

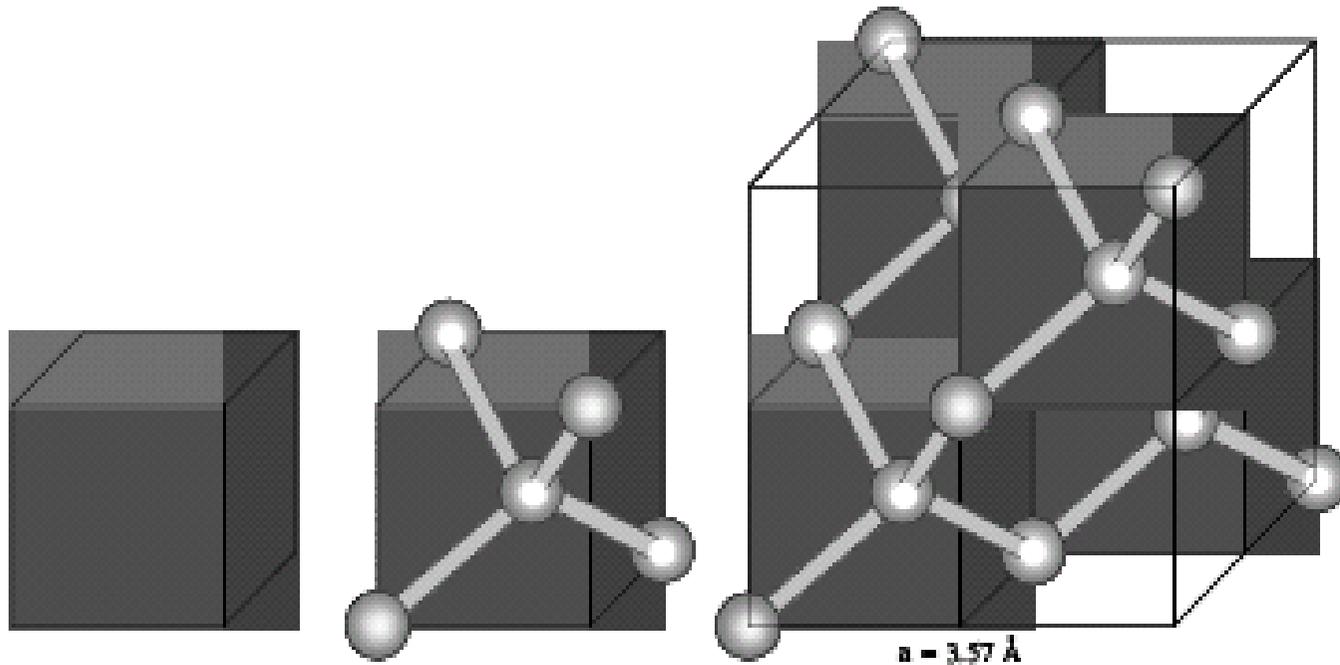
# Rivelatori a diamante

Cristina Tuve

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Catania & INFN, Catania  
e-mail: [Cristina.Tuve@ct.infn.it](mailto:Cristina.Tuve@ct.infn.it)

- Proprietà del diamante
  - Diamante come rivelatore di particelle
- Crescita diamanti CVD nel laboratorio di Roma Tor Vergata
- Caratterizzazione del diamante pCVD con tecniche nucleari
  - modello a 2 fluidi
- Rivelatori a diamante monocristallini sCVD
- Applicazioni: monitor di fascio, dosimetri, rivelatori per SLHC
  - Conclusioni

# Struttura cristallina



- atomi di **C** su un reticolo tetraedrico classificato in cristallografia: cubico a facce centrate
- forti legami  $sp^3$  (3.62 eV/legame)

# Proprietà del diamante

**Indice di rifrazione** 2.42 ( a  $\lambda = 550$  nm)

**Gemma**

**Durezza**

10 (scala Mohs)

**Lama**

**Conduttività termica**

20 W cm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> ( T<sub>ambiente</sub>: 5 volte Cu)

**Termostato**

## PROPRIETA' ELETTRONICHE

### RESISTENZA AGLI AMBIENTI OSTILI

Bassa reattività chimica

Elevata resistenza alle radiazioni

Funzionamento ad alte temperature

**Numero atomico Z**

6

**Lunghezza di radiazione X<sub>0</sub>**

12 cm

**Costante dielettrica**

5.7

**Energia per creare e-lacuna**

13 eV

**Gap**

5.4 eV

**Resistività**

10<sup>16</sup> Ω cm

**Campo di breakdown**

10<sup>7</sup> V/cm

**Mobilità di elettroni , lacune**

1800 , 1600 cm<sup>2</sup>/V s

**Velocità max degli elettr.**

2.7 10<sup>7</sup> cm/s



**monitor di fascio per acceleratori**

## Proprietà fondamentali del diamante e del silicio a 300°k

Proprietà	Diamante	Silicio
Numero Atomico Z	6	14
Peso Atomico A	12.01	28.09
Densità [g cm <sup>-3</sup> ]	3.52	2.33
Numero di atomi [x10 <sup>22</sup> cm <sup>-3</sup> ]	17.7	4.96
Struttura cristallina	diamante	diamante
Costante reticolare [Å]	3.57	5.43
Distanza fra primi vicini [Å]	1.54	2.35
Energia di coesione U [eV/atomo]	7.37	4.63
Compressibilità [x10 <sup>11</sup> m <sup>2</sup> N <sup>-1</sup> ]	0.226	1.012
Funzione di lavoro φ [eV]	4.81	4.58
Punto di fusione T <sub>m</sub> [°C]	~ 4100 *	1420
Conducibilità termica σ <sub>T</sub> [W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	20	1.27
Coeff. Diff. per elettroni D <sub>e</sub> [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	47	38
Coeff. Diff. per lacune D <sub>h</sub> [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	31	13
Costante dielettrica ε	5.70	11.9
E <sub>gap</sub> [eV]	5.5	1.12
Energia per coppia elettrone-lacuna E <sub>pair</sub> [eV]	13	3.6
Densità portatori intrinseci n <sub>i</sub> [cm <sup>-3</sup> ]	< 10 <sup>3</sup>	1.5 x 10 <sup>10</sup>
Resistività ρ <sub>e</sub> [Ω μm]	> 10 <sup>13</sup>	2.3 x 10 <sup>5</sup>
Mobilità elettroni μ <sub>e</sub> [cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	2400	1450
Mobilità lacune μ <sub>h</sub> [cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	2100	440
Tensione di rottura [V cm <sup>-1</sup> ]	10 <sup>7</sup>	3 x 10 <sup>3</sup>
Modulo di Young [GPa]	1134	131
Temperatura di fusione [°C]	3350	1410
Campo di breakdown [V / μm]	1000	30
Velocità di saturazione [cm/s]	~ 10 <sup>7</sup>	-
Lunghezza di radiazione [cm]	12.03	9.4
Perdita per ionizzazione [MeV/cm]	6.2	3.9
Num. Medio coppie/mip*100 μm	3600	9797
Num. Medio coppie/mip*300 μm	12938	29390

Energia di legame alta  
minim. danno da rad.

Mobilità:  $v = \mu E$

Elevata velocità di  
risposta

Campo di breakdown:

Elevato punto di rottura

E Gap: 5.5 eV

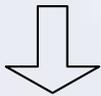
Basso rumore, bassa  
corrente di buio, operare a  
T elevate e con luce

# Riassumendo...

.... tuttavia

Proprietà uniche:

- Resistenza alle radiazioni
- Lavoro in ambienti ostili
- Alta UV/visible discriminazione
- Veloce risposta in tempo
- Basso rumore - bassa corrente di buio

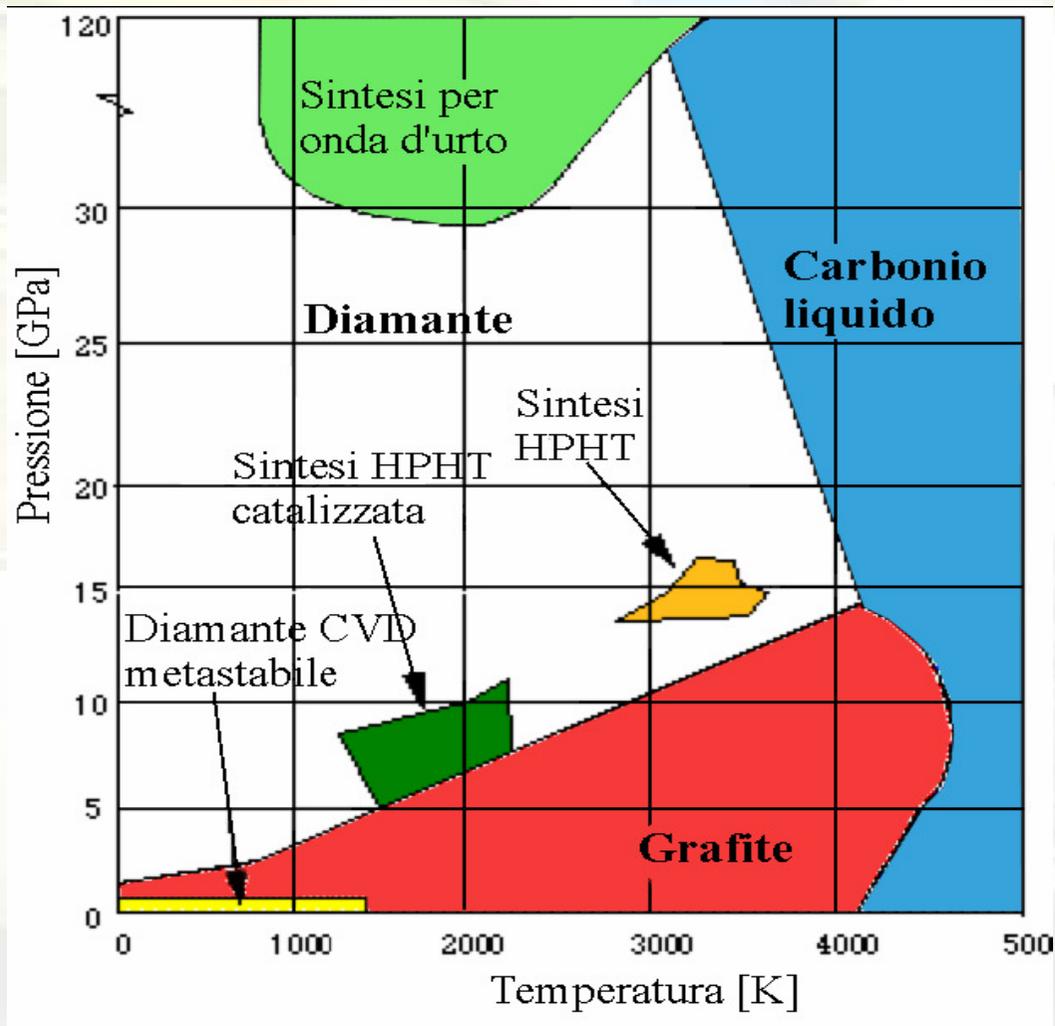


- Rivelatori di particelle
- Rivelatori di neutroni per reattori di fusione e fissione
- Dosimetri
- Sensori UV per osservazioni solari da satellite

▪ Diamanti naturali

- Monocristallini ma di piccole dimensioni
- Qualità elettroniche molto rare
- Costosi, non c'è riproducibilità

# Crescita del diamante



## Sintesi ad alta pressione ed alta temperatura (HPHT)

la crescita avviene nella regione del diagramma di fase del carbonio in cui il diamante è stabile

### Diamanti sintetici HPHT

- Basso costo
- monocristallini
- Qualità elettronica scarsa

## Sintesi a bassa pressione (CVD - Chemical Vapor Deposition)

Nel secondo il diamante viene cresciuto, a pressioni minori, nella regione in cui la grafite è stabile e il diamante metastabile

**Diagramma delle fasi del carbonio.**

# Diagramma di fase

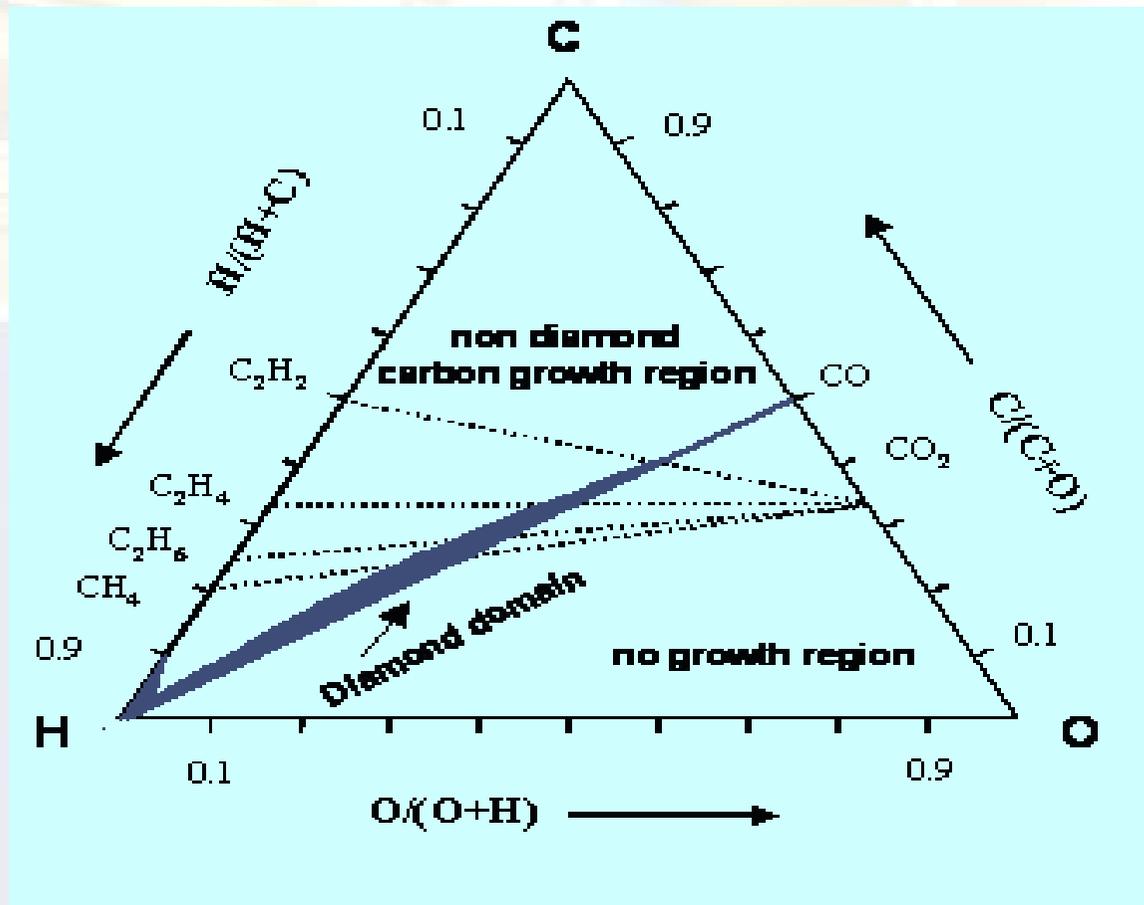


Diagramma di Bachmann. Diagramma ternario delle concentrazioni dei gas presenti nella camera di crescita.

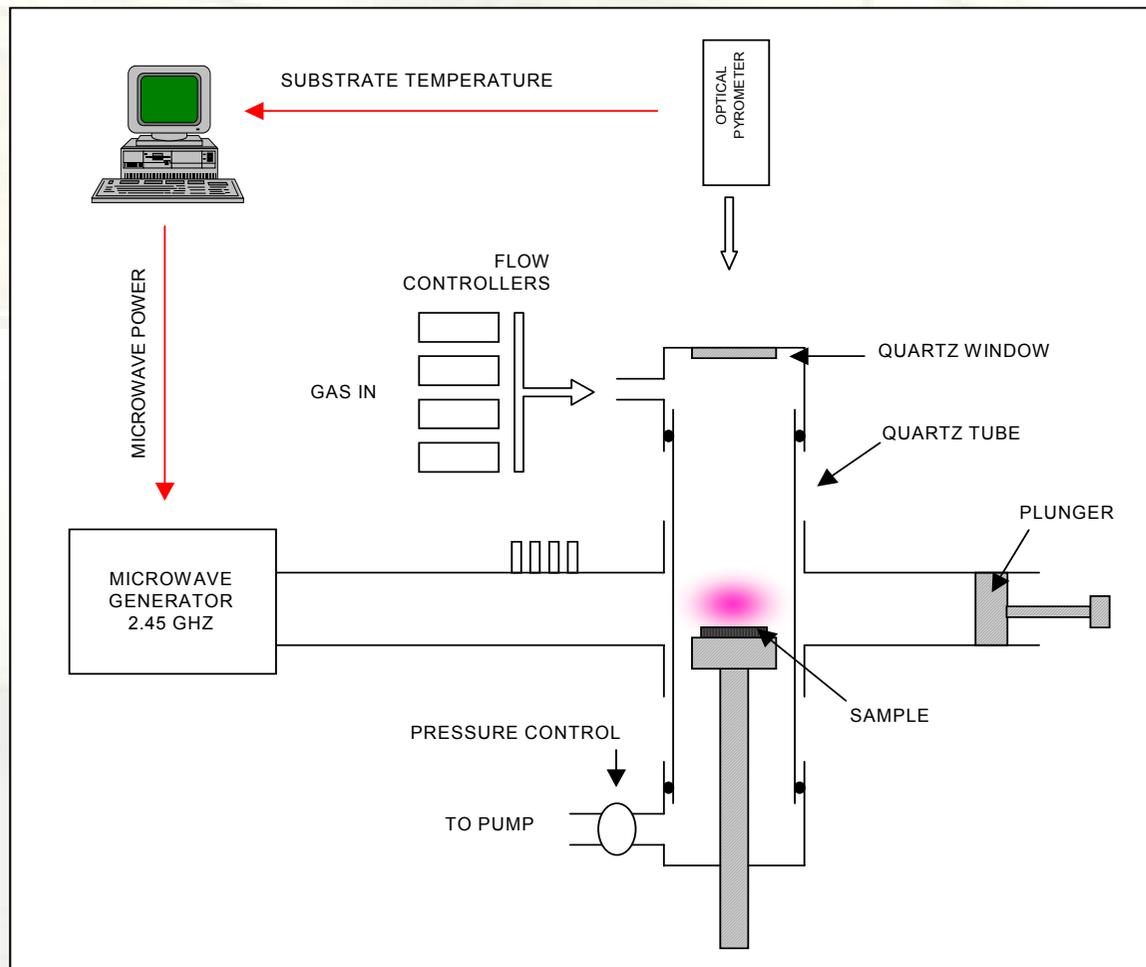
# Processo di crescita

- il carbonio è fornito da gas contenenti **C, O, H** ( $H_2 + CH_4$ ,  $CO_2 + CH_4$ ) 
- si depositano **grafite** ( $sp^2$ ) e **diamante** ( $sp^3$ ) su un supporto di silicio
- iniziano le fasi di **nucleazione e crescita** 
- si rompono i legami della grafite e si creano centri per la formazione del diamante

