

***ACTIVE***

***Atlas and Cms Toward InnoVative pixEls***

Exp. Call G5 -2013

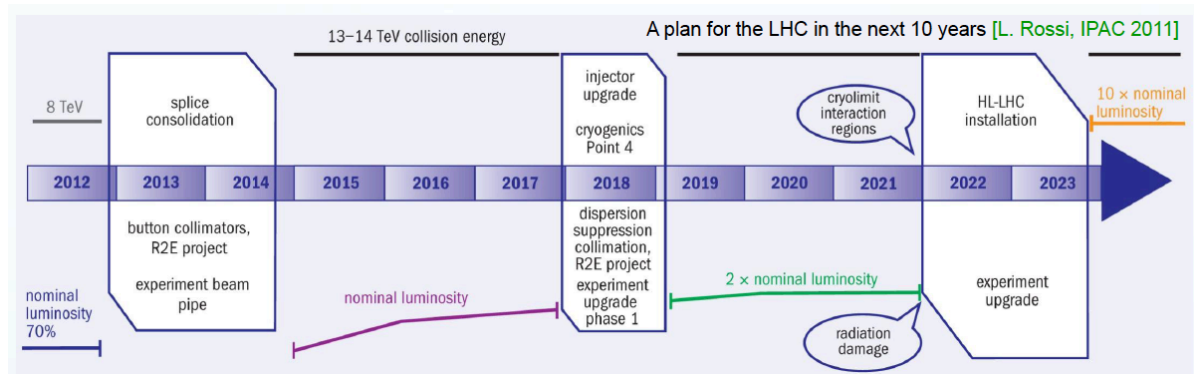
***Resp. Naz. G. Darbo INFN-Ge***

# Outline

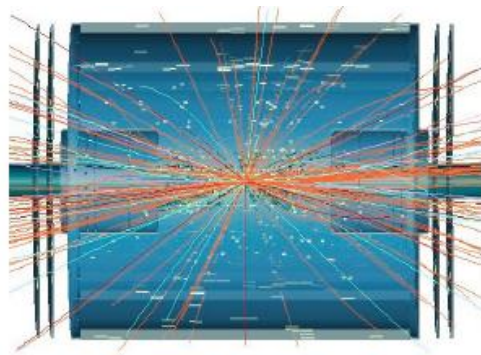
- Introduzione
  - Pixel Detectors per HL-LHC : Upgrade di Phase II
- Il progetto ACTIVE (WP)
  - Sensori 3D-4D
  - Ibridizzazione
  - Cooling
- Collaborazione ACTIVE (org.)
  - Ruolo di Pisa

# Introduzione

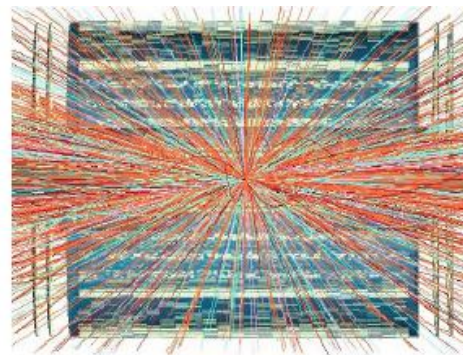
- Progetto dei primi layers (pixel) del tracciatore per l'operazione ad HL-LHC, quindi Upgrade Phase II



- HL-LHC : Energia nominale e  $\mathcal{L} \times 10$  rispetto al progetto originario
  - Radiation hardness fino a  $2 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  , 1 Grad



LHC in 2011:  $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



HL-LHC :  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$3000 \text{ fb}^{-1}$   
140-200 collisioni per BX

# *Caratteristiche del tracciatore di Phase II*

- Costruito con rivelatori ultra-Radiation hard:
  - Sensore ed Elettronica di F.E.
  - Segmentazione dei pixel piu` piccola per mantenere la risoluzione , massima efficienza geometrica, capace di sostenere High hit-rate, nuova architettura del readout
- Rivelatori con ridotto Material Budget
  - Minimizzare la Lunghezza di radiazione e lo scattering multiplo in vicinanza del I.P.
- Ricostruzione precisa delle tracce cariche e generazione veloce dei segnali
  - Possibile contributo al trigger L1

# *Il progetto **ACTIVE**: caratteristiche principali*

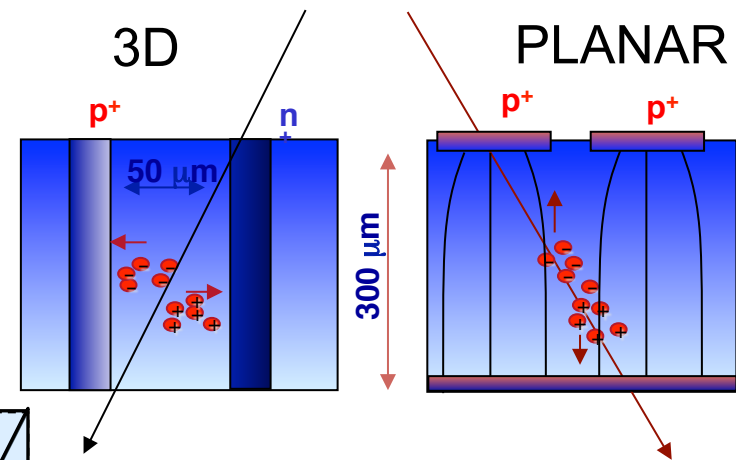
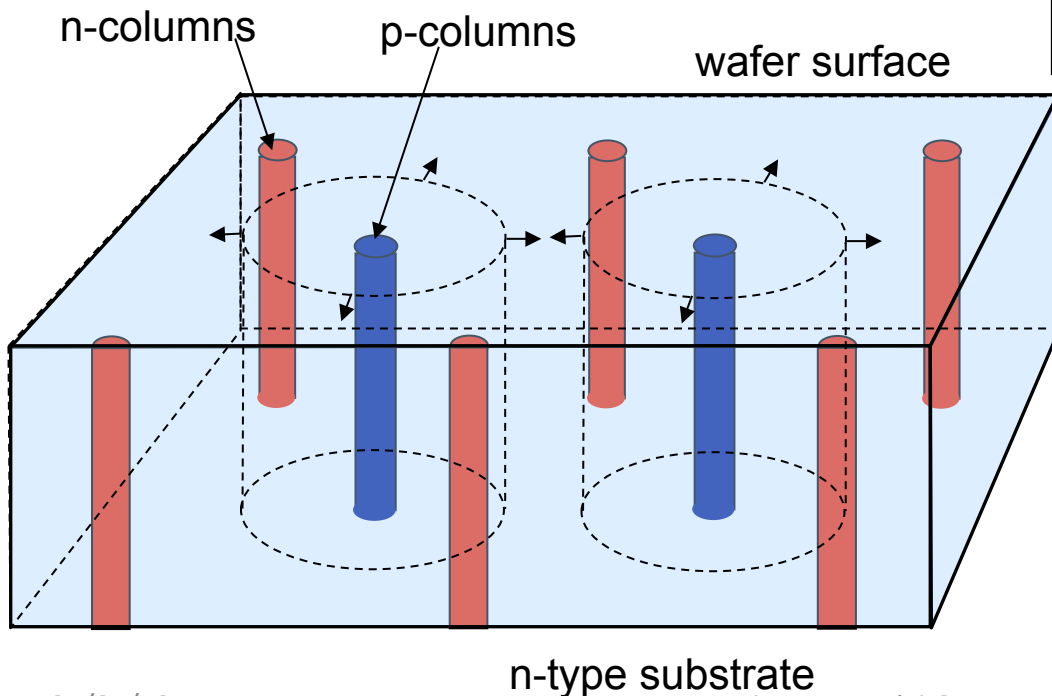
- Collaborazione congiunta tra le comunità di ATLAS e CMS
- Progetto di durata triennale (call G5)
- Raggruppa tra i maggiori esperti nel campo ed i teams coinvolti nei tracciatori ad LHC e loro Upgrades
- Goals:
  - Sviluppare tecnologie innovative applicabili ai tracciatori per HL-LHC
  - Irrobustire tecnologie oggi di punta e prototipali per upgrade Phase II
  - Riunire e accrescere l' "expertise" per gli upgrades di ATLAS e CMS
  - Creare un gruppo di lavoro competente e con massa critica commisurata
  - Coinvolgere industrie italiane nella collaborazione

# *Il progetto **ACTIVE**: framework*

- Sviluppo di rivelatori a Pixel ottimizzati per i tracciatori di Phase II:
  - Design e produzione di sensori 3D e 4D
    - Rivelatori con alta risoluzione, veloci nella generazione del segnale, sottili con elevata efficienza geometrica.
  - Ibridizzazione in moduli
    - Qualifica di tecniche di Bump Bonding ad alta densità di interconnessione
  - Ottimizzazione del material budget
    - Integrazione del cooling: efficiente e con “low mass”
  - Valutazione della radiation hardness
    - $\Phi \sim 2 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$ , target per I layers più interni
  - Studio dell'efficienza di rivelazione
    - Soluzioni innovative e robuste.

