



Jsme připraveni testovat sestavování modulů

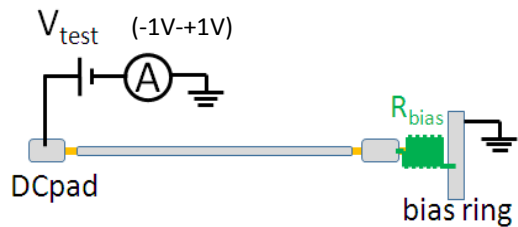
3. Elektronické testování modulů

- Vyčítání modulu pomocí ATLYS karty (PMOD-TTC, VMOD-IB)

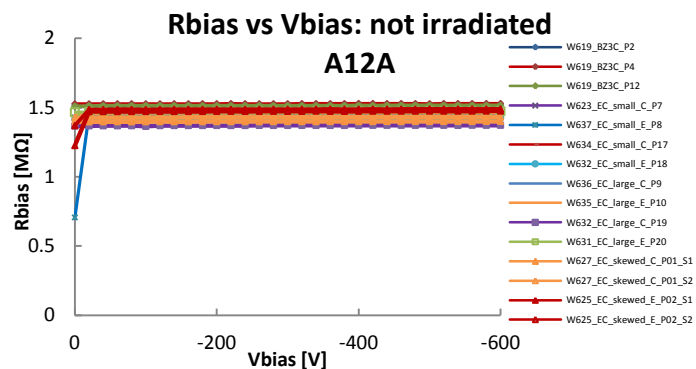


Děkuji za pozornost

Polysilicon Bias Resistance: Pre and post proton and gamma irradiation

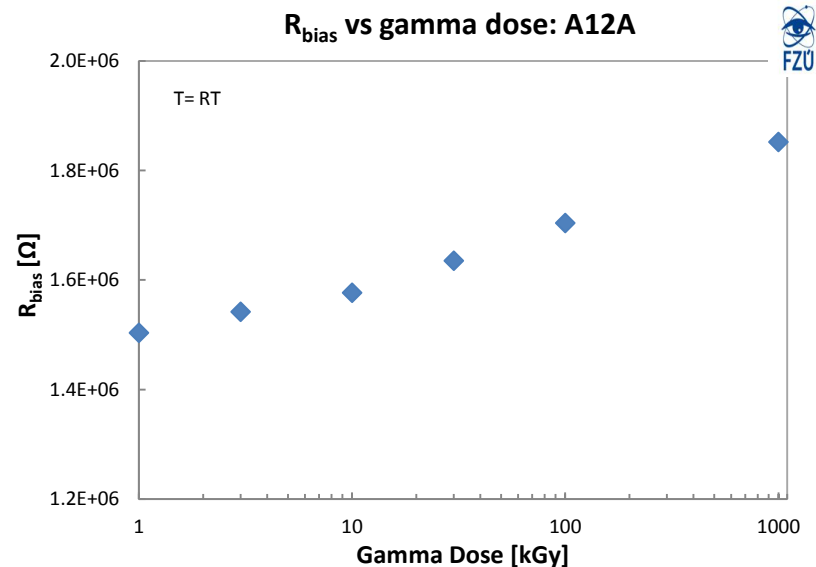
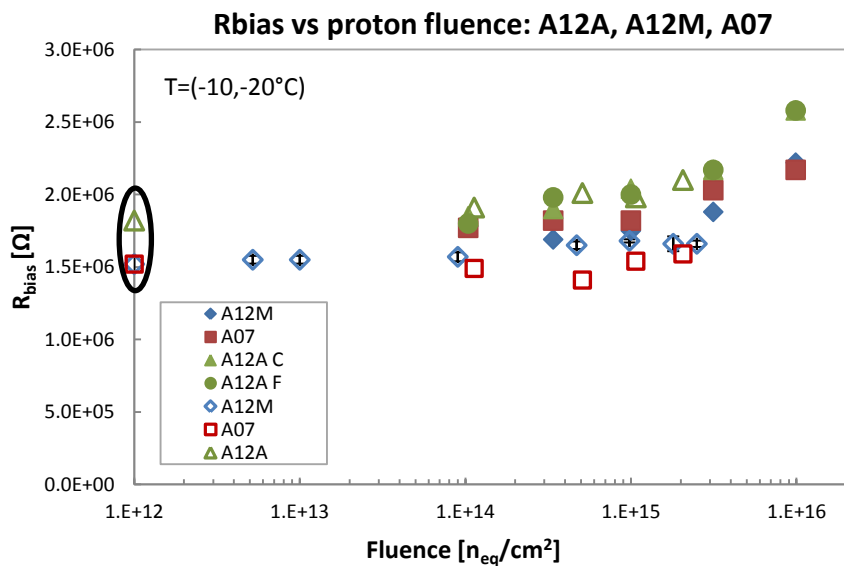