*Microwave Plasma Enhanced  
Chemical Vapor Deposition (MPECVD)*



# MicroWave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (MWPECVD)



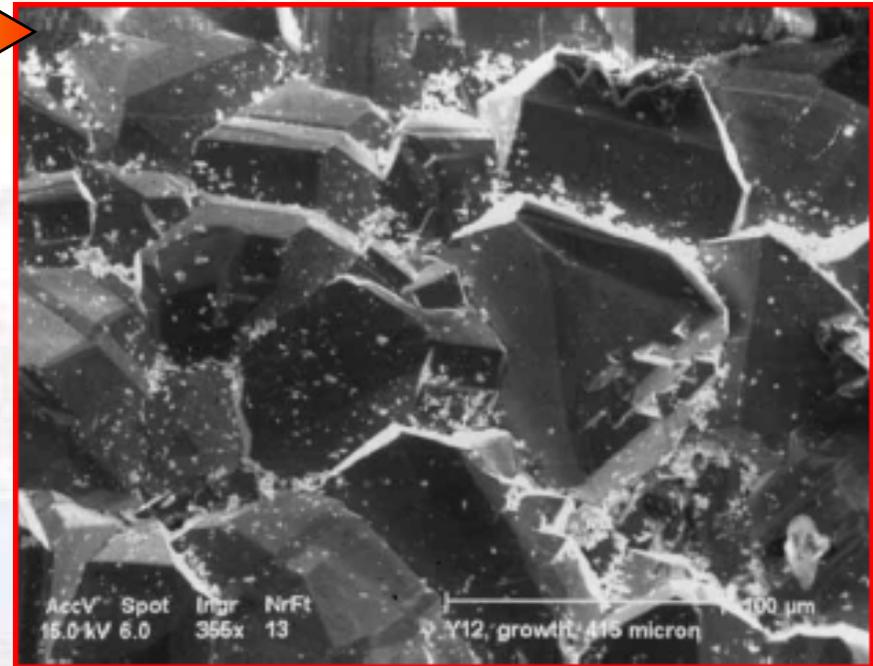
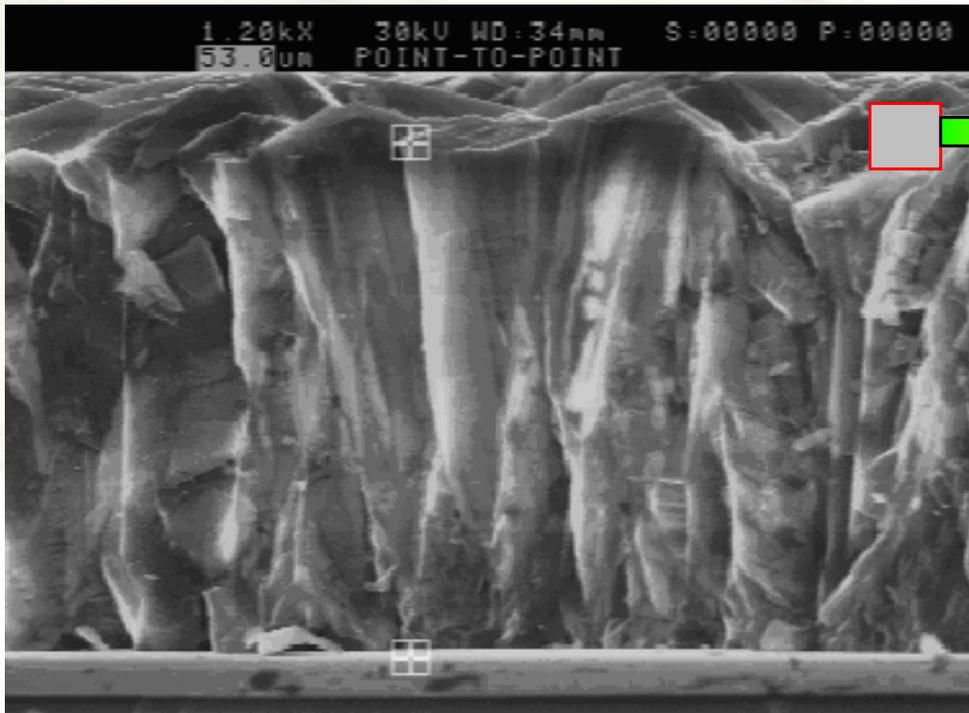
## Parametri tipici di crescita

Composizione del Plasma  $H_2 / CH_4$  1% mix  
Temperatura 750 °C  
Potenza delle Microonde 650 W  
Pressione 120 mbar  
Flusso dei gas 100 sccm

Substrato: (100) Si monocristallino  
(103M $\Omega$ )  
Pre-trattamento scratching

I diamanti sono costruiti nel Laboratorio  
dell'Università di Roma Tor Vergata

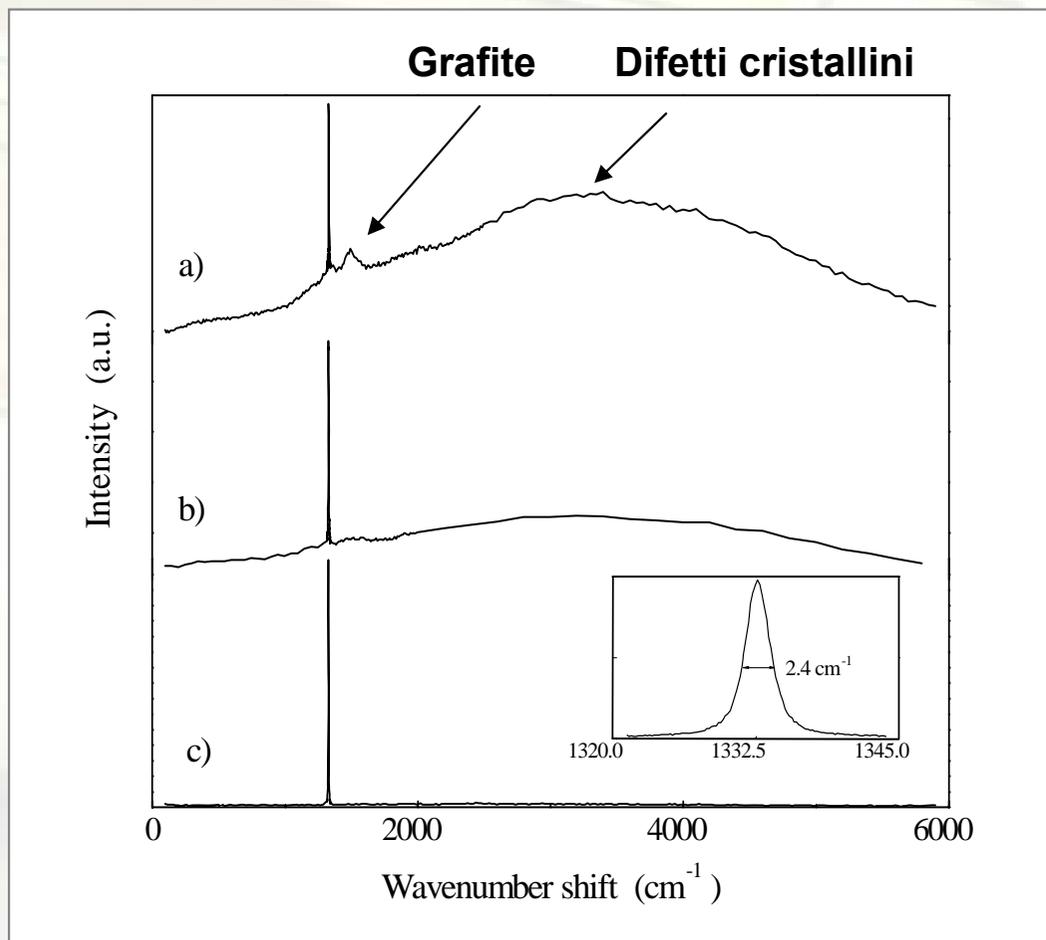
# Produzione dei film di diamante CVD policristallini



**Sezione di un film di diamante policristallino visto al microscopio elettronico a scansione (SEM). Sono evidenti la struttura multicolonnare e, in basso, il substrato di silicio su cui viene fatto crescere il diamante.**

**Lato di crescita di un campione di diamante con relativa scala delle distanze.**

# Caratterizzazione Raman



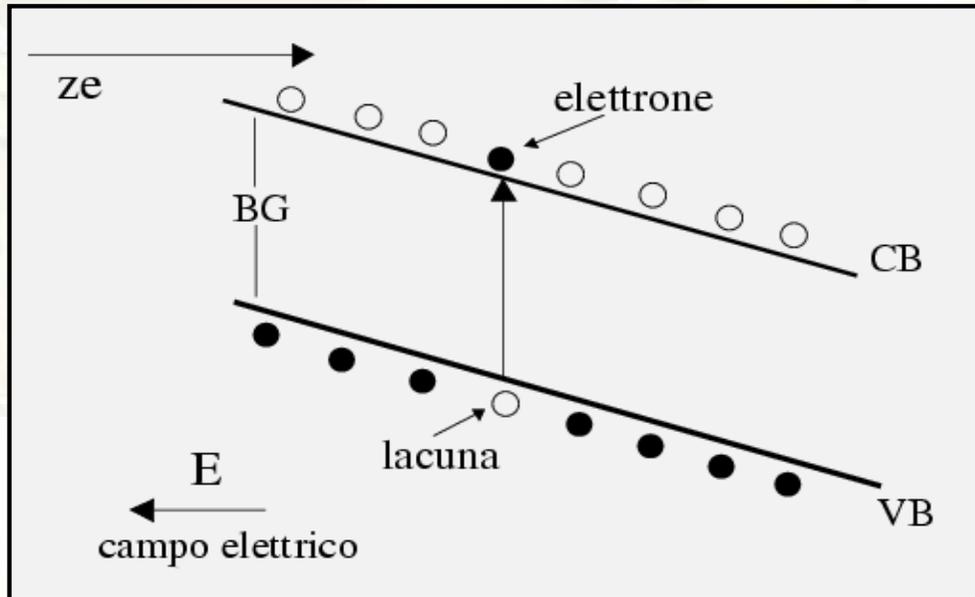
## Spettri PL di film di diamante CVD cresciuti in differenti condizioni

- a) CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> miscela gassosa, CH<sub>4</sub>=50.0%
  - b) CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> miscela gassosa, CH<sub>4</sub>=47.4%
  - c) CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> miscela gassosa, CH<sub>4</sub>=0.6%
- Dopo l'ottimizzazione del reattore di crescita*

- ✓ **FWHM = 2.4 cm<sup>-1</sup>** Larghezza del picco Raman confrontabile con quello del diamante naturale monocristallino (FWHM=2cm<sup>-1</sup>)
- ✓ **Assenza di fase non-diamante a ~ 1500 cm<sup>-1</sup>**
- ✓ **Banda PL estremamente debole ( $A_{PL}/A_D < 1/60$ )**

G. Messina - Università di Reggio Calabria

# Generazione della carica



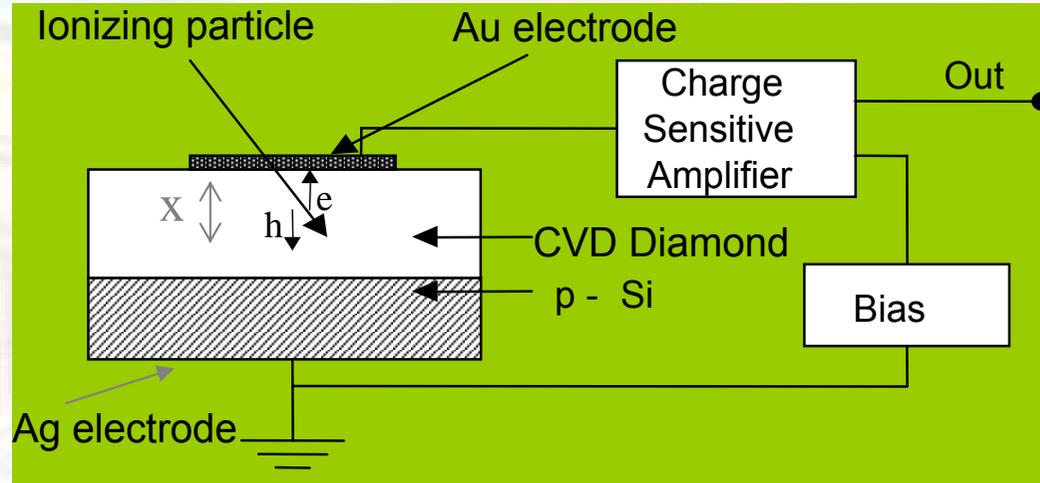
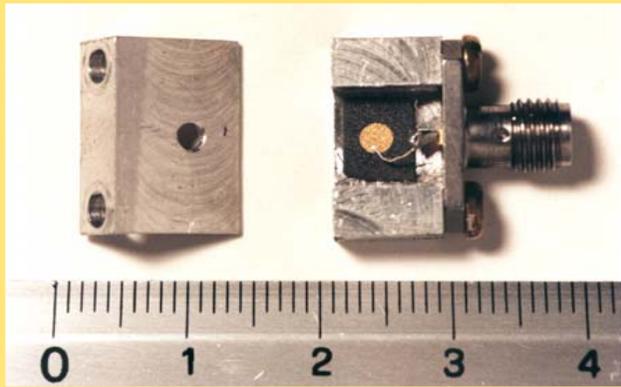
energia per coppia

- diamante 13 eV
- silicio 3.6 eV



- l'energia rilasciata da particelle cariche promuove elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione
- a differenza del silicio, il diamante ha un valore di energia necessario alla creazione di una coppia ( $e^- - h$ ) molto elevato

# Rivelatore a Diamante



**Contatto Au**  
**Superficie 7 mm<sup>2</sup>**  
**Diametro 2.5mm**  
**spessore 100 nm**  
**contatto Ag**  
**pittura**

$Q_c$  : carica indotta per ciascuna coppia e-h  
 D : spessore del rivelatore  
 e : carica dei portatori  
 x : distanza totale percorsa da e - h

$$Q_c = \frac{ex}{D}$$

➤ **Charge Collection Distance (CCD):**

$$\delta = \lambda_e + \lambda_h = (\mu_e \tau_e + \mu_h \tau_h) E$$

$\lambda_e, \lambda_h$  : libero cammino medio per elettroni e lacune

$\mu_e, \mu_h$  : mobilità di elettroni e lacune

$\tau_e, \tau_h$  : tempo di vita medio per lacune ed elettroni

**E:** campo elettrico applicato

➤ **Efficienza**

$$\eta = Q_c / Q_0$$

$Q_c$  : carica rivelata

$Q_0$  : carica totale

# CCD - Efficienza

Il legame tra  $\eta$  e  $\delta$  si può dedurre dalla teoria di Hecht (\*):

Dalla teoria di Hecht, supponendo un film omogeneo ed essendo  $G$  la profondità di penetrazione della particella ionizzante, :

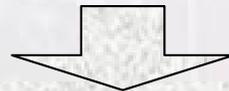
$$\eta = \frac{\delta}{D} \left[ 1 - \frac{\delta}{4G} \left( 1 - e^{-\frac{2G}{\delta}} \right) \left( 1 + e^{-\frac{2(G-D)}{\delta}} \right) \right]$$

$G$ : profondità di penetrazione della particella ionizzante;  $D$ : spessore del rivelatore.

Si assume:  $E$  uniforme,  $\lambda_e = \lambda_h$  e una distribuzione di ionizzazione  $u(x) = \text{costante}$ .