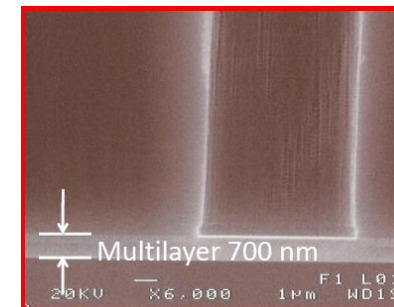
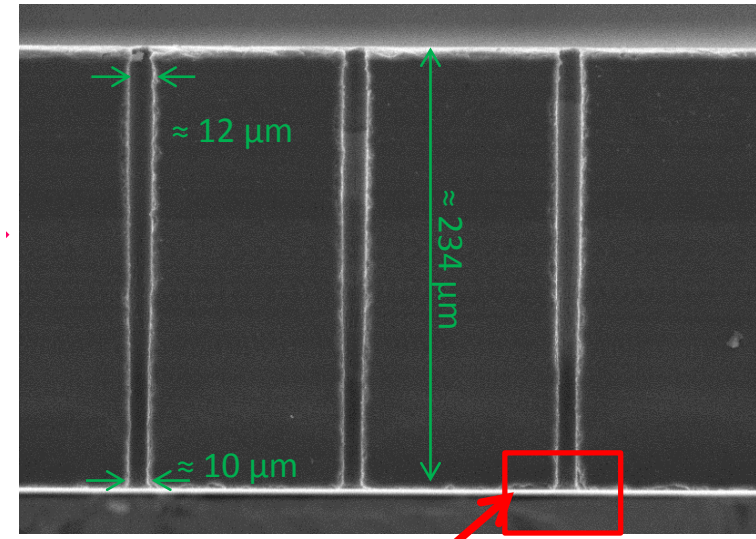
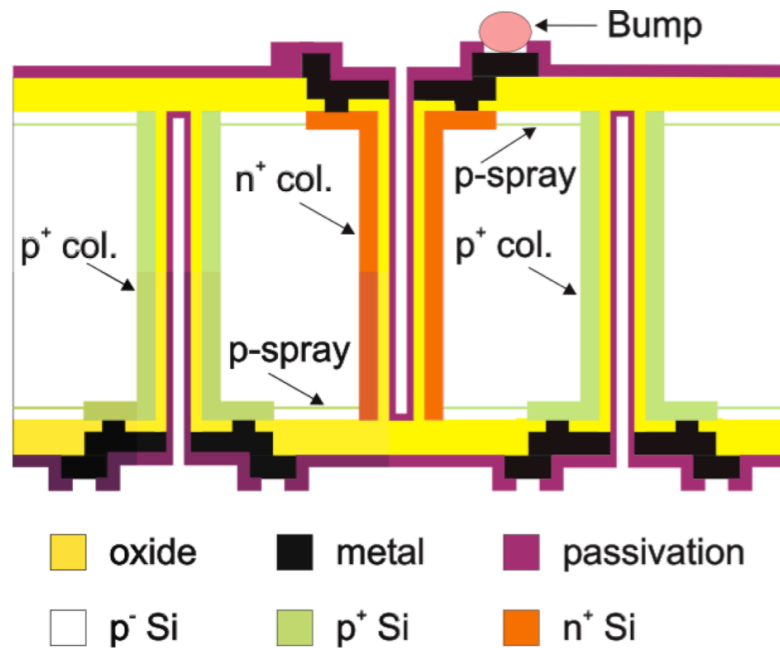
# 3D Sensor concept

- **“3D” electrodes:** - narrow columns along detector thickness,  
- diameter:  $10\mu\text{m}$ , distance:  $50 - 100\mu\text{m}$
- **Lateral depletion:** - lower depletion voltage needed  
- thicker detectors possible  
- fast signal  
- radiation hard



Introduced by: S.I. Parker et al., NIMA 395 (1997) 328

# 3D Sensor detail



Etch stop for DRIE etching

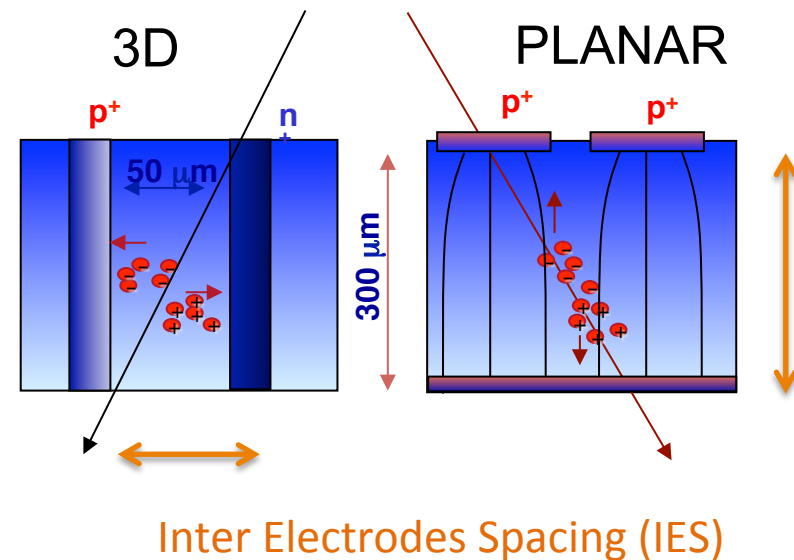
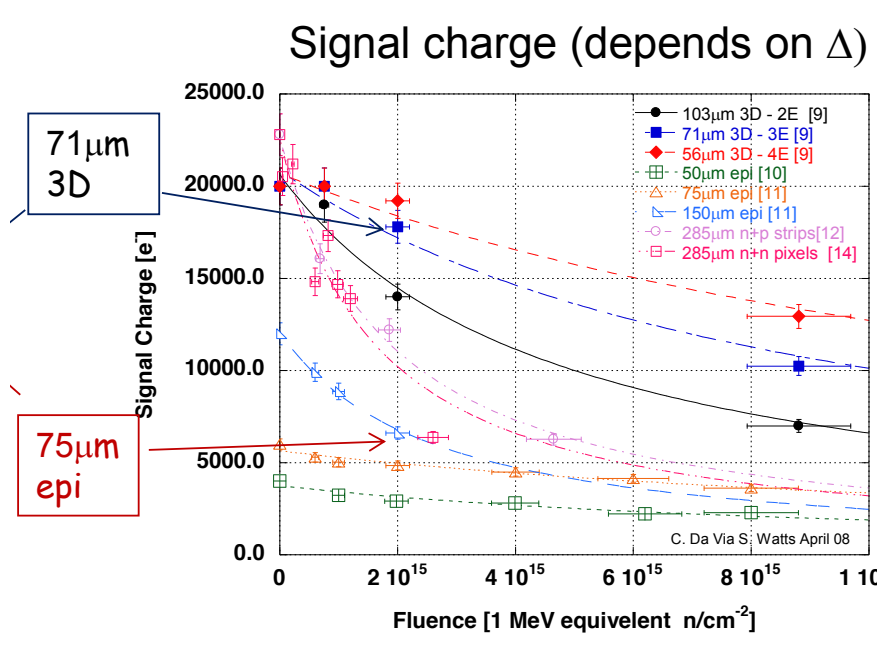
## Main Process and design features (FBK)