• “R_{bias}” = R_{bias} + R_{implant}



Tech. specs: $R_{bias} = 1.5 \pm 0.5 \text{ M}\Omega$

- not irradiated ATLAS12A
- $R_{bias} = 1.48 \pm 0.07 \text{ M}\Omega$ (at RT)



- R_{bias} is slightly increasing with proton fluence and gamma dose
- A12A has slightly higher initial R_{bias} than A12M and A07, as well within the spec

R_{bias} agrees with specs up to proton fluence $3E15 n_{eq}/cm^2$ and gamma dose 1MGy

Sensor parameters from electrical tests

- ATLAS12A - proton and gamma irradiated
- Inter-strip values for strip pitch 74.5 μm (**barrel**)
- for 1cm strip length

	Before irradiation	Protons $1\text{E}15n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$	Protons $2\text{E}15n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$	Gamma 10MRad
Inter-strip capacitance to neighbor pair, other floating	0.76 ± 0.02 pF/cm (@100kHz)			
	$0.75\text{-}0.82$ pF/cm (@1MHz)	0.82	0.82	0.77
Coupling capacitance at 1kHz	24 pF/cm	24	24	
Strip to back plane capacitance	0.31 pF/cm (of depleted sensor)			0.31
Bias resistor	1.5 ± 0.1 M Ω (+23°C) $1.7\text{-}1.8$ (-10°C,-20°C)	2.0 (-20°C)	2.1 (-20°C)	1.7 (+23°C)
Leakage current per 1 cm strip		210 nA (-15°C)	416 (-15°C)	

Strip meeting Dec16, 2015

3

- Hodnoty parametrů naměřených ve Fzu jsou používány pro stanovení specifikací pro vyčítací čipy ASIC senzorů v Itk. *Strip sensor inputs to ABC130* ASIC specs*

Inter-strip capacitance scaling for end-cap strip geometry (for all rings and rows)

- Geometry of end-cap strip sensors taken from Petal sensors Twiki pages:

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/PetalSensors>

petal.xlsx file

	ring	row	length [mm]	pitch_i [um]	pitch_o [um]	pitch_avg d2 [um]	C2 [pF/cm] with f=1.12	C2[pF]/strip with f=1.12
35								
36								
37	0		104.966					
38		0	19.011	75.387	79.109	77.248	0.84	1.59
39		1	23.962	79.123	83.815	81.469	0.80	1.93
40		2	28.913	74.528	79.562	77.045	0.84	2.42
41		3	31.883	79.574	85.124	82.349	0.80	2.54
42	1		85.767					
43		0	24.121	69.542	72.962	71.252	0.89	2.14
44		1	18.165	72.972	75.548	74.260	0.86	1.56
45		2	21.143	75.556	78.553	77.055	0.84	1.77
46		3	21.143	78.563	81.561	80.062	0.81	1.72
47	2		63.581					
48		0	31.255	74.768	78.820	76.794	0.84	2.62
49		1	31.255	78.829	82.881	80.855	0.81	2.52
50	3		117.599					
51		0	29.101	72.008	75.278	73.643	0.87	2.52
52		1	29.101	75.286	78.556	76.921	0.84	2.44
53		2	29.101	78.562	81.832	80.197	0.81	2.36
54		3	29.101	81.840	85.110	83.475	0.79	2.30
55	4		109.980					
56		0	54.455	74.325	79.658	76.991	0.84	4.56
57		1	54.455	79.665	84.998	82.331	0.80	4.34
58	5		101.346					
59		0	50.138	75.480	79.833	77.656	0.83	4.17
60		1	50.138	79.839	84.191	82.015	0.80	4.01
61								

$$C_2 = f \cdot \ln(d_1/a) / \ln(d_2/a) \cdot C_1$$

C_1 - the capacitance measured
 d_1 - the average pitch of the
 measured sensor (EC mini sensor)

C_2 - the scaled capacitance for
 the d_2 pitch

d_2 - average of pitch_i and pitch_o
 f = 1.12 (from ATLAS specs)

Cint max for max strip length

Inter-strip capacitance does not change after proton and gamma irradiation
 (for more information see backup).

Strip meeting Dec16, 2015

6

- Hodnoty parametrů naměřených ve Fzu jsou používány pro stanovení specifikací pro vyčítací čipy ASIC senzorů v ITk.