Per avere una alta efficienza occorre che la distanza di raccolta delle cariche sia alta. Quindi una misura di efficienza si può mettere in relazione ai difetti presenti all'interno del campione

**Campioni che mostano uno stretto picco Raman e un fondo di fotoluminescenza basso possono presentare un diverso comportamento quando essi vengono utilizzati come rivelatori di particelle**



**La rivelazione di particelle può essere usata come una sonda per caratterizzare i difetti presenti nel cristallo.**

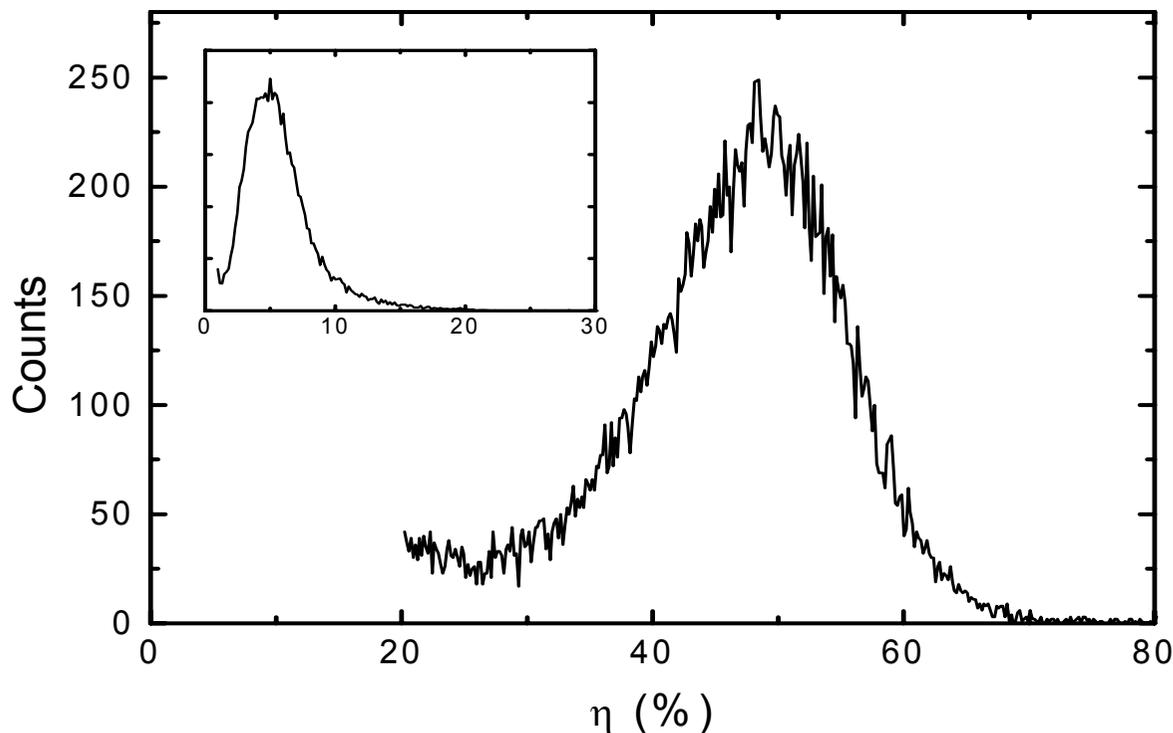
(\*) K.Hecht, Z.Phys 77, 235(1932)

# pumping

## Effetto ottenuto tramite pre-irraggiamento con particelle $\beta$

Particelle  $\alpha$  di 5.5 MeV emesse da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$ ; film  $d=100\ \mu\text{m}$ ;  $V=100\ \text{volt}$

- $\langle\eta\rangle = 47\ \%$
- $G = 15\ \mu\text{m}$

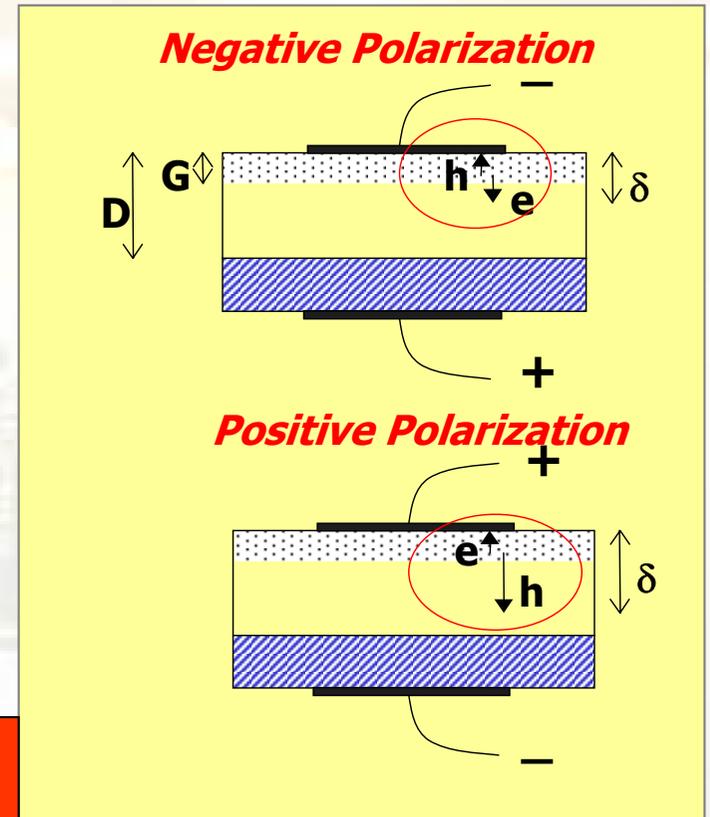
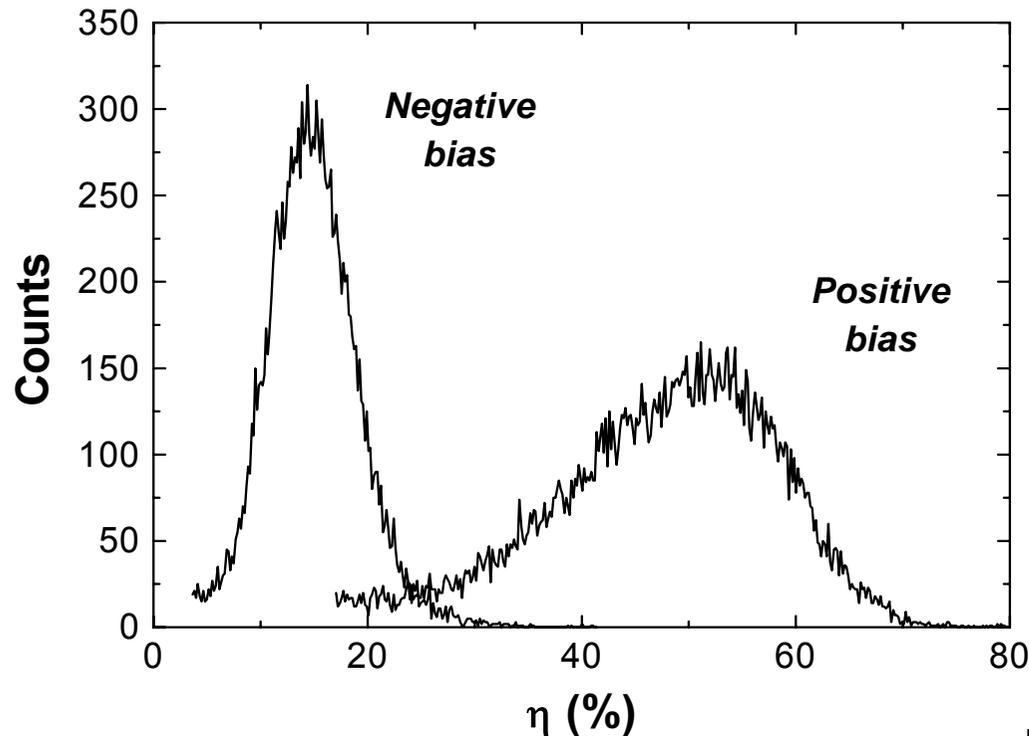


- ✓ *Aumento dell'efficienza e della CCD*
- ✓ *Cambiamento nella forma del picco*
- ✓ *L'effetto è stabile per mesi se il campione è mantenuto al buio*
- ✓ *Risoluzione in energia >50%*

Marinelli et al. *Applied Physics Letters* 75 (1999) 3216

Scuola Nazionale INFN  
Legnaro (PD) 21 Aprile 2009

# Effetto della polarità



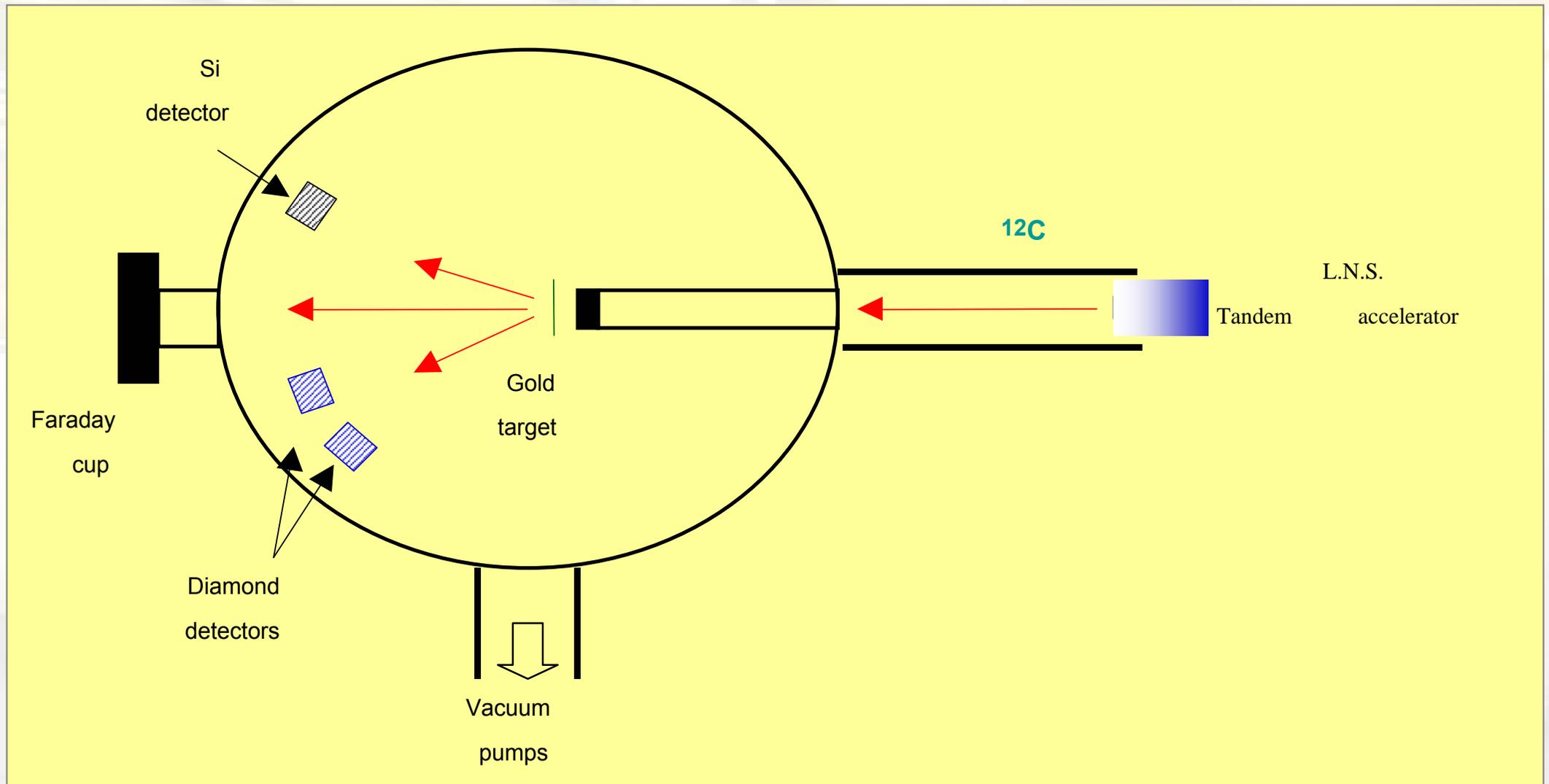
$$\lambda_h \approx \lambda_e$$

$$\lambda_h \gg \lambda_e$$

**As-grown:** il comportamento del rivelatore non dipende dalla polarizzazione

**Pumping:** per polarità **negativa** non si nota nessun cambiamento del segnale in quanto all'impulso contribuiscono quasi esclusivamente le lacune che vanno verso l'elettrodo negativo. Per polarità **positiva** poiché si saturano i difetti deep-centers (trappole per le lacune) aumenta δ (lacune viaggiano per più tempo indisturbate) aumenta, quindi l'ampiezza del segnale.

# Set-up sperimentale LNS



# All'acceleratore Cockcroft-Walton del Dipartimento di Fisica e Astronomia di Catania

LNS

Diffusore Au: 104 $\mu$ g/cm<sup>2</sup>  
Fascio: Protoni e Alfa  
Energia Protoni: (0.4 ÷ 2.0) MeV  
Energia Alfa: (0.8 ÷ 6.0) MeV  
Penetrazione Protoni: (2.1 ÷ 24.4)  $\mu$ m  
Penetrazione Alfa: (1.4 ÷ 15.6)  $\mu$ m

Energia depositata Protoni: (0.4÷2.0)MeV  
Energia depositata Alfa: (0.8÷6.0)MeV

Densità di energia di ionizzazione Protoni:  
(8.7×10<sup>-2</sup>)MeV/ $\mu$ m

Densità di energia di ionizzazione Alfa:  
0.4MeV/ $\mu$ m

Diffusore Au: 286 $\mu$ g/cm<sup>2</sup>  
Fascio: <sup>6</sup>Li e <sup>12</sup>C  
Energia <sup>6</sup>Li: (6.5 ÷ 47.4) MeV  
Energia <sup>12</sup>C: (16.2 ÷ 92.2)MeV  
Penetrazione <sup>6</sup>Li: (7.2 ÷ 171) $\mu$ m  
Penetrazione <sup>12</sup>C: (7.5 ÷ 87.4) $\mu$ m

Energia depositata <sup>6</sup>Li: (6.5 ÷ 19.1)MeV  
Energia depositata <sup>12</sup>C: (16.1 ÷ 55.6)MeV

Densità di energia di ionizzazione <sup>6</sup>Li:  
0.69MeV/ $\mu$ m

Densità di energia di ionizzazione <sup>12</sup>C:  
1.94MeV/ $\mu$ m

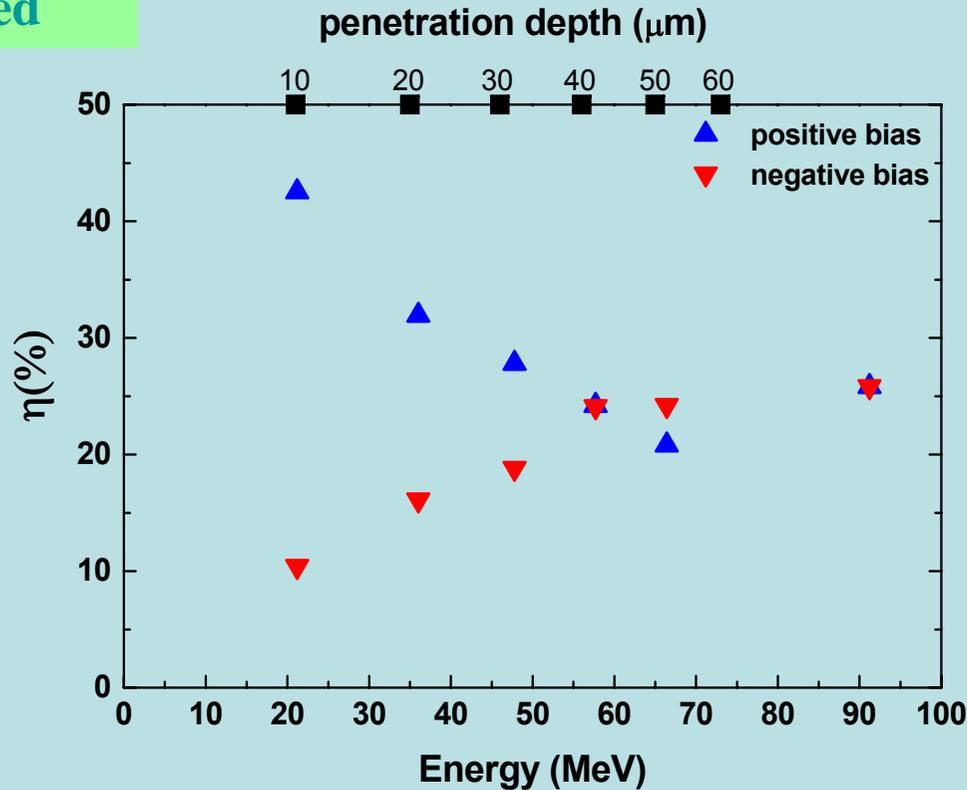
- ❖ Sia i protoni che le alfa perdono tutta la loro energia all'interno dei campioni (D1 da 50 $\mu$ m e SCD31 da 45 $\mu$ m); la profondità di penetrazione va da 1.4 $\mu$ m fino ai 24.4 $\mu$ m.

$E_{inc} > 55$  MeV : <sup>12</sup>C perde solo parte dell'energia e la profondità di penetrazione è lo spessore del rivelatore; ioni fortemente penetranti permettono di effettuare uno scanning completo in penetrazione dei campioni e, quindi, di capire la differenza di risposta del rivelatore al variare di G [ $\mu$ m].