- Fully double sided process, no support wafer
- Passing through empty columns doped by diffusion
- Column depth equal to wafer thickness
- Surface isolation by p-spray on both sides
- Edge protection to improve mechanical yield



# 3D key feature: CCE vs radiation damage

- 3D detector collect more charge w.r.t planar:
  - charge collection distance ( $\lambda$ ) and substrate thickness ( $\Delta$ ) are decoupled



Simple example at  $10^{16} \text{ ncm}^{-2}$

$\Delta$ =substrate thickness  
 $\lambda$ = <trapping distance>~30µm

$$S_{\text{MIP planar}} \sim 80 (\lambda / \text{IES}) \times \Delta \sim 80\lambda \sim 80 \times 30 \sim 2400e^-$$

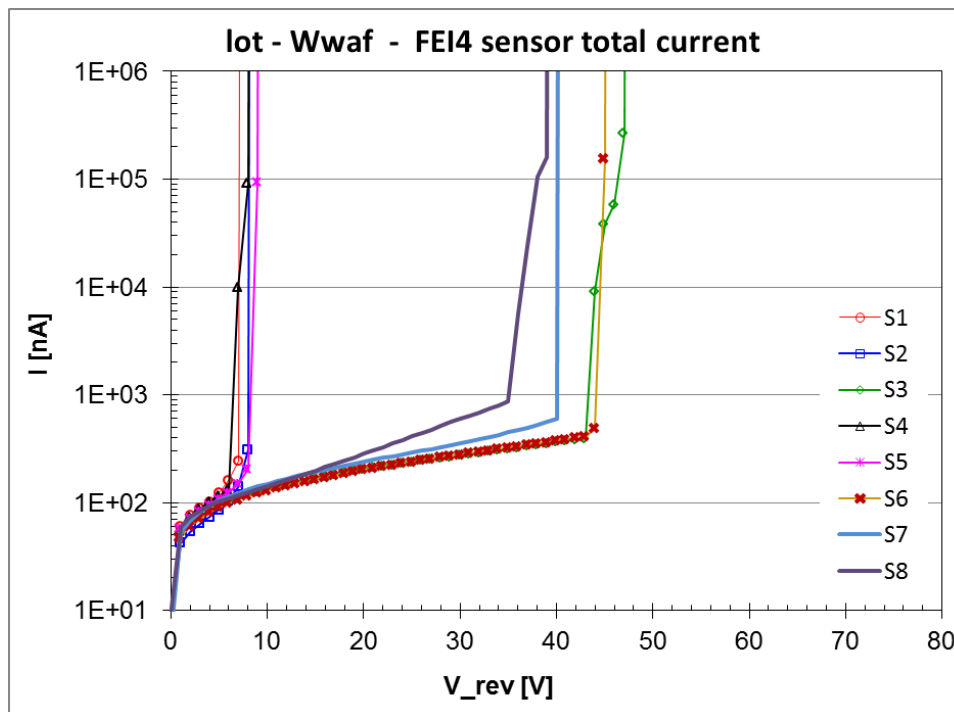
$$S_{\text{MIP 3D}} \sim 80\lambda \times (\Delta / \text{IES}) \sim 2400 \times 210 / (71 - 22_{\text{electrode implant}}) \sim 10290e^-$$

# 3D sensor development: ATLAS IBL (Upgrade Phase I)

- ¼ of IBL will be equipped with 3D detectors
- ATLAS (FE-I3, FE-I4) and CMS ROCs test
- Features:
  - efficiency >98% for 15° tracks at 160 V after  $5 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$
  - IBL production yield at FBK with ~50%

C. Da Via, et al.,  
NIMA 694 (2012) 321

G.F. Dalla Betta, et al.,  
JINST 7 (2012) C10006



- Relatively low intrinsic breakdown voltage (p-spray related, well understood)
- Might be an issue for post irradiation performance
- High sensitivity to process defect (a single defect kills an entire sensor)
- High yield variability

G. Giacomini, et al.,  
IEEE TNS 60(3) (2013) 2357

# **ACTIVE (3D): implications for future pixels**

- Smaller pixel size in future ROCs (->150 x 25  $\mu\text{m}^2$ )
  - thinner sensor or smaller collecting charge thickness to take advantage of the high-pixel spatial resolution.
- Smaller inter-electrode distance for radiation hardness
  - Trapping reduced  $\lambda$  , collection distance
- Implications:
  - Higher column density and bump density
  - Narrower electrodes desirable for higher geometrical efficiency and lower capacitance
  - Thinner substrates given a constant column aspect ratio with DRIE
  - Thinner substrates also help with electrode filling with poly-Si

# **ACTIVE (3D): proposed activity**

- Goals
  - Fabrication of new 3D pixel sensors on 6" wafers with thinner active region
  - Technology and design to be optimized and qualified for extreme radiation hardness ( $2 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ )
  - Pixel designs compatible with present (for testing) and future (65nm) F.E. ROCs of ATLAS and CMS
- Specific objectives
  - Smaller pixels with narrower electrodes (related to thickness)
  - Reduced inter- electrode distance for radiation hardness
  - Higher breakdown voltage
  - Improved electrode efficiency
  - Very slim (or active) edges
  - Sensor thickness to be optimized (depending on signal/threshold)
    - **case 1 ~ 150 mm: feasible with "passive" sensor**
    - **case 2 < 100 mm: charge multiplication necessary**

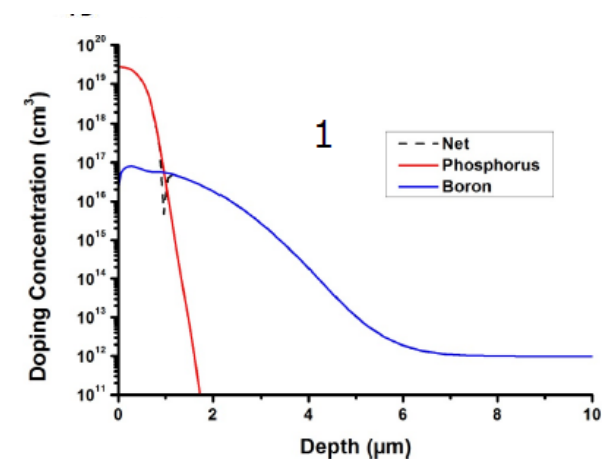
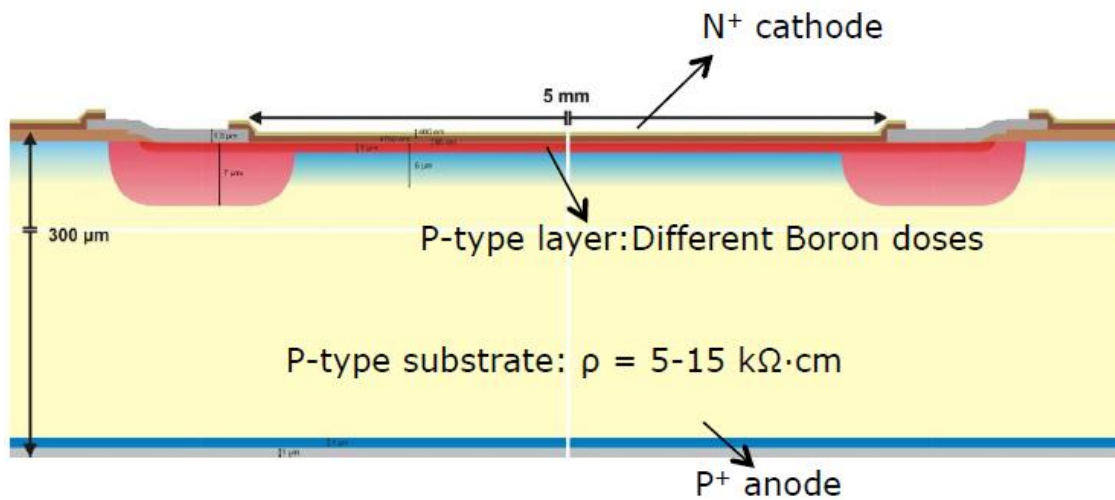
## 4D: Ultra-Fast Silicon Detectors\*