1 - Sensors (Bart + Kristin)

Step No	Name & Deception	Equipment Needed	QA Specs
1	Arrival <ul style="list-style-type: none"> • Unpacking? • Storage of components 	Storage Cabinets (if not packaged)	Humidity <5%
2	Visual Inspection <ul style="list-style-type: none"> • Check for scratches, broken edges, dust etc. • Check edge chip spec: no chips or cracks 	Optical Microscope with automated inspection software	'Nice and Clean sensor'
3	Metrology Survey <ul style="list-style-type: none"> • XY geometry • Z profile 	Optical (non contact) CMM	Total Bow <200µm
4a	I-V	<ul style="list-style-type: none"> • Probe Station with N₂/humidity control/chiller • Sensor held on jig using clamps (not vac) in dry conditions (N₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0-800V in 10v steps with 10s interval • I < 200µA (as spec) • No onset of micro-discharge • T = Normalised to 20°C
4b	C-V	As Above	0-800V in 10v steps with 5s interval T = Normalised to 20°C

1 - Sensors (Bart + Kristin)

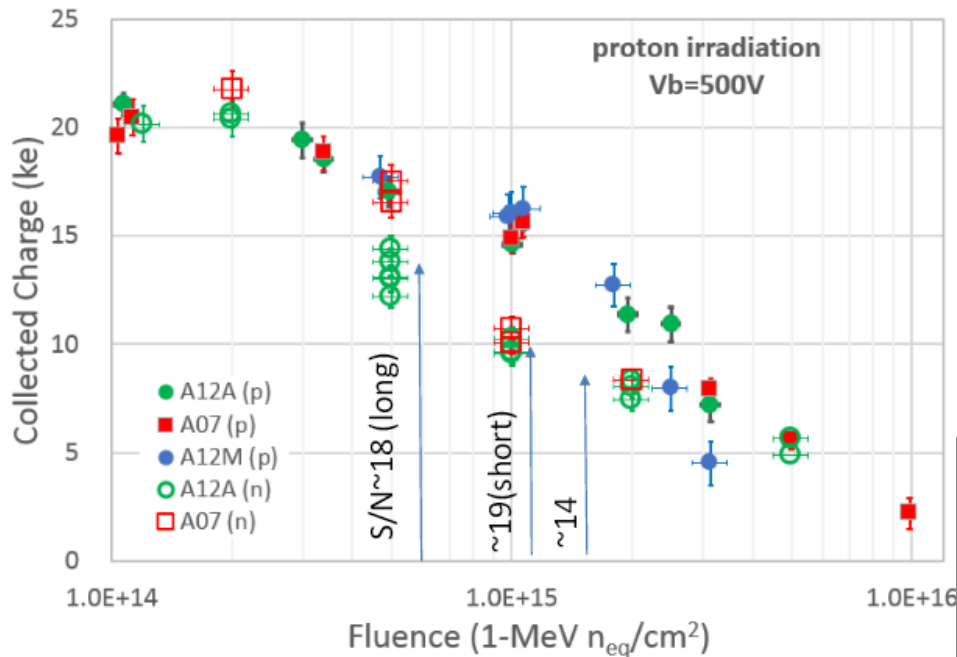
Step No	Name & Deception	Equipment Needed	QA Specs
5a	Full Strip Test	<ul style="list-style-type: none"> Probe Station Multichannel probe card 	<ul style="list-style-type: none"> Starts at 5-10% Reduce to 1-2%
5b	Additional Tests <ul style="list-style-type: none"> PTP, C_{INT}, R_{INT} 	Probe Station	Same sensors as 5a
7	Database <ul style="list-style-type: none"> Sensor is registered Data uploaded 	PC / Laptop	
8	Decision <ul style="list-style-type: none"> Grading of Sensor is made 		Good, Pass, Hold or Fail

Výsledky měření sběru náboje

S/N at HL-LHC

Barrel short (24mm)strips up to : $1.1 \times 10^{15} /\text{cm}^2$
 Barrel long (48mm) strips up to : $0.6 \times 10^{15} /\text{cm}^2$
 Endcap (8-48mm) strips: max $1.6 \times 10^{15} /\text{cm}^2$

ENC noise $\sim 550/720/650$ ENC for barrel short/barrel long/EC innermost strips



At V_b=500V, strip detectors remain as precision tracker after HL-LHC fluence

K. Hara, HSTD10, Xi'an China, 25-29 Sep 2015

- Mini sensors irradiated by neutrons and protons
- Charge collection measured with ^{90}Sr beta-source
- CC of $>9\text{ke}^-$ can be maintained at V_b=500V after $1.6 \times 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$