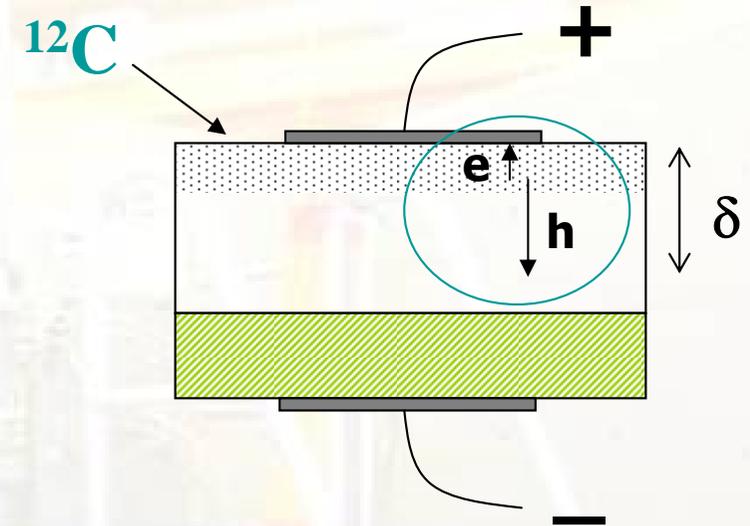
$E_{inc} < 55$  MeV : <sup>12</sup>C perde tutta l'energia e la profondità di penetrazione va da 10.5  $\mu$ m allo spessore del rivelatore

# Risultati sperimentali (LNS)

V=120V  
L= 55μm  
pumped



*Tensione positiva sul lato di crescita*



$^{12}\text{C}$  colpisce il rivelatore sul lato di crescita in ogni caso

*per elettroni e lacune i liberi cammini medi sono diversi:*

$$\text{Bias}(+) : \lambda_e < \lambda_h$$

$$\text{Bias}(-) : \lambda_e \sim \lambda_h$$



- ❖ **Bassa energia**      $\eta(+)$  >  $\eta(-)$ ;
- ❖ **Alta energia**      $\eta(+)$  =  $\eta(-)$   $\approx$  25 %

# Efficienza

distribuzione uniforme dei difetti ==>

$u(x) = \text{costante da } 0 \text{ a } G$

$$\eta = \frac{\delta}{D} \left[ 1 - \frac{\delta}{4G} \left( 1 - e^{-\frac{2G}{\delta}} \right) \left( 1 + e^{-\frac{2(G-D)}{\delta}} \right) \right]$$

Se si considerano differenti liberi cammini medi  $\lambda_e$  and  $\lambda_h$  per elettroni e lacune

elettroni

lacune

$$L_e = \lambda_e \left[ 1 - \frac{\lambda_e}{G} \left( 1 - \exp \frac{-G}{\lambda_e} \right) \right]$$

$$L_h = \lambda_h \left[ 1 - \frac{\lambda_h}{G} \left( \exp \frac{G-D}{\lambda_h} - \exp \frac{-D}{\lambda_h} \right) \right]$$

• **Efficienza:**

$$\eta = \frac{L_e + L_h}{D}$$

1. Se la profondità di penetrazione è piccola:  
( $\alpha$ -particle e  $^{12}\text{C}$  di bassa energia)

$$G \rightarrow 0$$

Polarizzazione positiva

$$\eta^- < \eta^+$$

Polarizzazione negativa

$$\eta = \frac{\lambda_h}{D} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{D}{\lambda_h} \right) \right]$$
$$\eta = \frac{\lambda_e}{D} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{D}{\lambda_e} \right) \right]$$

2. Se il fascio non si ferma nel rivelatore:  
( $^{12}\text{C}$  di alta energia )

$$G = D$$

$$\eta = \frac{\lambda_e + \lambda_h}{D} - \frac{\lambda_e^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{D}{\lambda_e} \right) \right] + \lambda_h^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{D}{\lambda_h} \right) \right]}{D^2}$$

**R. Potenza, C. Tuvè, *Measurements of defect density inside CVD diamond films through nuclear particle penetration*, in “Carbon: the Future Material for Advanced Technology Applications”, Springer Series Topics in Applied Physics, 2005, pag.267**

# Modello per la distribuzione dei difetti



Separiamo gli effetti dei difetti ai **bordi di grano** e dei difetti **in grano**

**Bordi di grano**  
 ✓ concentrati all'interfaccia Si-D  
 ✓ stesso contributo per i due tipi di portatore

**Difetti in grano**  
 ✓ omogenei lungo lo spessore del film  
 ✓ diverso contributo per i due tipi di portatore

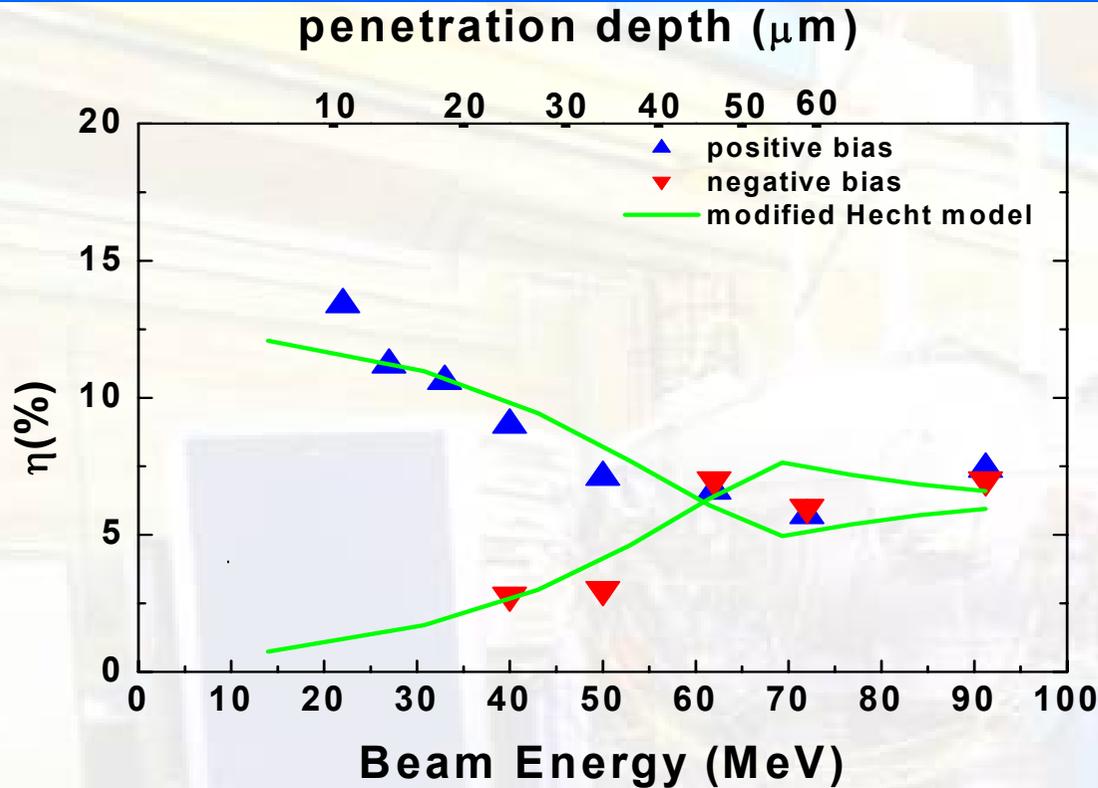
$$w_{h,e}(x) = \frac{1}{\lambda_{h,e}} + b \cdot e^{\frac{x-D}{c}}$$

**Difetti in grano:** supposti uniformemente distribuiti nel campione  
**Bordi di grano:** concentrati sul lato del substrato (distribuzione esponenziale (\*))

$$\frac{1}{w_e(x)} + \frac{1}{w_h(x)} = \delta(x)$$

**Distanza di raccolta *dipendente da x***

# Curva teorica



La convoluzione della  $\eta(x,y,z)$  locale con la produzione di densità di carica (curva di Bragg) ci dà l'efficienza di raccolta carica media per la particella.

$$w_{h,e}(x) = a_{h,e} + be^{(x-D)/c}$$

$$1/a_e = 0.3 \mu\text{m}; \quad 1/a_h = 13 \mu\text{m}$$

$$b = 3 \mu\text{m}^{-1}; \quad c = 8 \mu\text{m}$$

$$\delta(0) / \delta(D/2) = 0.1$$

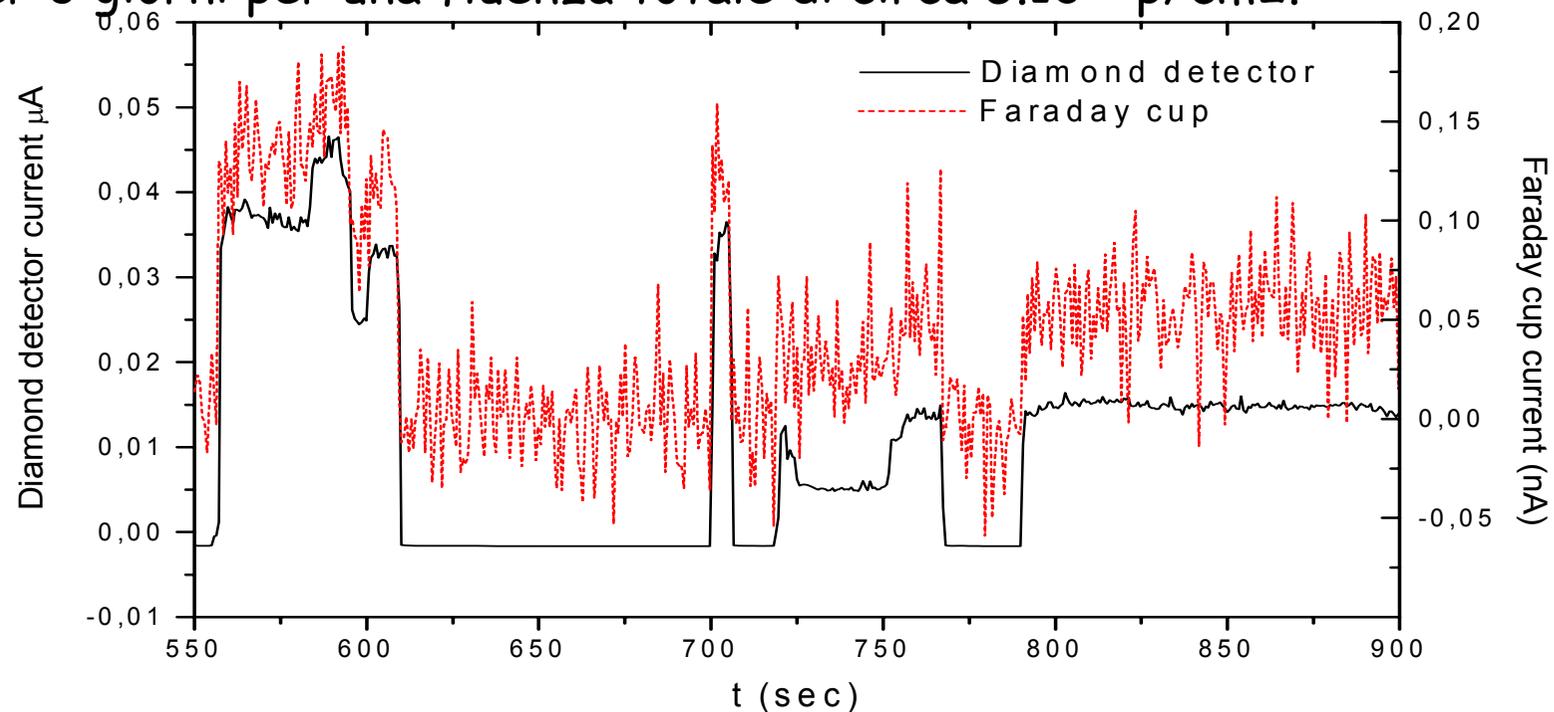
$$\delta(D/2) / \delta(D) = 0.6$$

• Difetti concentrati sul lato del substarto ( $c=8\mu\text{m}$ )

Soluzione migliore:  
diamanti CVD omoepitassiali su  
substrati HPHT di basso costo

# Monitor di fascio: confronto diamante-Faraday cup

I diamanti pCVD sono stati usati al LNS per monitorare il fascio accelerato che incide direttamente sul campione di diamante. Il fascio di p (26MeV) ha  $10^{10}$  ioni/s.cm<sup>2</sup>, cioè ha una fluensa di circa  $10^{14}$  p/cm<sup>2</sup>/h. Il diamante è stato esposto al fascio diretto per 3 giorni per una fluensa totale di circa  $5 \cdot 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup>.



- ❖ Risposta del diamante più sensibile di quella della Faraday cup  
(fluttuazioni più grandi nel segnale di uscita della faraday cup: sono rivelati molto meno elettroni)
- ❖ Velocità di risposta (in questa scala) come Faraday cup

# Crescita di diamanti monocristallino

## Diamanti policristallini CVD

- ✓ Grande area di deposizione
- ✓ Campioni molto difettosi
- ✓ Effetti di polarizzazione e di memoria
- ✓ Scarsa stabilità e riproducibilità
- ✓ Lenta risposta temporale

Substrati

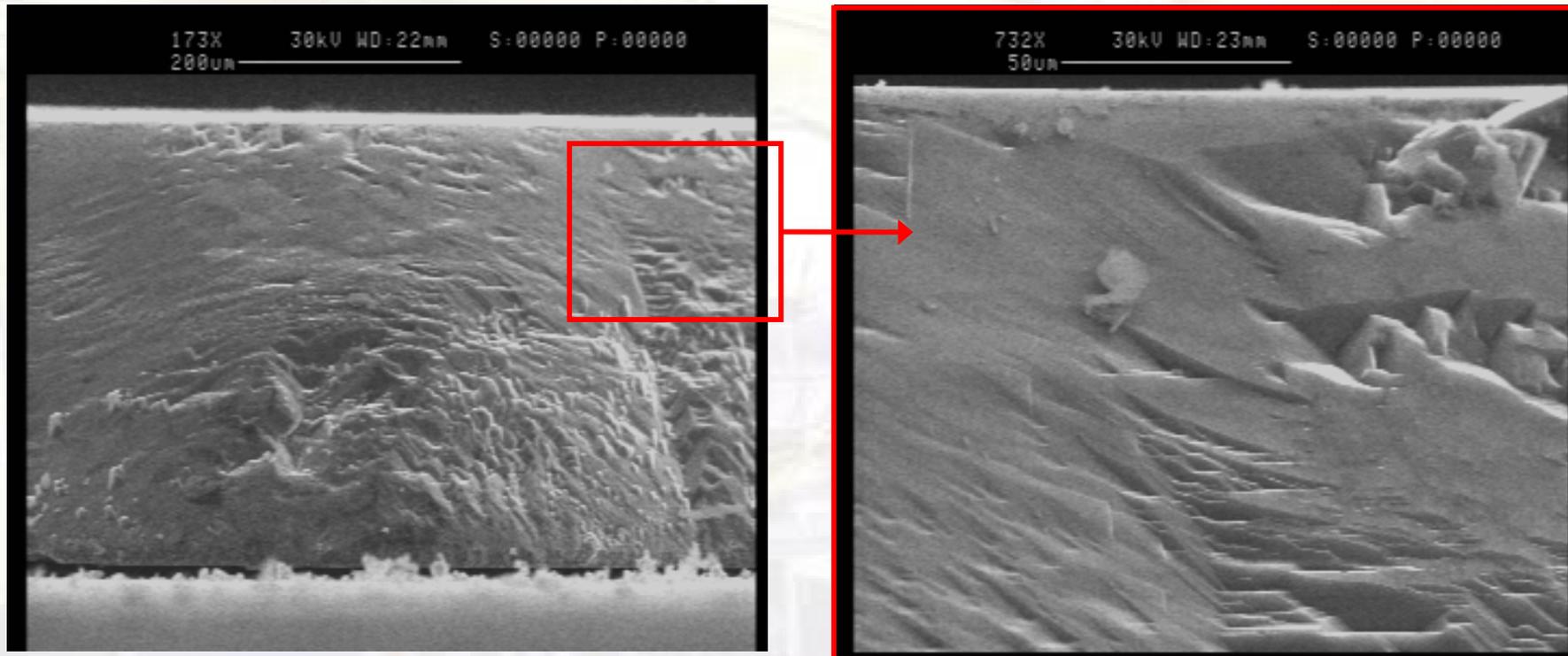
(100) orientati HPHT Ib-type (Element 6)

## Parametri tipici di crescita

Composizione del plasma	99% H <sub>2</sub> - 1% CH <sub>4</sub>
Temperatura	650 – 800 °C
Microwave power	500 - 700 W
Pressione	100 – 150 mbar
Gas flow rate	40 – 100 sccm



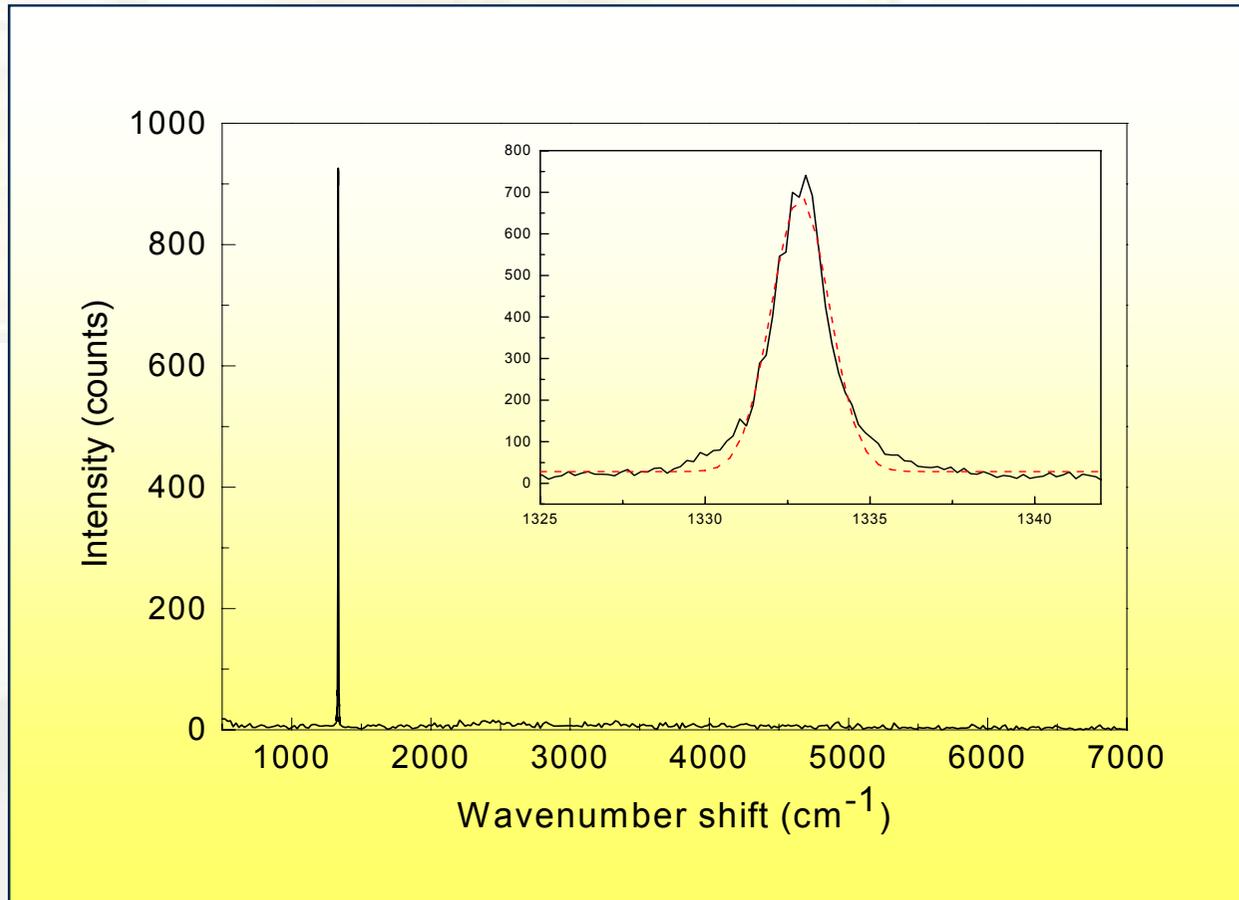
# Produzione dei film di diamante CVD monocristallini