- Integrare alla eccellente risoluzione spaziale dei rivelatori segmentati a pixel al silicio la 4<sup>a</sup> coordinata cioè “*t*”. Nei rivelatori a pixel attuali:
  - la risoluzione spaziale è ottimizzata
  - la risoluzione temporale è rimasta vincolata alla struttura richiesta dai rate di collisione degli acceleratori.
    - **Goal:**
      - **Ottenere la risoluzione temporale nel “range” dei “ps”**
      - **Raccolta di carica con moltiplicazione per una ulteriore ottimizzazione con l’uso di rivelatori sottili**
  - Design di elettronica di lettura adeguatamente veloce

\*Proposti da H Sadrozinski al 20<sup>th</sup> RD50 Workshop

# 4D concept: planar

- Fenomeno della moltiplicazione di carica scoperto negli studi di radiation hardness ( $\sim 10^{15}$  neq/cm<sup>2</sup>) di microstrips polarizzati al alto Vbias ( $\sim 1$ kV)
  - La carica eccede il valore atteso (ridotto) per trapping dei difetti alla data fluenza
- Implementazione di una moltiplicazione di carica (CM) “controllata” su Diodi planari

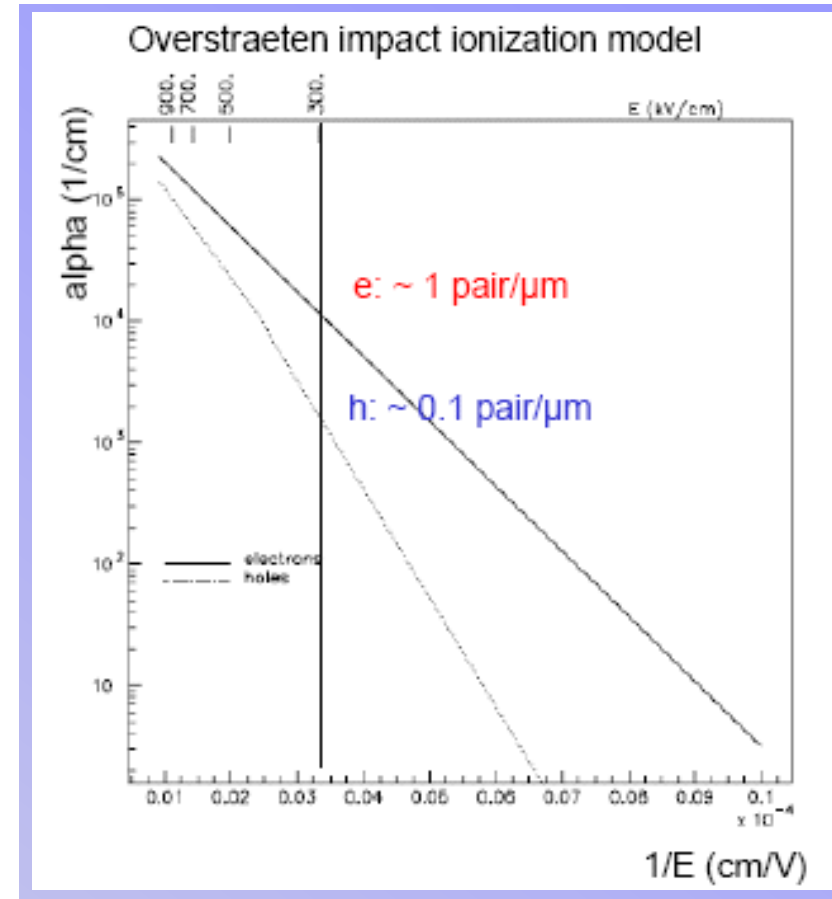


$n^{++} - p^+ - p - p^+$  structure

Struttura analoga ai APD o SiPM (effetto molto ridotto): il doping  $10^{16-17} \text{ cm}^{-3}$  crea una moltiplicazione a valanga dovuta alla ionizzazione ad impatto (LGAD)

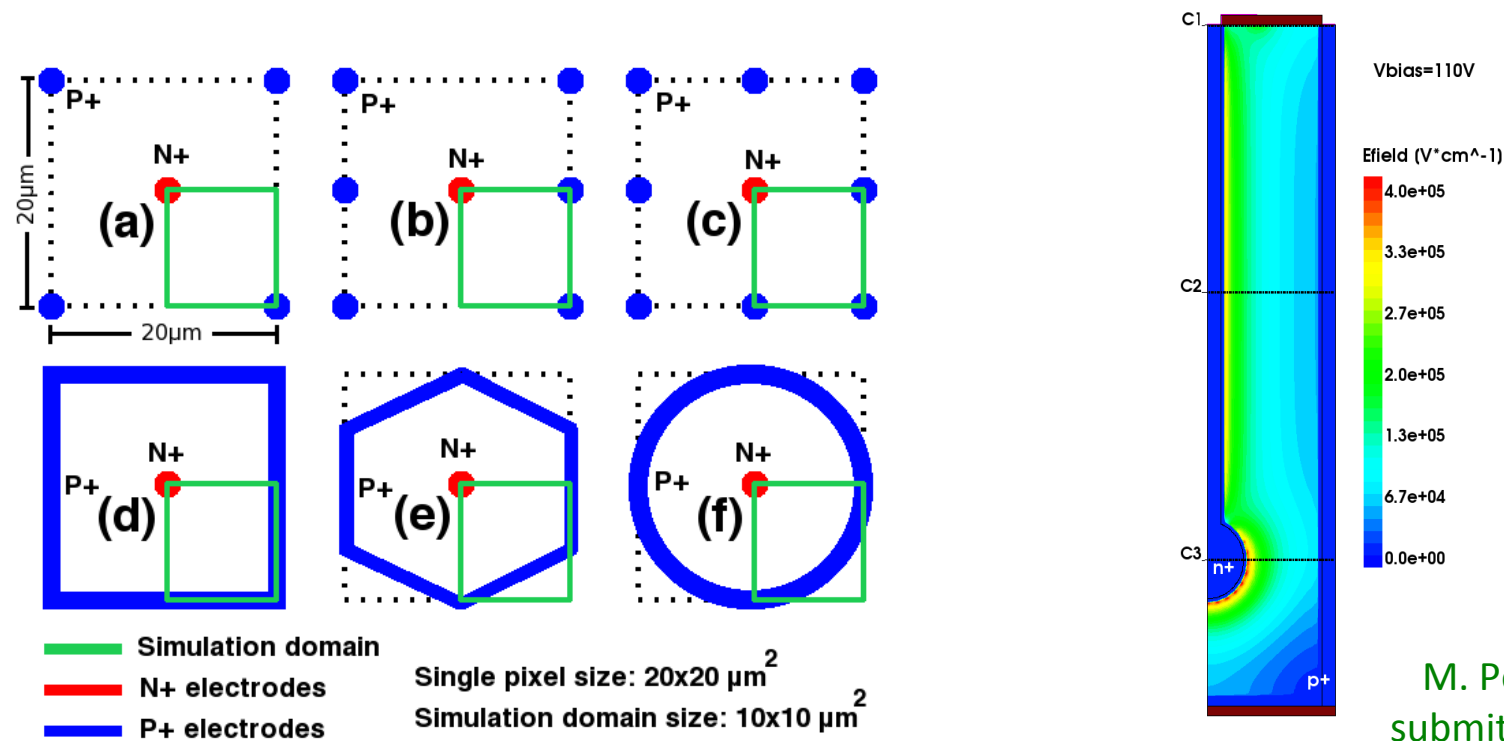
# Moltiplicazione e guadagno

- Modello per ionizzazione da impatto:
  - $N = N_0 \exp(\alpha l) = g N_0$ 
    - Campo elettrico inferiore al valore di breakdown (270 KV/cm)
      - Guadagno  $g < 10$ : modo lineare