**Sezione di un film di diamante monocristallino su substrato di diamante naturale visto al SEM.**

# caratterizzazione 1

Raman-PL spectroscopy  $\Rightarrow$  buona qualità del film di diamante



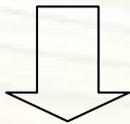
## analisi Micro-Raman

- ✓ 514 nm Ar laser
- ✓ Picco @ 1332.9 cm<sup>-1</sup>
- ✓ FWHM = 1.8 cm<sup>-1</sup>  
(incluso all'allargamento strumentale)
- ✓ Fondo di fotoluminescenza estremamente basso
- ✓ Homogeneous results all over the sample surface

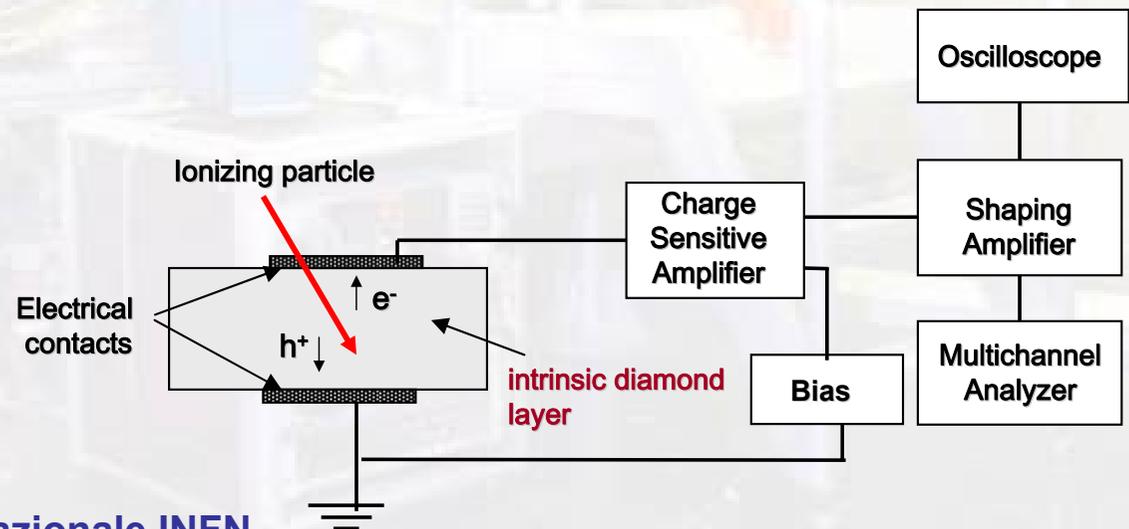
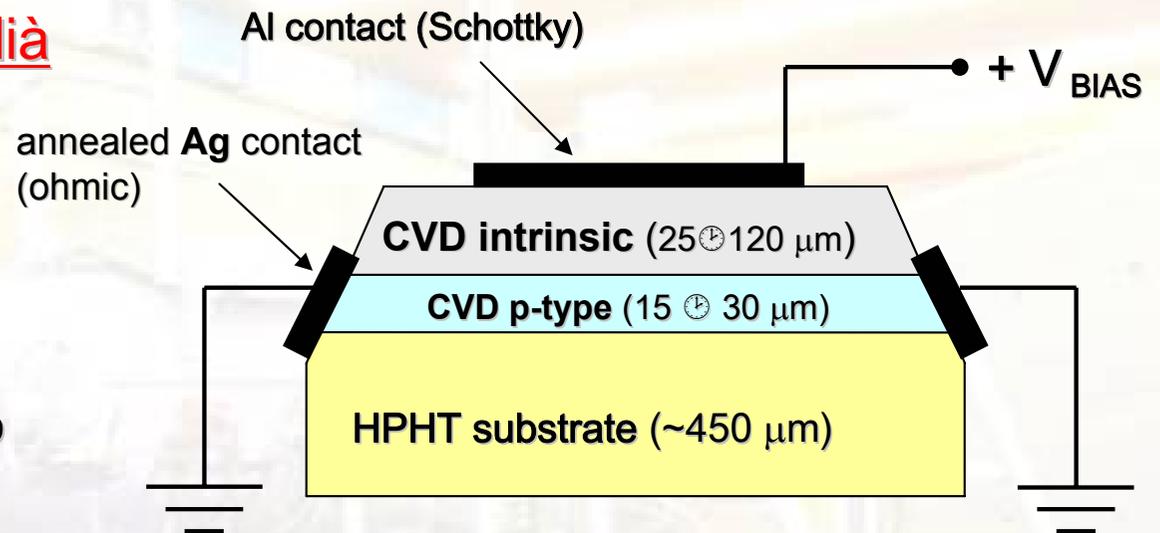
# Rivelatore sCVD

Configurato in una struttura p-type /intrinsic /Schottky-metal

Prestazioni, Stabilità e Riproducibilità



- alta qualità dei diamanti
- indagine sui contatti elettrici
- Rimuovere il contributo del substrato



Scuola Nazionale INFN  
Legnaro (PD) 21 Aprile 2009

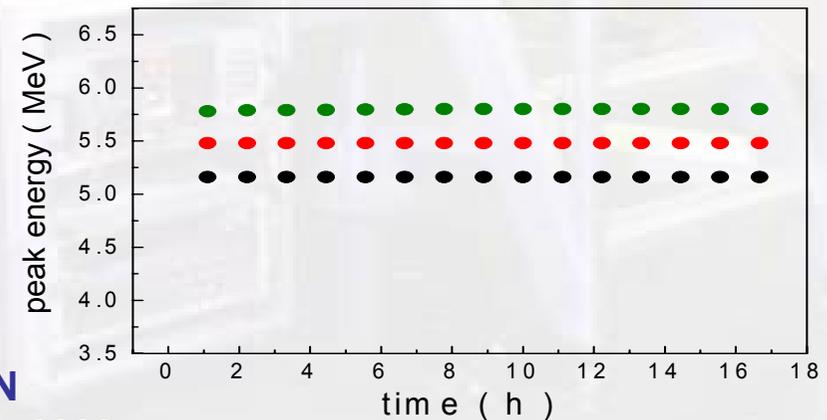
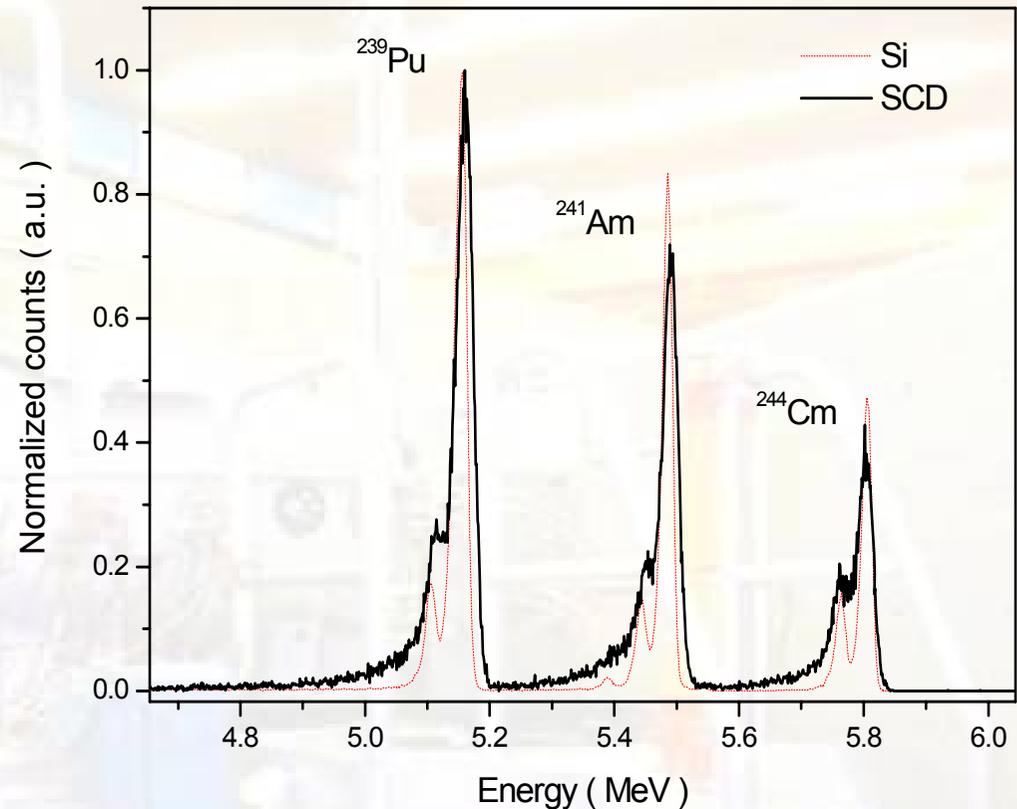
# Caratterizzazione spettroscopica

Tripla sorgente  $\alpha$

$^{239}\text{Pu} \rightarrow 5.16 \text{ MeV}$

$^{241}\text{Am} \rightarrow 5.48 \text{ MeV}$

$^{244}\text{Cm} \rightarrow 5.80 \text{ MeV}$

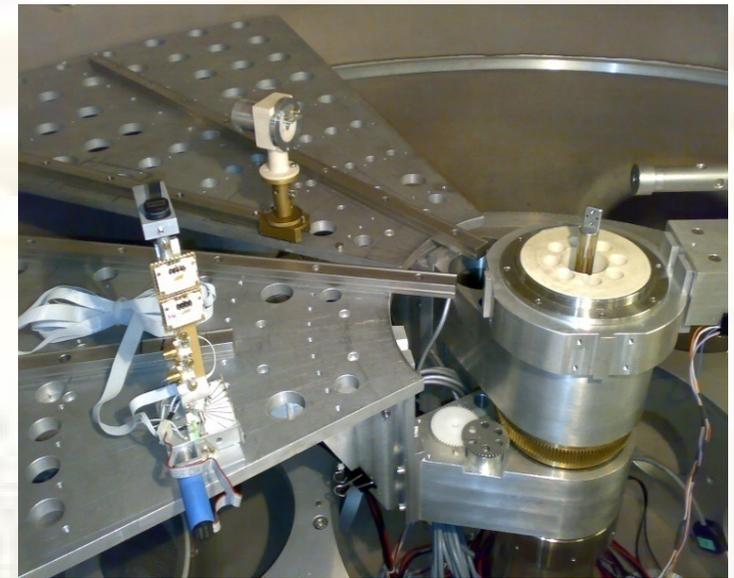
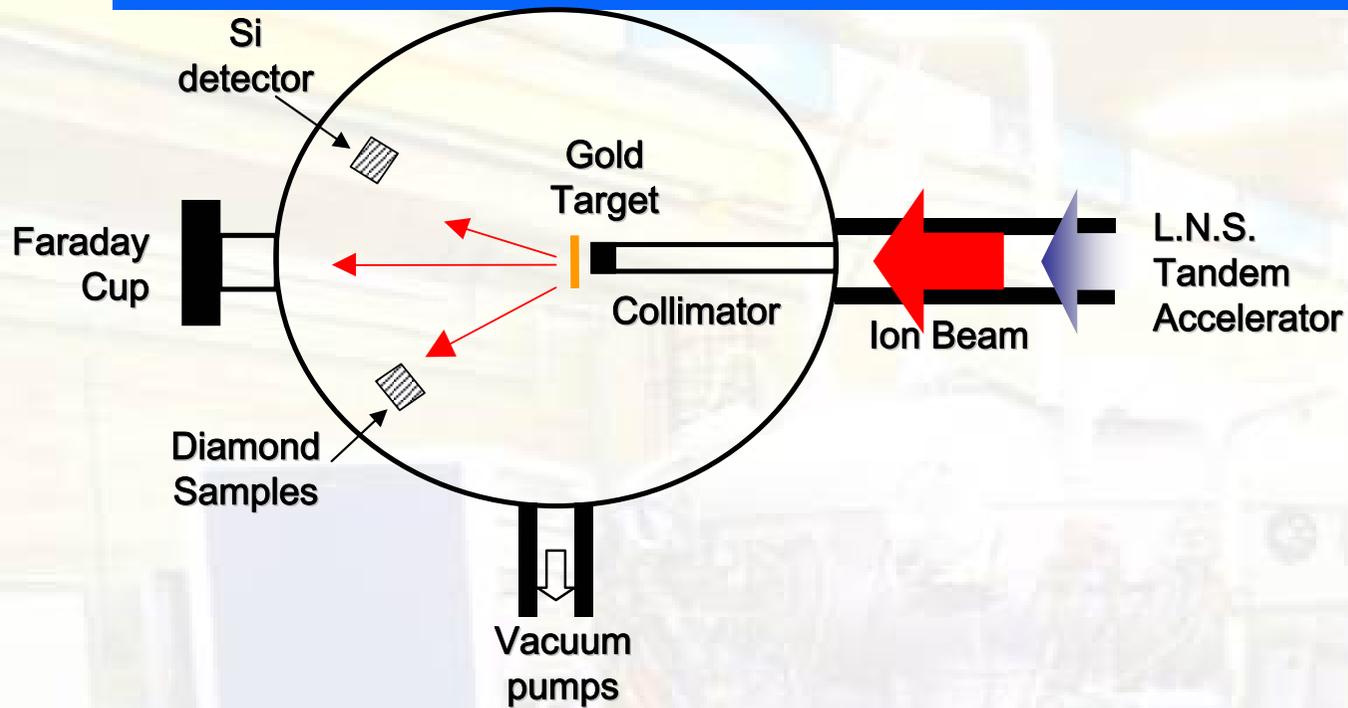


- ✓ 100% efficienza di raccolta delle cariche
- ✓ 100% efficienza di rivelazione
- ✓ risoluzione in energia 0.5-1.8 %
- ✓ No effetto di pompaggio
- ✓ Stabilità a lungo termine (no effetti di polarizzazioni)
- ✓ Riproducibilità

Prof. Cristina Tuvè

Scuola Nazionale INFN  
Legnaro (PD) 21 Aprile 2009

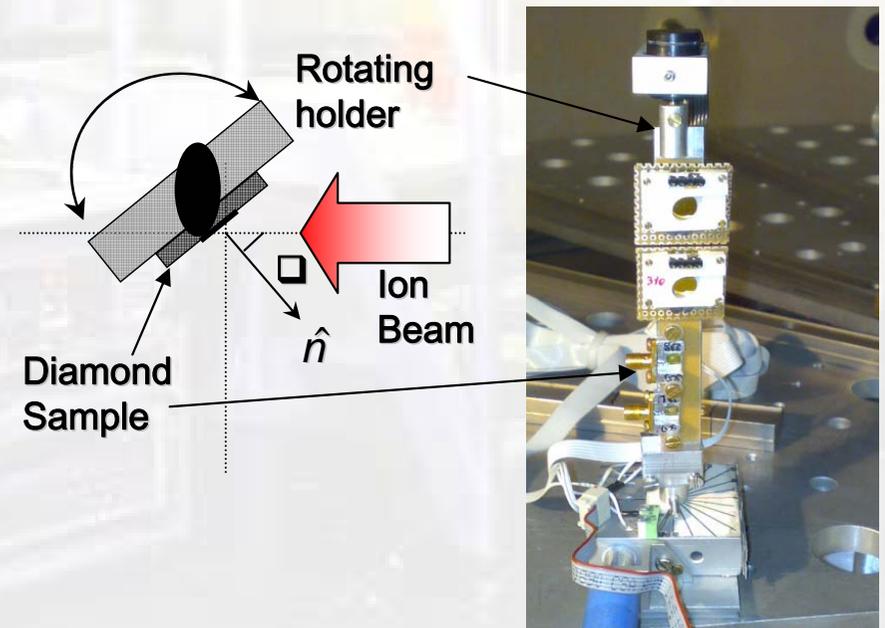
# Set-up sperimentale al LNS



## VIM (variable incidence method)

L'angolo della particella incidente è stata variata nell'intervallo  $0^\circ \div 90^\circ$  allo scopo di cambiare la profondità di penetrazione delle particelle incidenti

- Efficienza di rivelazione
- Risoluzione in energia vs. Profondità di penetrazione
- Stabilità della risposta



# Protoni (LNS)

Spessore dello strato attivo: 55  $\mu\text{m}$  ( «  $p_d$  (protoni) @ 0° incidence )