# ACTIVE: Implementazione ai 3D

- Studi preliminari di simulazione dei 3D-> 4D
  - Rispetto ai planari (sottili) per i 3D->4D si può mantenere sotto controllo la capacità di cella, e quindi il noise
  - Proposte modifiche del drogaggio efficace
    - **Moltiplicazione di carica controllata**
  - Geometria degli elettrodi a colonna ottimizzata per evitare breakdown

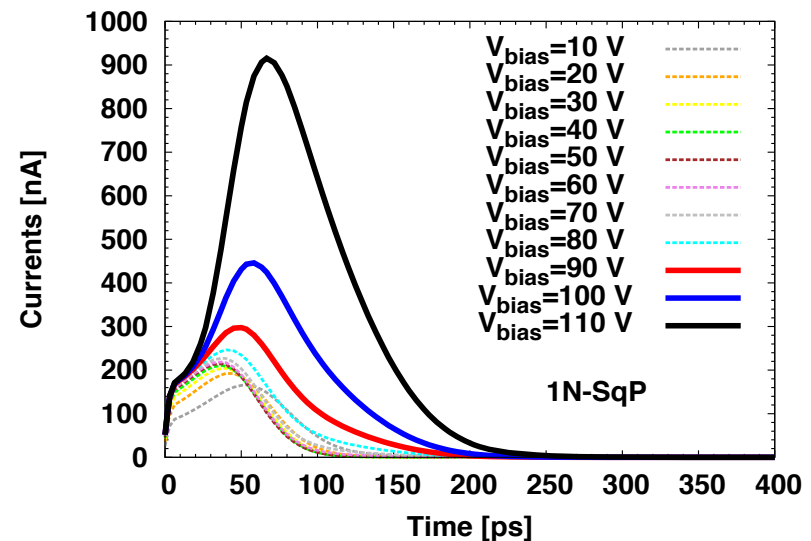
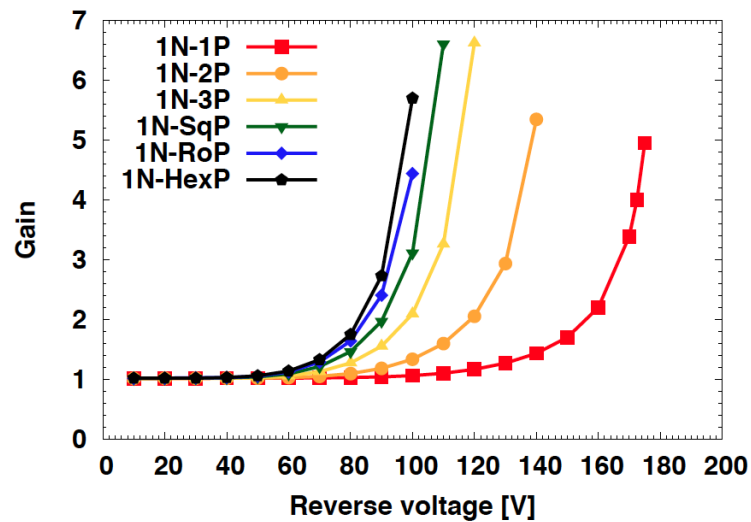


M. Povoli et al.,  
submitted to NIMA



# Risultati preliminari: simulazioni

- Studio del guadagno: pre (–post) irraggiamento
- Sviluppo temporale del segnale di m.i.p.

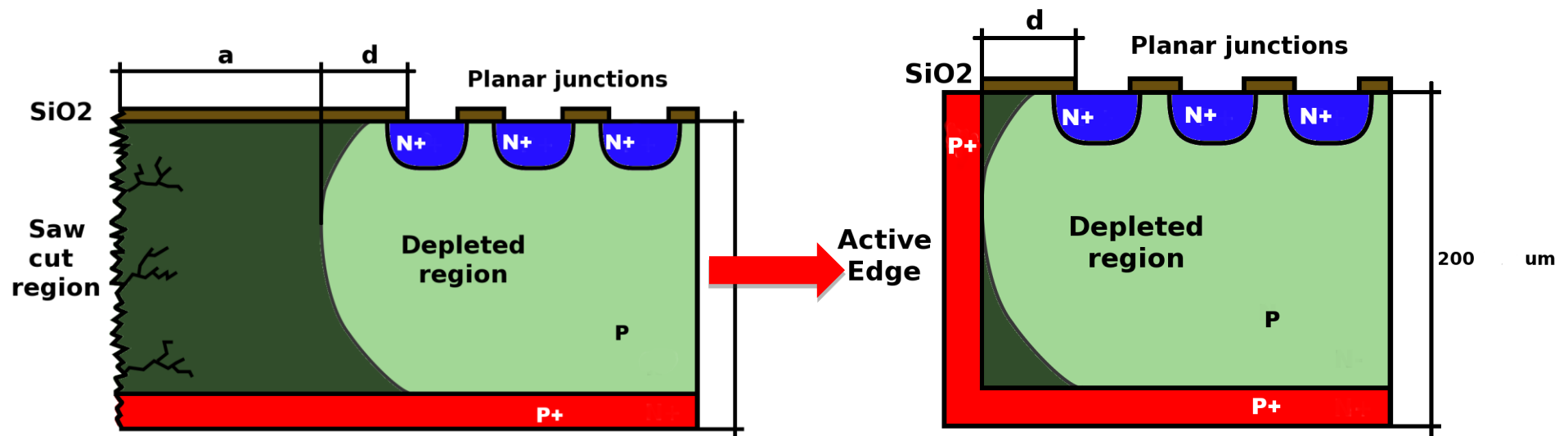


## **ACTIVE: proposed activity**

- Processare rivelatori 3D->4D su wafer a 6”
  - Moltiplicazione di carica (CM)
  - Tempo di raccolta di carica
  - Ottimizzazione spessore del bulk e Inter Electrodes Spacing (IES)
- Strategia
  - Collaborare agli studi su dispositivi planari
    - **Assottigliati e/o epitassiali**
  - Applicare soluzioni ai 3D columnari
  - Verificare se con CM abbiamo buone prestazioni per un rivelatore a pixel ibridizzato al ROC
  - Stabilità delle performance dopo danno da radiazione fino a  $2 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$