**$p^+$  6 MeV**

$p_d$  ⌚ 158  $\mu\text{m}$  @ 0°

$p_d$  ⌚ 3.8  $\mu\text{m}$  @ 90°

**$p^+$  10 MeV**

$p_d$  ⌚ 389  $\mu\text{m}$  @ 0°

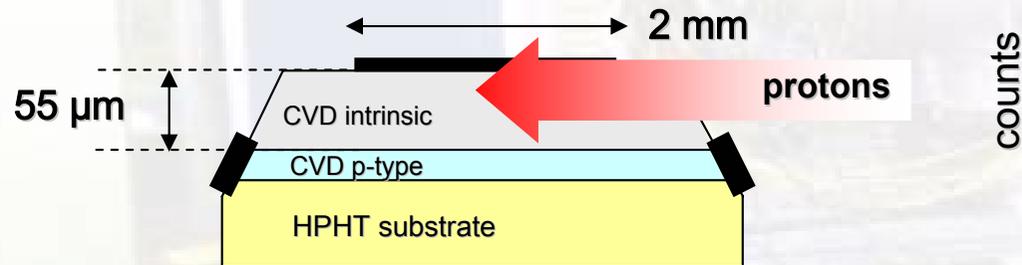
$p_d$  ⌚ 9.3  $\mu\text{m}$  @ 90°

**$p^+$  11.5 MeV**

$p_d$  ⌚ 500  $\mu\text{m}$  @ 0°

$p_d$  ⌚ 12.2  $\mu\text{m}$  @ 90°

**GRAZING INCIDENCE:  $\theta \approx 90^\circ$**



**$p^+$  6 MeV**

$\theta_{\text{INC}}$  ⌚ 90°

$V_{\text{BIAS}} = +75\text{V}$

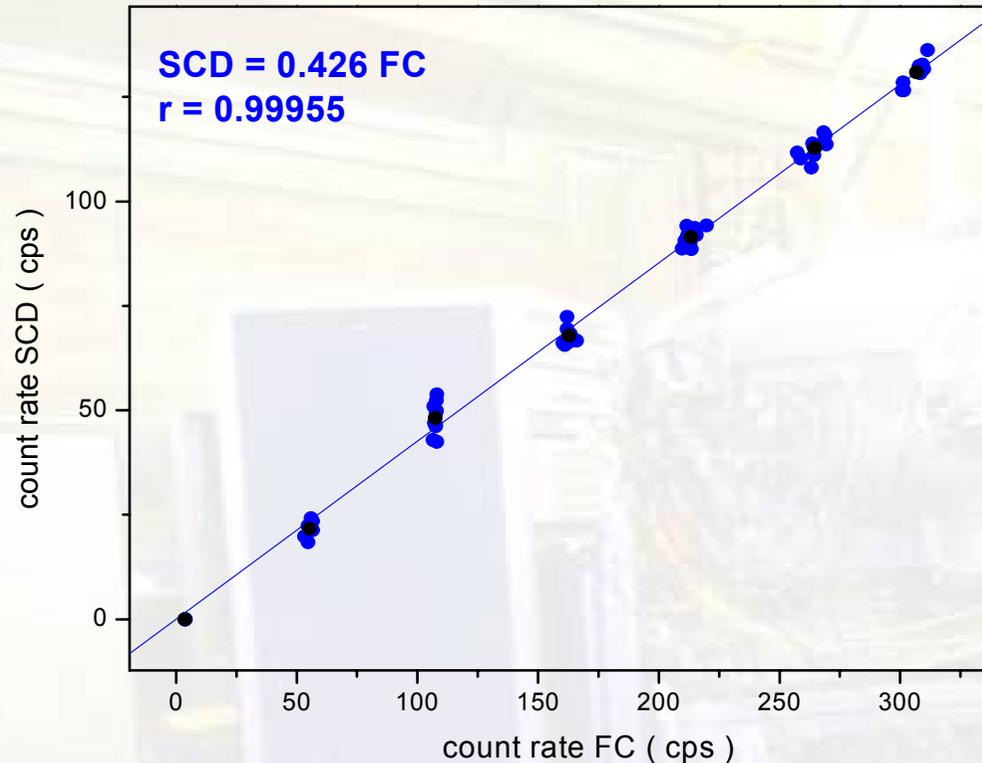
$\eta\% = 99.6\%$

Peak: 998.22 = 5912.71 keV  
 FWHM: 89.80 FW(1/5)M: 147.74  
 Gross Area: 2512  
 Net Area: 2512  $\pm$ 50

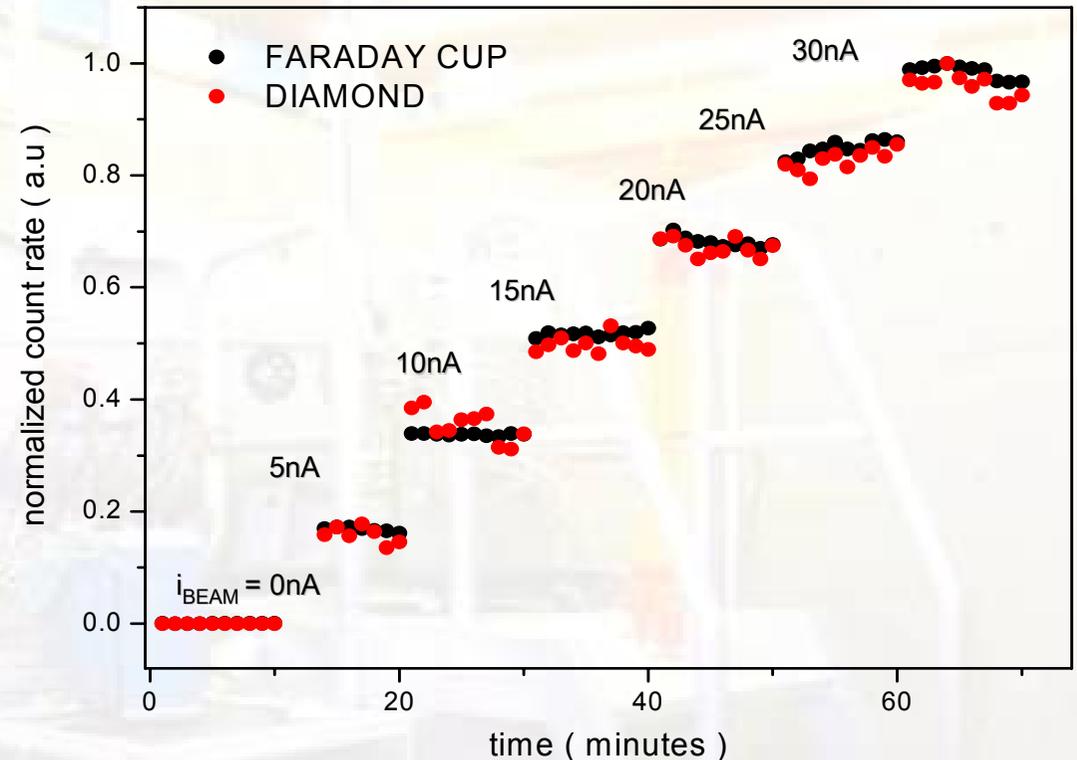
- La più alta efficienza di rivelazione
- La più alta risoluzione in energia

# Linearità: 11.5 MeV protoni

Count rate of the CVD diamond detector Vs. count rate of the Faraday Cup



Comparison between the temporal response of CVD diamond and Faraday cup



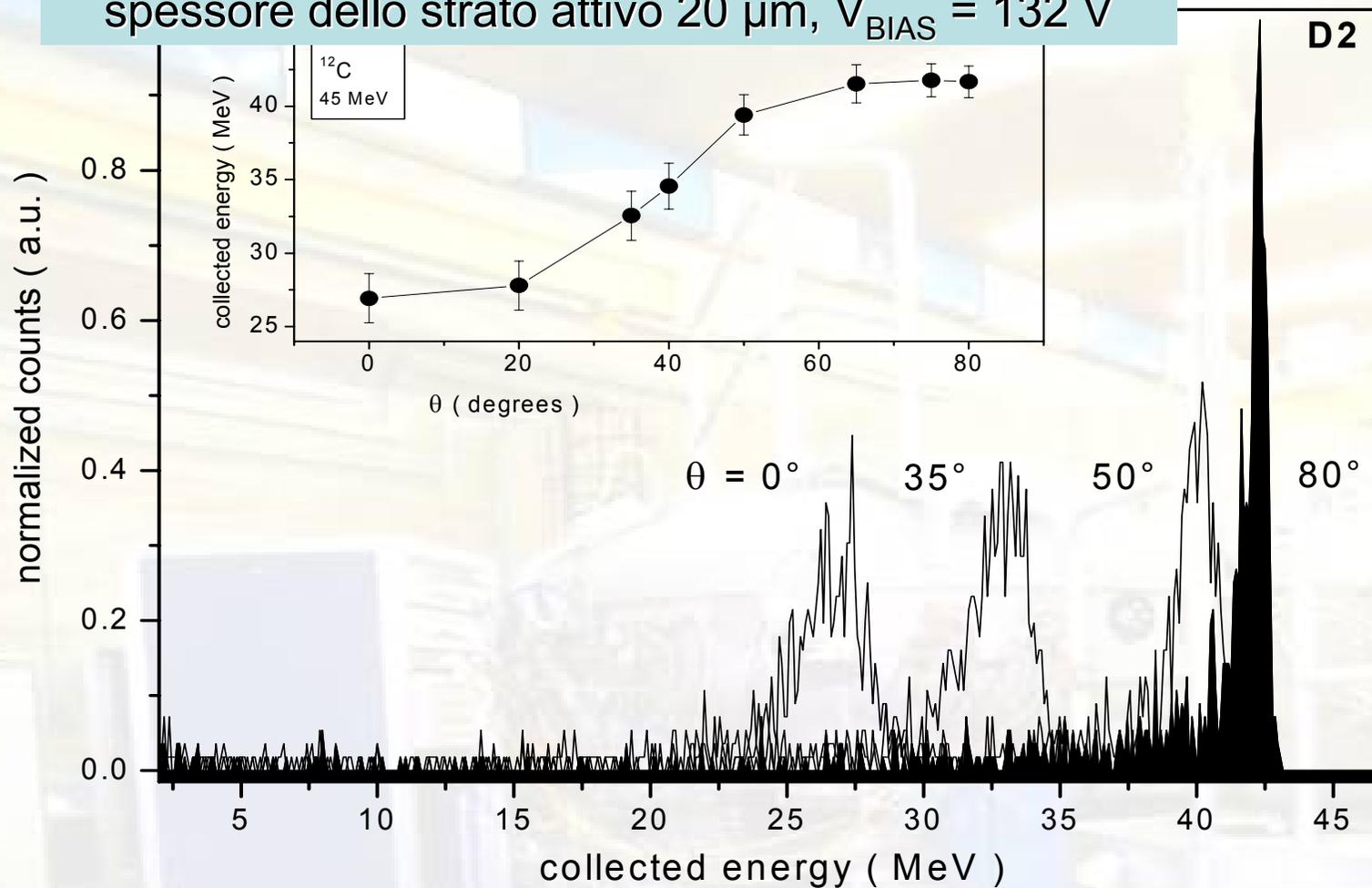
Spessore dello strato attivo: 55  $\mu\text{m}$

Angolo di incidenza: 45°

Profondità di penetrazione @ 11.5MeV & 45°: 352  $\mu\text{m}$

- ✓ *Eccellente linearità: correlazione  $\approx 0.9996$*
- ✓ *No effetti di polarizzazione, "pumping" o "priming" o altri effetti di memoria*
- ✓ *Buona correlazione con il comportamento temporale della risposta della Faraday Cup.*

spessore dello strato attivo 20  $\mu\text{m}$ ,  $V_{\text{BIAS}} = 132 \text{ V}$



28  $\mu\text{m}$  @  $0^\circ$   
7.25  $\mu\text{m}$  @  $75^\circ$

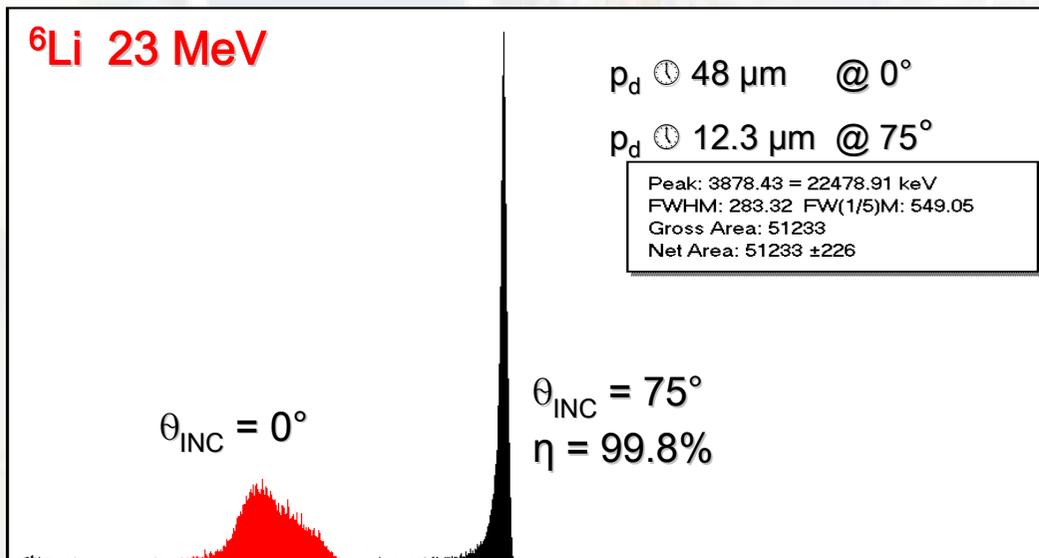
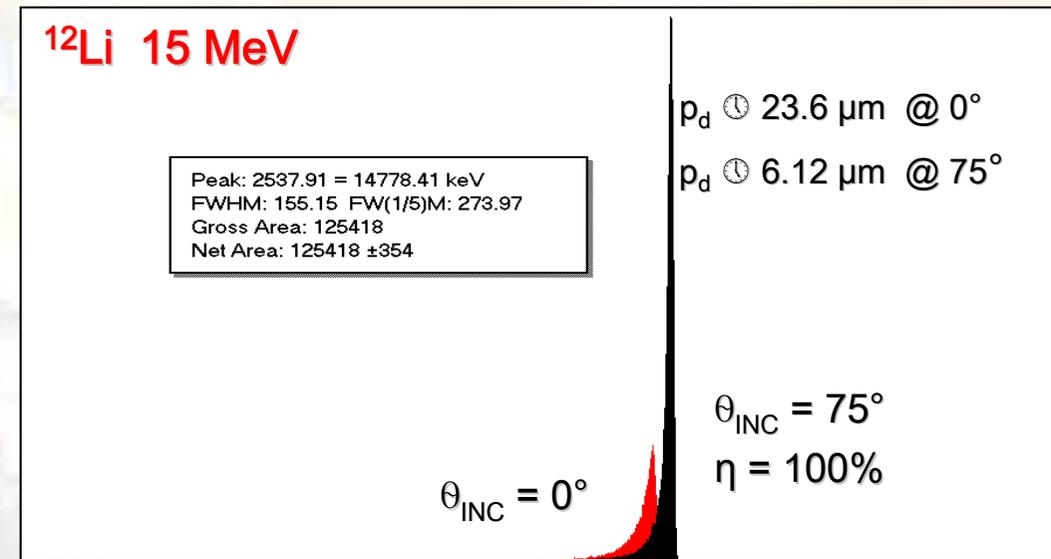
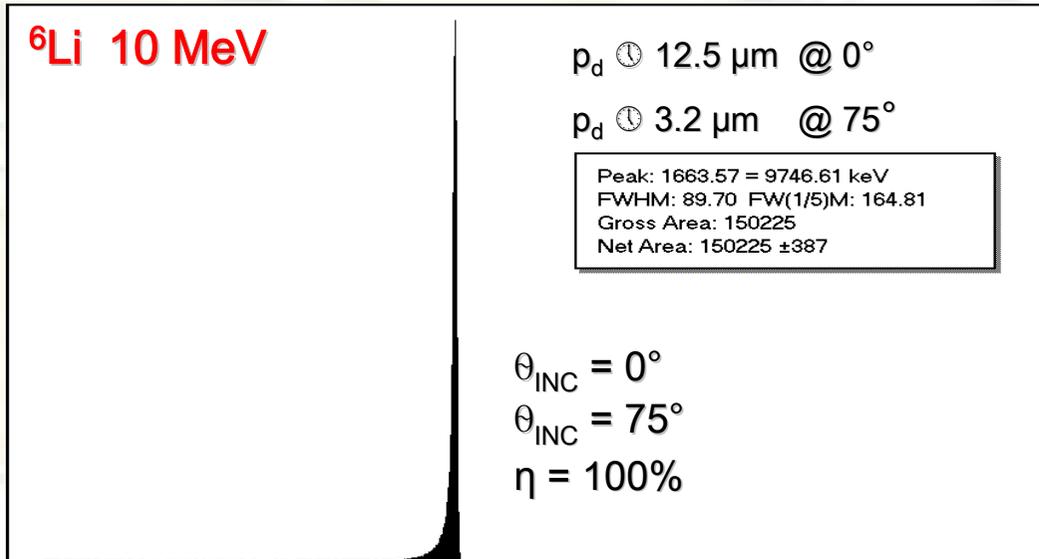
$\theta_{\text{INC}} = 75^\circ$   
 $\eta = 99.8\%$

- ❖ Energia rivelata  $E_c$  aumenta con  $\theta$ .
- ❖ A un angolo di incidenza più grande di un  $\theta^*$  le particelle rilasciano tutta la loro energia  $E_c$  rivelata satura a un valore che corrisponde al valore massimo della  $\eta$ .

All'aumentare di  $\theta$  diminuisce la profondità di penetrazione lungo la direzione del campo elettrico e ciò corrisponderebbe ad avere energie del fascio incidente sempre più piccole.

# 10, 15, 23 MeV ${}^6\text{Li}$

SCD #3 spessore 55  $\mu\text{m}$ ,  $V_{\text{BIAS}} = 75 \text{ V}$



- ✓ ~ 100% efficienza
- ✓ alta risoluzione in energia:  
 $1.2 \div .92\%$
- ✓ risposta riproducibile
- ✓ alle più alte energie incidenti c'è una dipendenza dall'angolo di incidenza

# Rivelatori a diamante per un Super tracciatore per SLHC

“Upgrade” dell'acceleratore LHC verso Super-LHC (SLHC) (2015) al CERN porterà ad aumentare di 10 volte la luminosità:  $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Sarà una sfida nella costruzione dei rivelatori di traccia (tracciatori) degli esperimenti che si progetteranno.

Ci sarà un livello di radiazione molto elevato, una grande densità di tracce così come un ridotto “ bunch crossing time” dell'ordine di 10 ns. La regione più critica in termini di ambiente ostile è quella che è attualmente coperta dai rivelatori a silicio a pixel che si trovano a un raggio tra 4 e 11 cm dalla linea di fascio. La fluenza integrata sull'intero tempo di run di SLHC è nell'intervallo da  $10^{16}$  a  $10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ .

La sfida più grande è per i rivelatori che costituiranno i tracciatori

- ❖ sensori con ottima resistenza alle radiazioni
- ❖ Buono S/N.