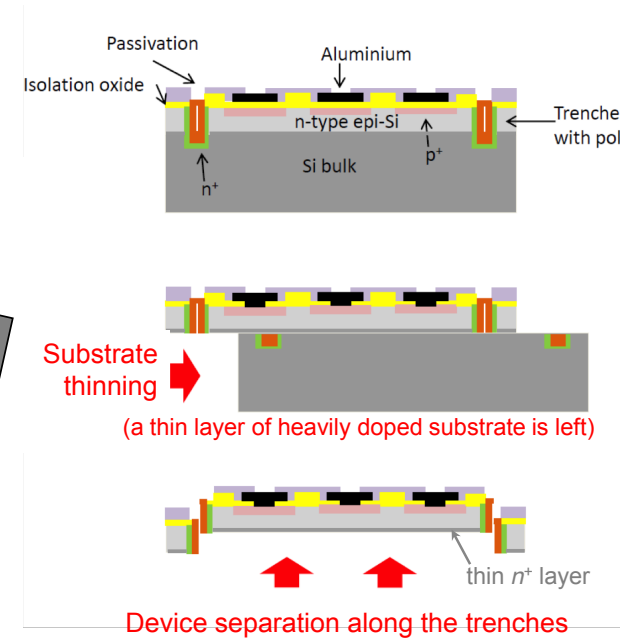
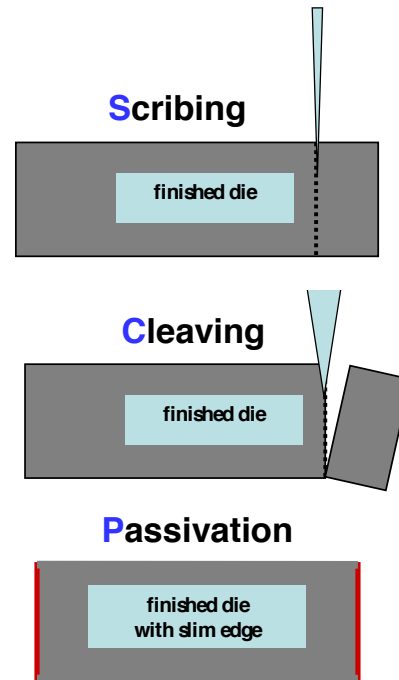
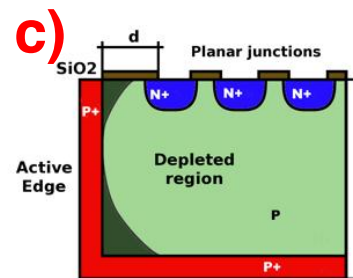
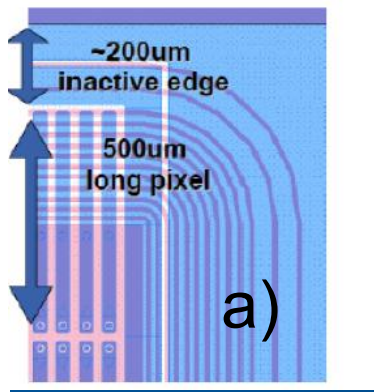
## **ACTIVE:** Ottimizzazione dell'area attiva (3D-4D)

- Goal: ridurre l'area inattiva del sensore nella regione di bordo che deve divenire una regione "damage free ohmic contact"



# Metodi: ottimizzazione dell'area attiva (3D-4D)

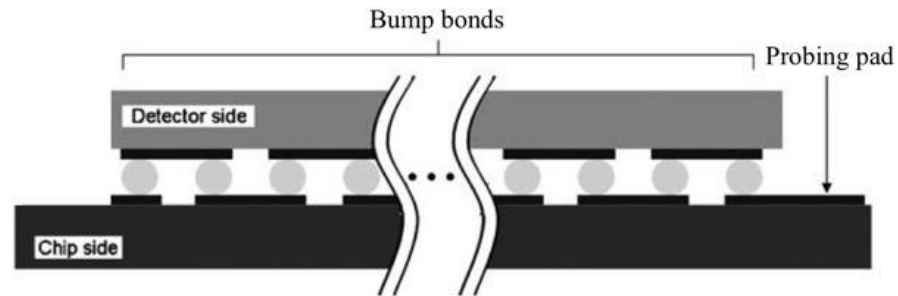
- Diverse tecniche possibili:
  - disegno dei GR
  - Edge attivi
  - SCP
  - Trench con DRIE+ doping by diffusion



## **ACTIVE: Implementazione ai 3D-4D**

- Oggi 3D-IBL ATLAS ha 220  $\mu\text{m}$  di edge
- Dispositivi planari raggiungono 125  $\mu\text{m}$ 
  - **Attività proposta:**
    - **Design e processing di 3D-4D con edge < IES**
    - **Ottimizzazione per lo step di ibridizzazione con ROC**
  - **Strategia:**
    - **Applicazione della tecnica più promettente**
    - **Studio della efficacia e stabilità dopo danno da radiazione fino a  $2 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$**
    - **Misura della efficienza della raccolta di carica ai bordi**

# **ACTIVE** Hybridization: Bump Bonding al ROC



- Oggi in HEP
  - spessore: Sensore a pixel  $\sim 300 \mu\text{m}$ , ROC  $175 \mu\text{m}$
  - Pitch:  $100 \times 150 \mu\text{m}$  (CMS),  $50 \times 400 \mu\text{m}$  ATLAS
  - ROC area  $\sim 1 \text{ cm}^2$
  - Densità dei Bump  $\sim 5\text{k}/\text{cm}^2$ 
    - **1 modulo: sensore a pixel da  $16 \text{ cm}^2$  assemblato a 16 ROCs**
- Sviluppi per HL-LHC
  - spessore: Sensore a pixel sottile, ROC  $100 \mu\text{m}$
  - Pitch:  $50 \times 250 \mu\text{m}$  ( $50 \times 125 \mu\text{m}$ )
  - ROC area  $\sim 2 \text{ cm}^2$
  - Densità dei Bump  $\sim 30\text{-}60\text{k}/\text{cm}^2$ 
    - **1 modulo: sensore a pixel da  $\sim 16 \text{ cm}^2$  assemblato a 2-4 ROCs**

# **ACTIVE Hybridization: piano di lavoro**

- Design di sensori compatibili con ROC chip di ATLAS e CMS
  - Attuali PSI46dig e FE-I3 e versioni successive a 65nm (FE-I4)
- Applicazione ai 3D-4D (slim/active edge)
- Goals
  - Ottimizzazione dei processi di assottigliamento e taglio dei ROC
  - Set-up e qualifica del processo di Bump bonding (Bump material & thermal Budget, stress meccanico)
  - Studiare il limite in densità dei Bumps (100K/cm<sup>2</sup>)
- Obiettivi:
  - Ibridizzazione con ROC (<100 um) e sensori (<200 um) sottili
  - Uso di ROC a grande area (2 cm<sup>2</sup>)
  - Efficienza delle interconnessioni ad elevata densità di Bumps

# *Efficient and Low Mass cooling*

- Moduli a pixel per HL-LHC richiedono una rilevante estrazione di potenza
  - i.e. FE-I4 (65nm) consuma 30 uW/bond
    - **Proiezione (100k bonds/cm<sup>2</sup>): 0.75 W/cm<sup>2</sup>**
  - I sensori, (mantenuti a -15C) tipicamente aggiungono 0.2W/cm<sup>2</sup>
- Funzionamento efficiente a bassa T
- Sistema di raffreddamento “leggero”
  - Ottimizzazione nella scelta del fluido: CO<sub>2</sub>
  - Integrare su modulo il sistema di cooling
- Ottimizzazione della tecnologia, compatibile con il processing di ROC e Pixel



## ***ACTIVE: proposed activity***

- Proponiamo la applicazione del cooling a microcanali:
  - Micro-cooling in fase liquida in strutture microcanale in materiale composito
  - Micro-cooling in fase liquida integrato nel substrato di Si con tecnologia DRIE (collaborazione con FBK)
- Attività iniziata a Pisa dagli esperimenti SuperB e VIPIX
  - minimizzazione di  $X_0$  del supporto meccanico
  - alta potenza dissipata a “room” T
    - **Un grande sforzo negli anni passati che ha prodotto risultati ottimi e promettenti per ulteriori applicazioni**

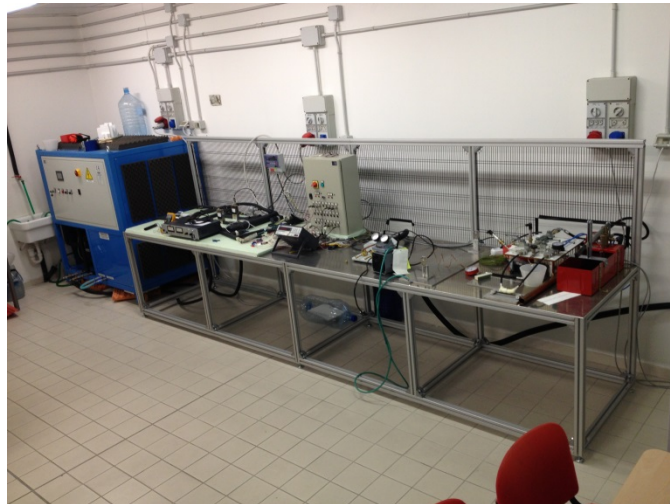


# Thermo-Fluid-Dynamic Lab



The lab is used for cooling tests and thermal characterization of low mass support structure based on micro-channel technology

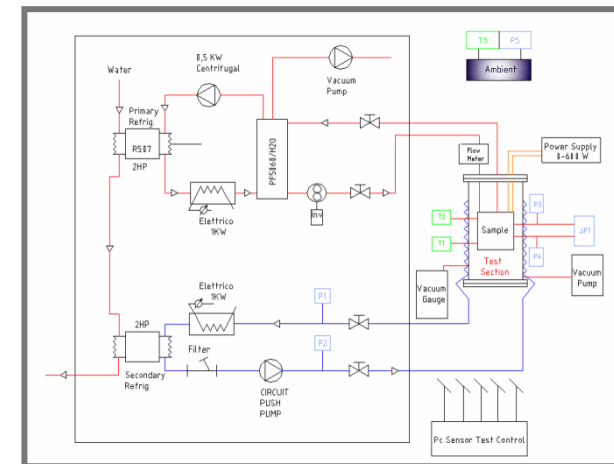
- Test bench and chiller for forced convection of liquid monophasic



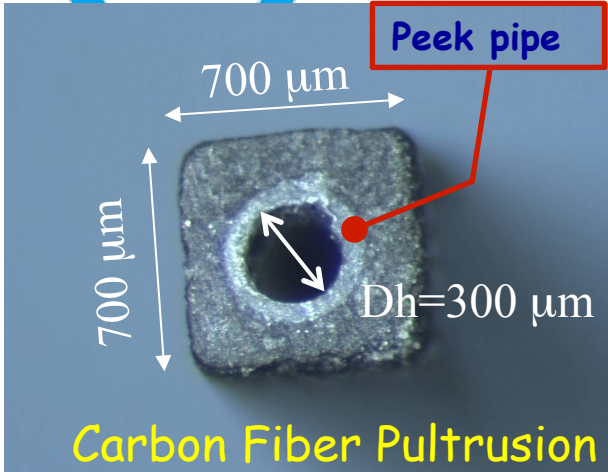
The instrumentation allows to measure/store the values of temp/pressure/flow in the thermal exchange.

Scheme of the Test-bench hydraulic circuit

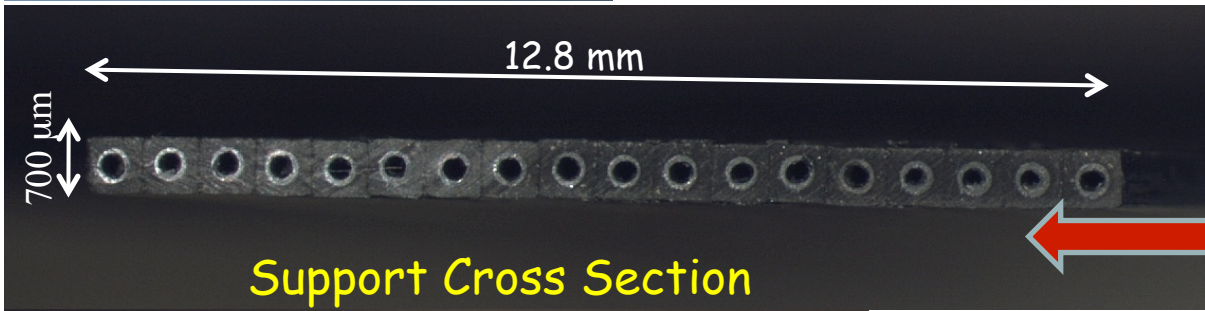
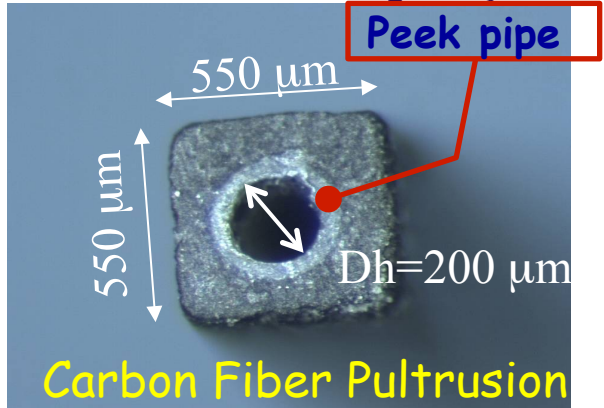
- DAQ HW system (N.24 probe for temperatures, pressure and flow ).
- Chiller dimensioned for a cooling power  $\gt$  1/2 kW primary and secondary cooling circuit



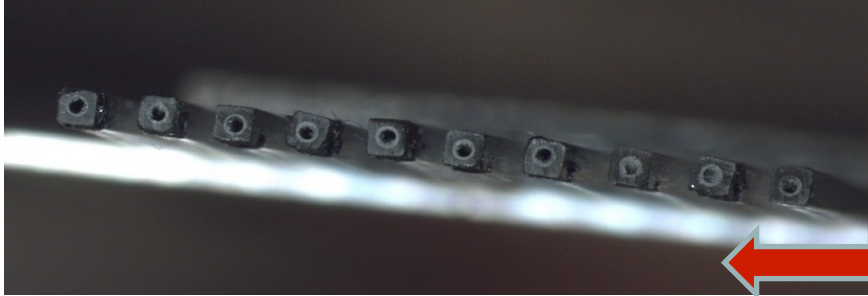
# Module supports summary



**The single base microchannel unit**  
A square CF micro-tube with an internal peek tube 50  $\mu\text{m}$  thick used to avoid moisture on carbon fiber



**Full micro-channel module**  
The total radiation length (\*) of this support is 0.28 % $X_0$



**Net micro-channel module**  
Same dimensions of full micro-channel but vacancies of tubes in the structure. The total radiation length (\*) is 0.15 % $X_0$