**RIVELATORI A DIAMANTE**

## The 2009 RD42 Collaboration

D. Asner<sup>22</sup>, M. Barbero<sup>1</sup>, V. Bellini<sup>2</sup>, V. Belyaev<sup>15</sup>,  
E. Berdermann<sup>8</sup>, P. Bergonzo<sup>14</sup>, J-M. Brom<sup>10</sup>,  
M. Bruzzi<sup>5</sup>, V. Cindro<sup>12</sup>, G. Claus<sup>10</sup>, M. Cristinziani<sup>1</sup>,  
S. Costa<sup>2</sup>, R. D'Alessandro<sup>6</sup>, W. de Boer<sup>13</sup>, D. Dobos<sup>3</sup>,  
I. Dolenc<sup>12</sup>, W. Dulinski<sup>10</sup>, V. Eremin<sup>9</sup>, R. Eusebi<sup>7</sup>,  
F. Fizzotti<sup>18</sup>, H. Fraai-Kölbl<sup>4</sup>, A. Furgeri<sup>13</sup>, K.K. Gan<sup>16</sup>,  
M. Goffe<sup>10</sup>, J. Goldstein<sup>21</sup>, A. Golubev<sup>11</sup>, A. Gorišek<sup>12</sup>,  
E. Griesmayer<sup>4</sup>, E. Grigoriev<sup>11</sup>, D. Hits<sup>17</sup>, F. Hügging<sup>1</sup>,  
H. Kagan<sup>16,⊙</sup>, R. Kass<sup>16</sup>, G. Kramberger<sup>12</sup>,  
S. Kuleshov<sup>11</sup>, S. Lagomarsino<sup>6</sup>, A. La Rosa<sup>3</sup>, A. Lo  
Giudice<sup>18</sup>, I. Mandić<sup>12</sup>, C. Manfredotti<sup>18</sup>,  
C. Manfredotti<sup>18</sup>, A. Martemyanov<sup>11</sup>, M. Mathes<sup>1</sup>,  
D. Menichelli<sup>5</sup>, S. Miglio<sup>5</sup>, M. Mikuž<sup>12</sup>, M. Mishina<sup>7</sup>,  
J. Moss<sup>16</sup>, S. Mueller<sup>13</sup>, G. Oakham<sup>22</sup>, P. Olivero<sup>18</sup>,  
G. Parrini<sup>6</sup>, H. Pernegger<sup>3</sup>, M. Pomorski<sup>14</sup>,  
R. Potenza<sup>2</sup>, S. Roe<sup>3</sup>, M. Scaringella<sup>5</sup>, D. Schaffner<sup>20</sup>,  
C. Schmidt<sup>8</sup>, S. Schnetzer<sup>17</sup>, T. Schreiner<sup>4</sup>,  
S. Scortino<sup>6</sup>, S. Smith<sup>16</sup>, R. Stone<sup>17</sup>, C. Suters<sup>2</sup>,  
M. Traeger<sup>8</sup>, D. Tromson<sup>14</sup>, W. Trischuk<sup>19</sup>, J-W. Tsung<sup>1</sup>,  
C. Tuve<sup>2</sup>, J. Velthuis<sup>21</sup>, E. Vittone<sup>18</sup>, R. Wallny<sup>20</sup>,  
P. Weilhammer<sup>3,⊙</sup>, N. Wermes<sup>1</sup>

◇ Spokespersons

75 Participants

- <sup>1</sup> Universität Bonn, Bonn, Germany
- <sup>2</sup> INFN/University of Catania, Catania, Italy
- <sup>3</sup> CERN, Geneva, Switzerland
- <sup>4</sup> Fachhochschule für Wirtschaft und Technik, Wiener Neustadt, Austria
- <sup>5</sup> INFN/University of Florence, Florence, Italy
- <sup>6</sup> Department of Energetics/INFN, Florence, Italy
- <sup>7</sup> FNAL, Batavia, U.S.A.
- <sup>8</sup> GSI, Darmstadt, Germany
- <sup>9</sup> Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia
- <sup>10</sup> IPHC, Strasbourg, France
- <sup>11</sup> ITER, Moscow, Russia
- <sup>12</sup> Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
- <sup>13</sup> Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- <sup>14</sup> CEA-LIST Technologies Avancees, Saclay, France
- <sup>15</sup> MEPhI Institute, Moscow, Russia
- <sup>16</sup> The Ohio State University, Columbus, OH, U.S.A.
- <sup>17</sup> Rutgers University, Piscataway, NJ, U.S.A.
- <sup>18</sup> University of Torino, Torino, Italy
- <sup>19</sup> University of Toronto, Toronto, ON, Canada

22 Institutes

## 2008 LHCC Milestones

### *Priorities of Research in 2008 (LHCC 2008-005)*

- Test the radiation hardness of the highest quality pCVD and scCVD diamond.
- Develop diamond pixel modules useful at the LHC. Industrialization of the process.
- Beam tests with diamond pixel trackers and pixel detectors.
- Continue the development of pCVD and scCVD diamond material. Develop additional suppliers.
- Continue the development of systems for beam monitoring for the LHC.

These points were addressed in the talk.

## Proposed RD42 Research in 2009

- **Radiation Hardness of Diamond Trackers and Pixel Detectors**
  - Continue tracker and pixel irradiations in the next year,
  - Use pCVD and scCVD
- **Pixel Detector Modules**
  - Test Industrial Modules (IZM)
  - Construct two additional modules - funded by ATLAS R&D?.
- **Beam Tests with Diamond Trackers and Pixel Detectors**
  - Complete test of ATLAS diamond pixel modules
  - Irradiation of one ATLAS diamond pixel module
- **Diamond Characterization**
  - Continue research program to improve material in progress:
    - o collection distance  $\rightarrow 325\mu\text{m}$  ( $\bar{Q} = 11,700e$ )
    - o  $\rightarrow$  improved uniformity
    - o  $\rightarrow$  identification of trapping centers
    - o compare scCVD with pCVD

These points should be addressed in this meeting.

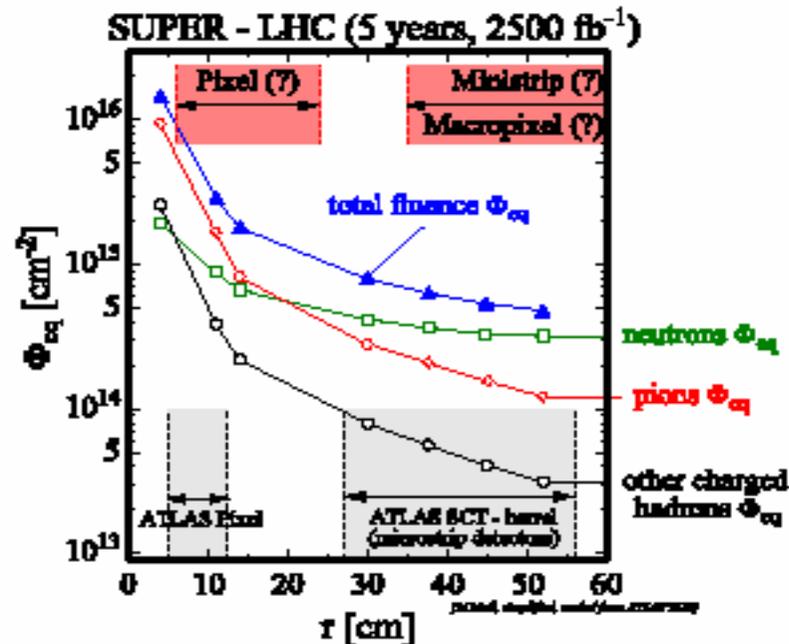
10

4



### Tracking Devices Close to Interaction Region of Experiments

- Inner tracking layers must provide high precision tracking (to tag b, t, Higgs, ...)
- Inner tracking layers must survive! → what does one do? annual replacement?

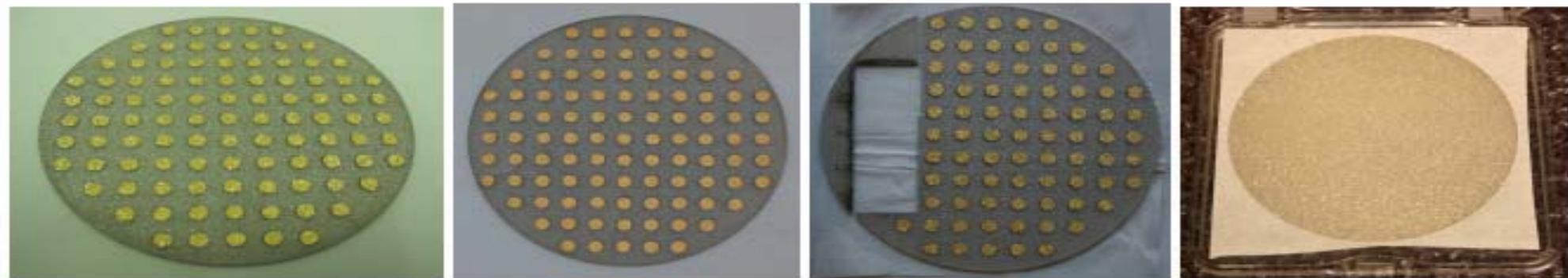


### Look for a Material with Certain Properties:

- ◆ Radiation hardness (no frequent replacements)
- ◆ Low leakage current, low dielectric constant → low readout noise
- ◆ Room temperature operation, Fast signal collection time → no cooling

## Highlights of RD42 Presentation

### *Material Status*



Recent pCVD wafers ready for test - Cr/Au dots are 1 cm apart

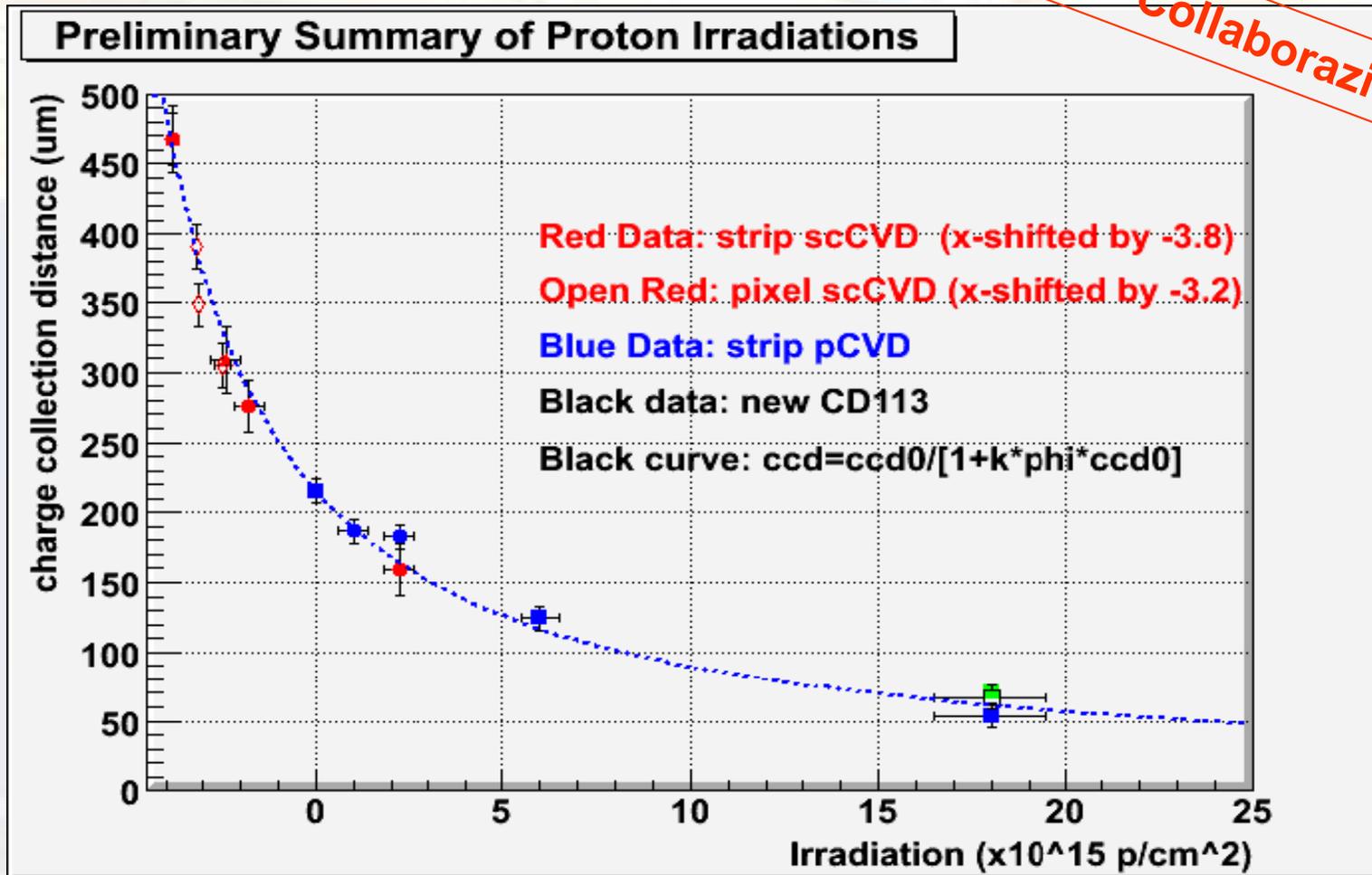
- New wafers continually being produced.
- Contract for material with  $ccd > 275\mu m$ .

# Rivelatori Pixel



# Danneggiamento da radiazione

pCVD and sCVD seguono la stessa curva di danneggiamento:  
 $1/ccd=1/ccd0 + k$ .



# DOSIMETRI

## **PROPRIETA' "DOSIMETRICHE" diamante**

- ✓ **Tessuto equivalente**
- ✓ **Alta risoluzione spaziale**
- ✓ **Esistenza alle radiazioni**

- Dosimetri fatti di diamante naturale sono già sul mercato (PTW - Freiburg)  
IAEA certified

- ✓ **Diamanti naturali (DDN):**
  - Le pietre sono diverse l'una dall'altra
  - (1 DDN buono per 4000 !)
  - Alto costo (~15 k€)
  - Tempi di consegna di circa 1 anno

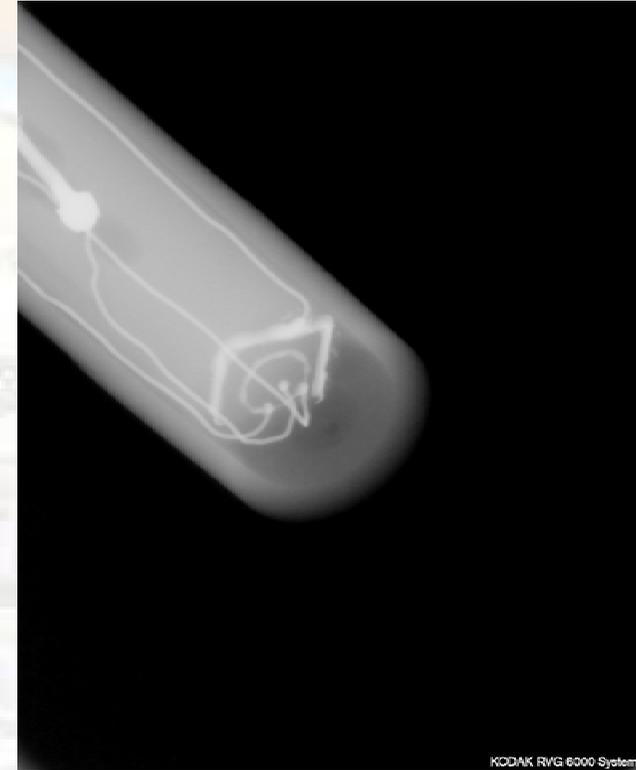
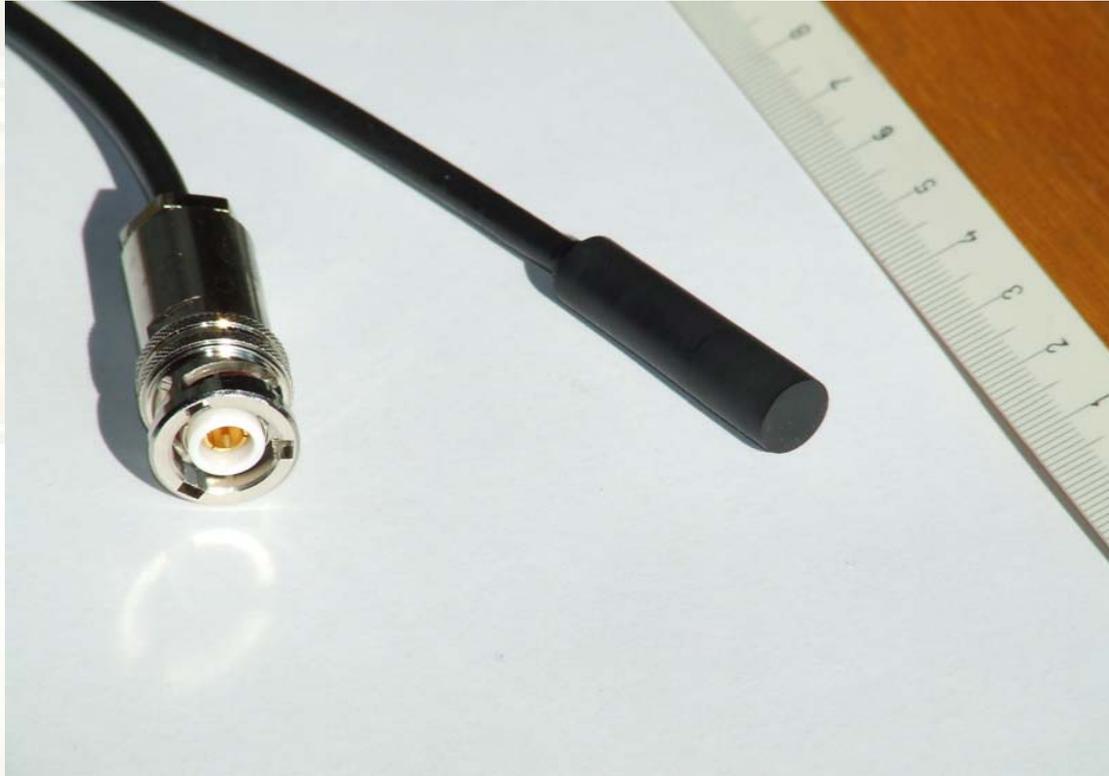
## **Richieste stringenti:**

- **Stabilità**
- **Veloce risposta in tempo**
- **Linearità con la dose**
- **Confrontabile con le camere a ionizzazione**
- **Indipendenza dall'energia**
- **Indipendenza dal dose rate**
- **Riproducibilità**