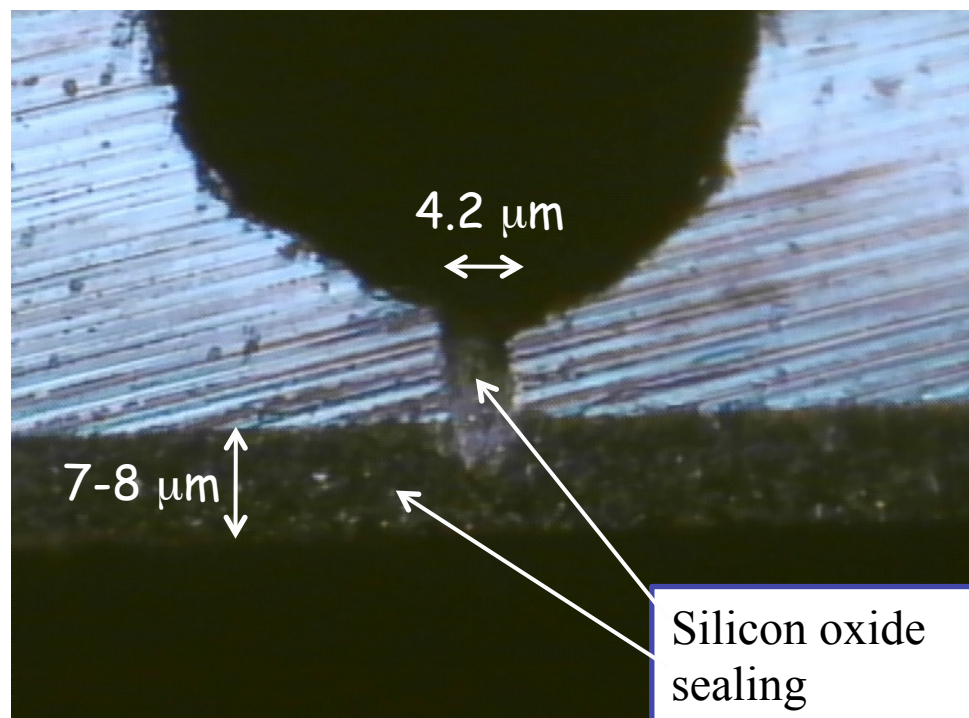
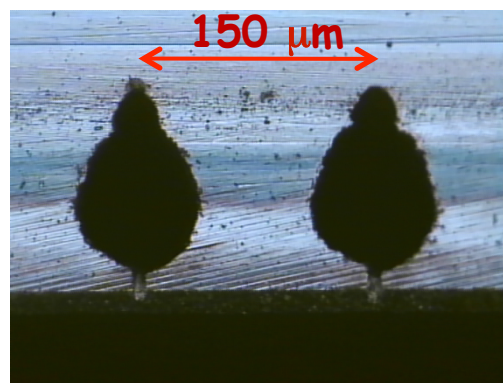
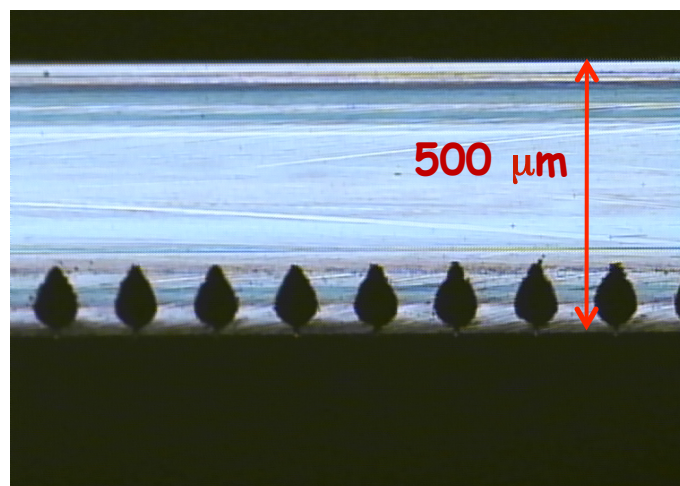
(\*): Material of the support structure: ( All C.F. material + peek tube + Water)



## Microchannel integration on silicon prototype



From a 4" wafer are obtained N.5 silicon modules of 12.8 width mm x 60 mm length x 500  $\mu\text{m}$  thick with N.61 microchannel to perform cooling tests

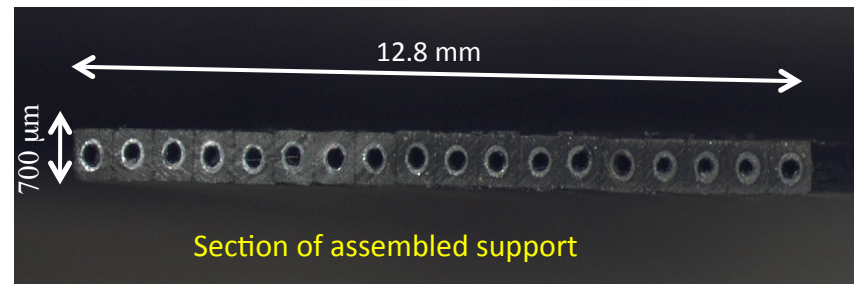
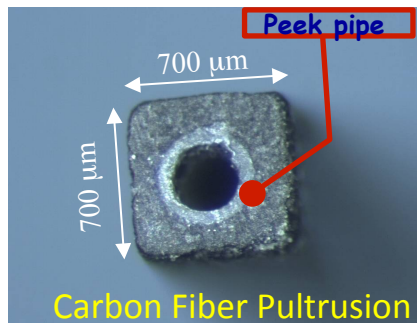


In the picture, the dimensions of the module prototypes in our hand .

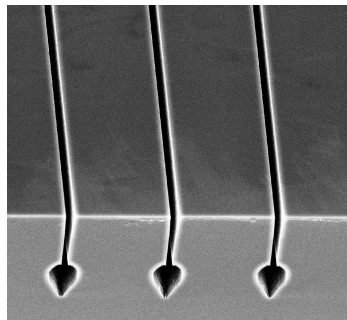
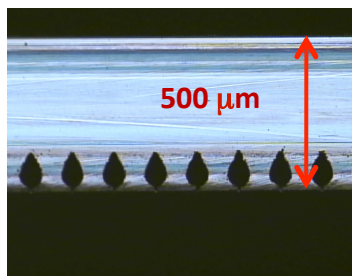


# **ACTIVE: applicazione a 3D-4D**

- Microcanali in composito



- Microcanali con tecnologia DRIE: compatibili con processi di lavorazione usati sui 3D-4D



- Possibili attività nell'ambito del WP Micro-cooling:
  - Simulazione e caratterizzazione termoidraulica di supporto in micro-canali in composito a forte  $\Delta p$
  - Simulazione e caratterizzazione termoidraulica di diverse geometrie di micro-canali integrati in Si
  - Studio di micro-cooling in transizione di fase a  $\text{CO}_2$  in microcanale
  - Valutazione della efficienza a bassa T (-20 C)
  - Integrazione a rivelatori 3D-4D: 2 possibili strategie
    - Integrazione su Pixel sensor
    - Integrazione su ROC

# *Il Progetto **ACTIVE**: dettaglio*

- Il progetto si sviluppa in 3 anni
- Strutturato in WP secondo le regole call-G5

	<i>Name</i>
<i>WP1</i>	<i>Sensors: 3D, 4D : design and production</i>
<i>WP2</i>	<i>Hibridization: Bump Bonding</i>
<i>WP3</i>	<i>Micro Cooling</i>
<i>WP4</i>	<i>Module Assembly &amp; Test</i>
<i>WP5</i>	<i>Irradiation &amp; Test Beam</i>
<i>WP6</i>	<i>Project &amp; Resource Coordination</i>





## ***ACTIVE: Collaborazioni con aziende***

- Nazionali
  - Convenzione esistente FBK/INFN per il processo a prezzo competitivi dei run 3D-4D
  - In studio un “framework Contract” con Selex microsistemi: accesso a facility di Bump Bonding
- Estere
  - CNM Barcellona: sensor wafer Processing
  - IZM Berlin: Hybridization

## **ACTIVE: Collaborazione**

- ACTIVE raggruppa le sezioni italiane che hanno lavorato ai tracciatori di ATLAS e CMS

– Non sono ancora definiti i

Responsabili dei WP

– Le sezioni partecipano in accordo a

- **Responsabilita/Esperienze pregresse**
- **Attivita in corso & Facility**
- **Impegno secondario o startup di attivita**

Istituti	FTE
BA-CMS	1.1
CS-ATLAS	2
FI-CMS	1
GE-ATLAS	0.9
MI-ATLAS	0.7
MI-CMS	1
PI-CMS	1.8
TN-ATLAS	2
TO-CMS	1
UD-ATLAS	1.3

12.8

# **ACTIVE: Partecipazione Pisa**

- Interessi del gruppo coinvolto:
  - Impegno primario ai WP: 1,2,3,4
    - **Non siamo trainanti per il WP1 per non attività pregressa**
    - **Possibili responsabilità nei WP 2, 3, 4**
      - **Abbiamo indiscussa esperienze (WP2 e WP4) e facility uniche (WP3) all'interno della collaborazione**
  - Impegno secondario al WP5
- Personale: 2 FTE (susceptibile di fine tuning)
  - Fisici: valori di FTE determinati dal limite per M&O + Firme articoli in CMS
    - **L'impegno reale va oltre le percentuali formali**
- Supporto gruppo AT, Officina, Uso Clean Room

Personale	FTE (%)
Basti/Moggi	20
Boccali	20
Bosi	30
Ciocci	10
Dell'Orso	30
Messineo	30
Rizzi	20
Verdini	20
Tec. AT (TFD)	20

**PRELIMINARI !**