**Applicazioni in radioterapia e  
prototerapia**

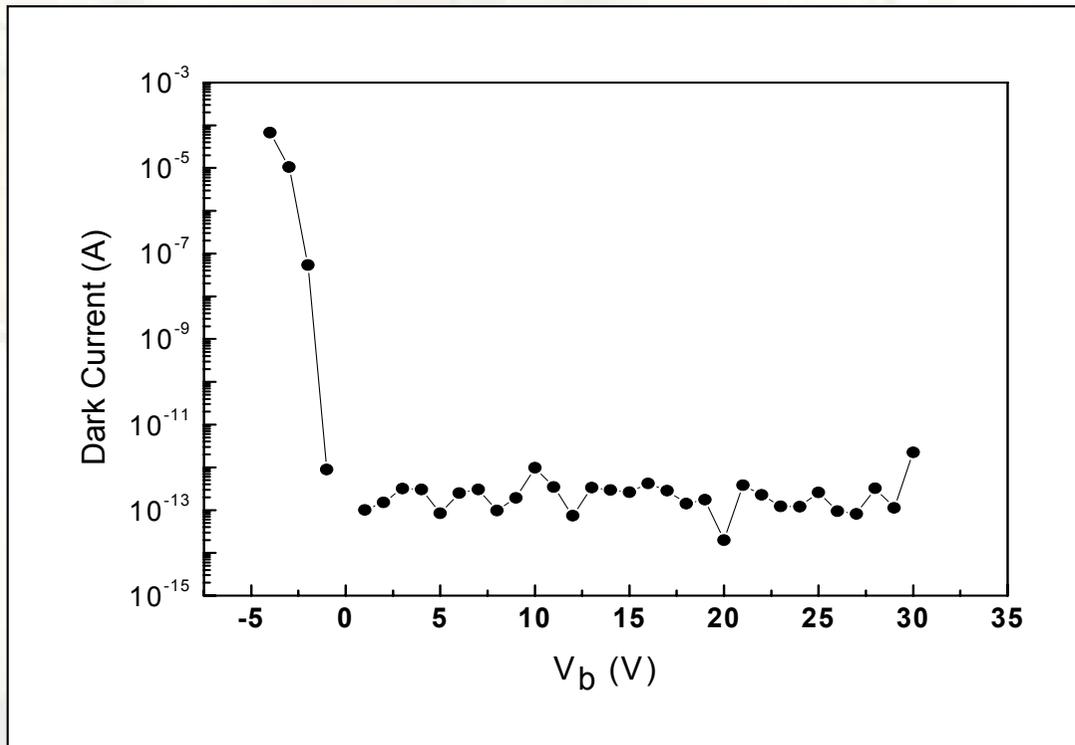
# sCVD Dosimetri "Roma Tor Vergata"



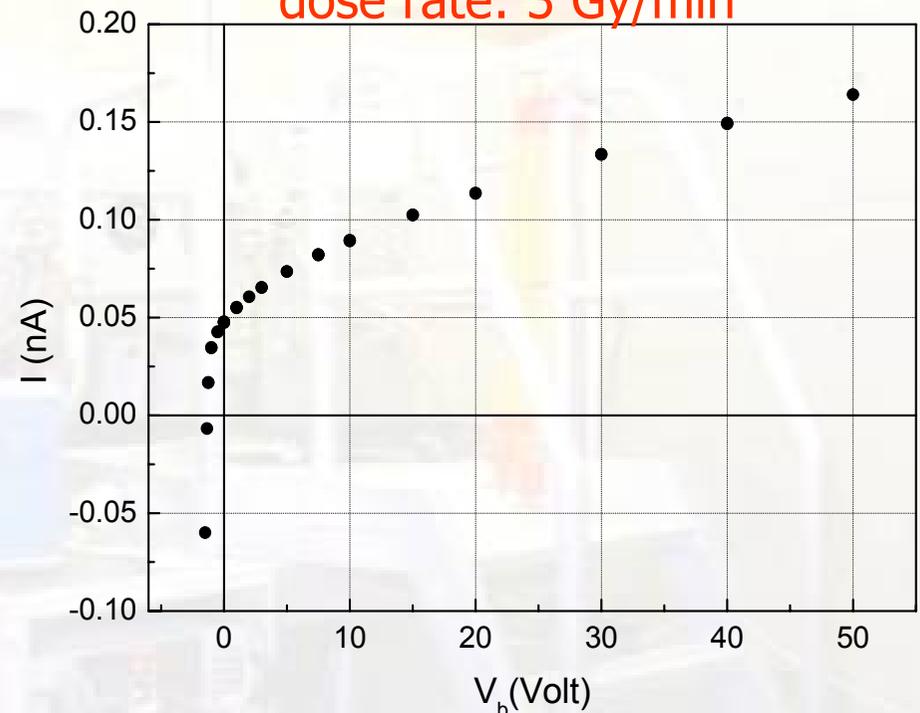
- *Synthetic Single Crystal CVD Diamond (SSCD)*
- *Tessuto equivalente e impermeabile all'acqua*
- *Non è applicata nessuna tensione di alimentazione ( $V_b=0$  V)*

# curve I-V

I-V curve in dark irradiation



I-V curve under 10 MV  
bremsstrahlung X-ray irradiation  
dose rate: 3 Gy/min



Si osserva un segnale anche a  $V_b=0$  V

**Non c'è d.d.p. applicata**

Ciò è di grande importanza quando si fa dosimetria in vivo

Scuola Nazionale INFN

Legnaro (PD) 21 Aprile 2009

# The San Filippo Neri Hospital facility, Rome (Italy)

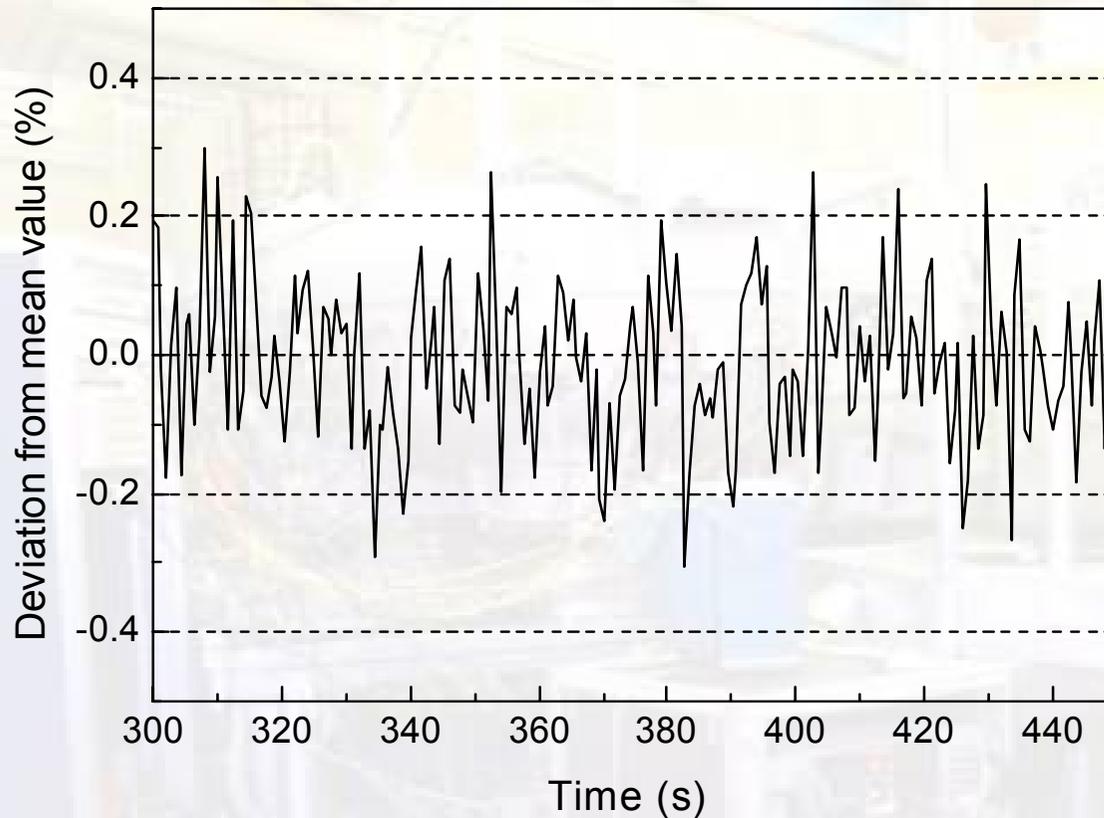
## *Experimental setup:*

- ✓ *Acceleratore: Varian DHX*
- ✓ *Fantoccio ad acqua (PTW)*
- ✓ *Tandem electrometer (PTW)*



Fasci- X di Bremsstrahlung con  
 $E_{\max} = 6 \text{ and } 10 \text{ MeV}$   
Fasci di elettroni: ;  $E = 6 \div 18 \text{ MeV}$

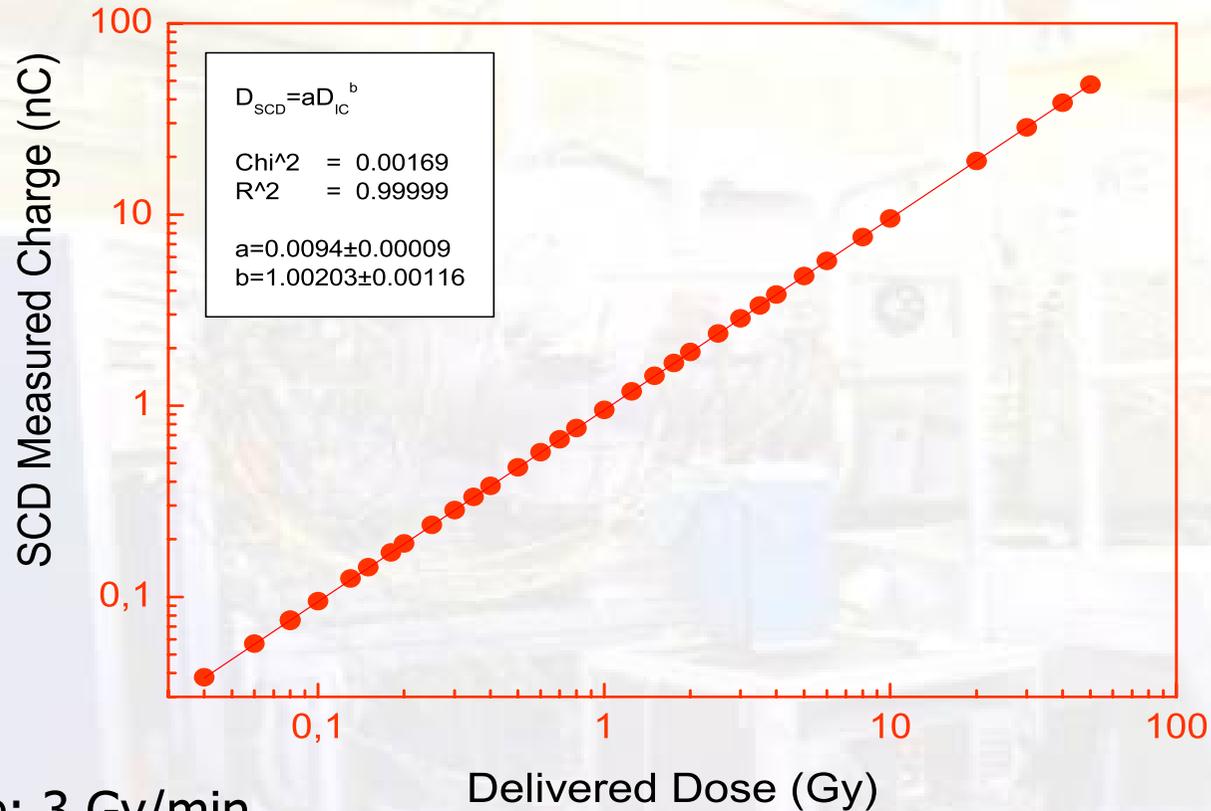
# Stabilità



***Dopo una pre-irradiazione, il segnale è stabile all'1%***

# Linearità: con la dose

## 10 MV Photons



Dose rate: 3 Gy/min

Dose: 0.04 ÷ 50 Gy

**Comportamento lineare**

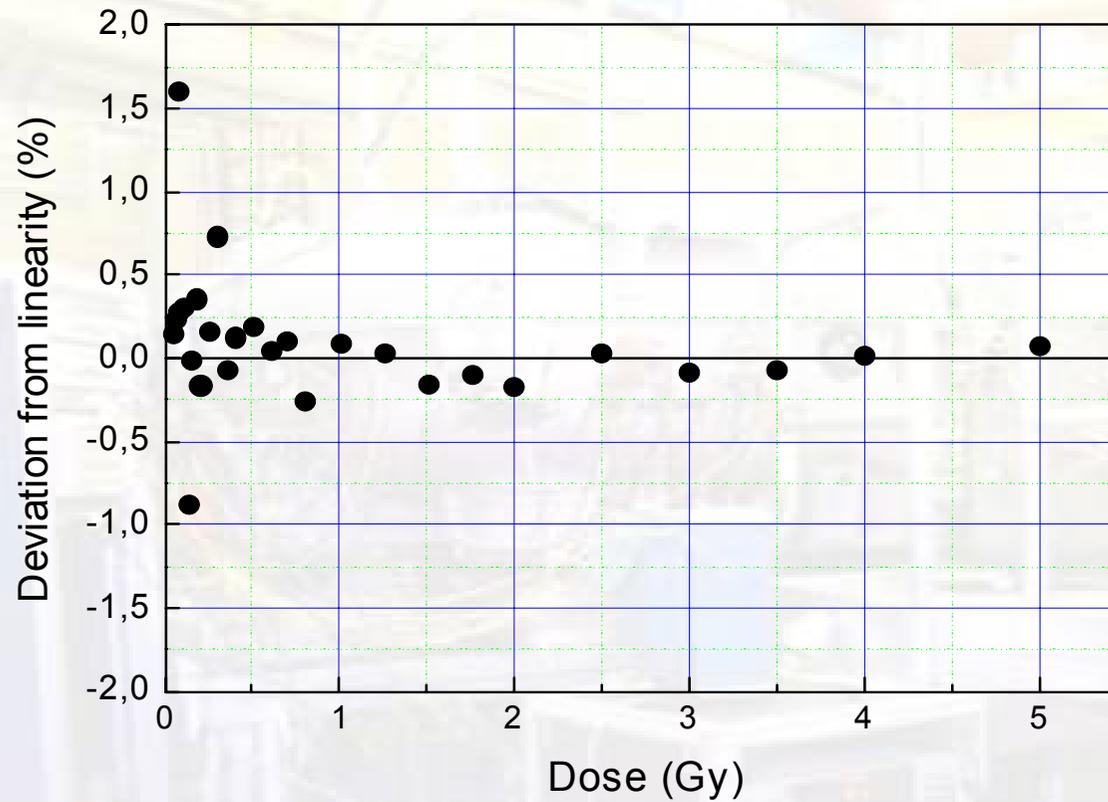
**Indice di linearità  $\Delta \sim 1$  ( $y = a \cdot x^\Delta$ )**

**Deviazioni dalla linearità minori di 0.5%**

Scuola Nazionale INFN

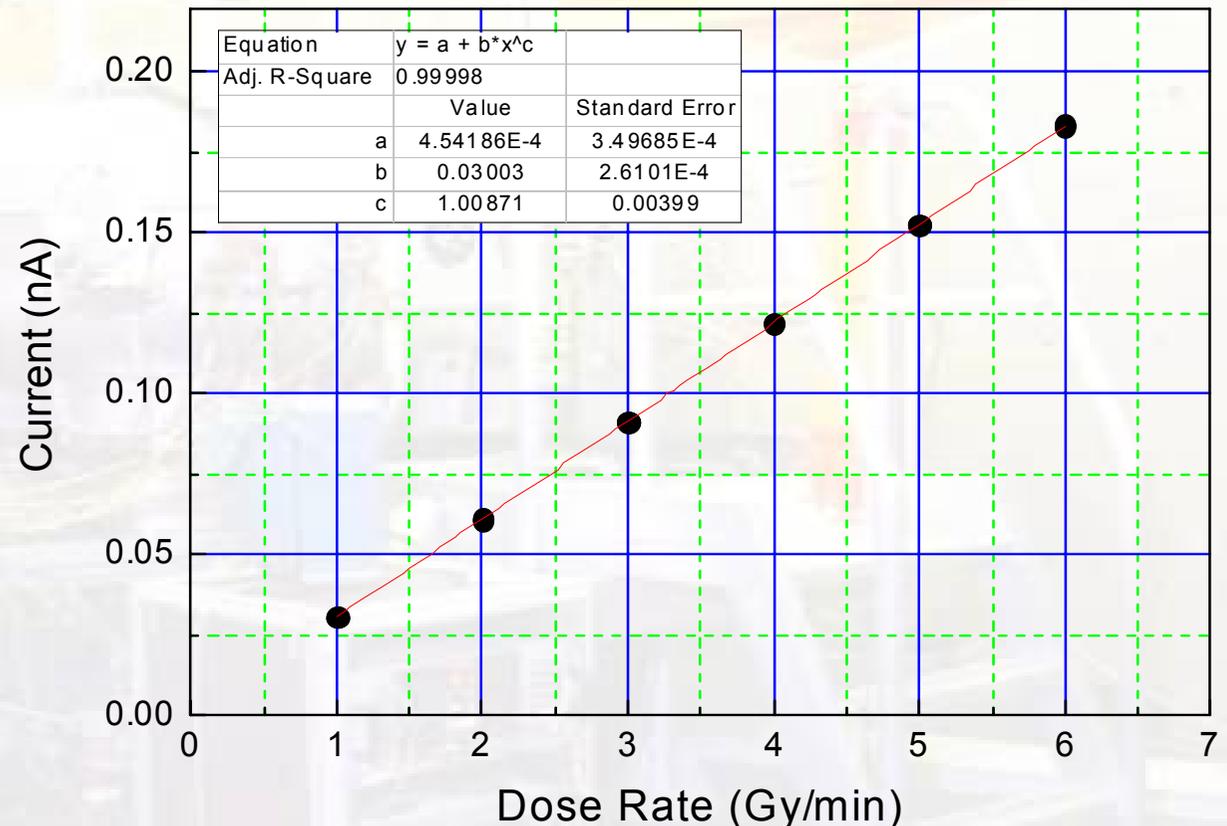
Legnaro (PD) 21 Aprile 2009

# Linearità: dipendenza dalla dose



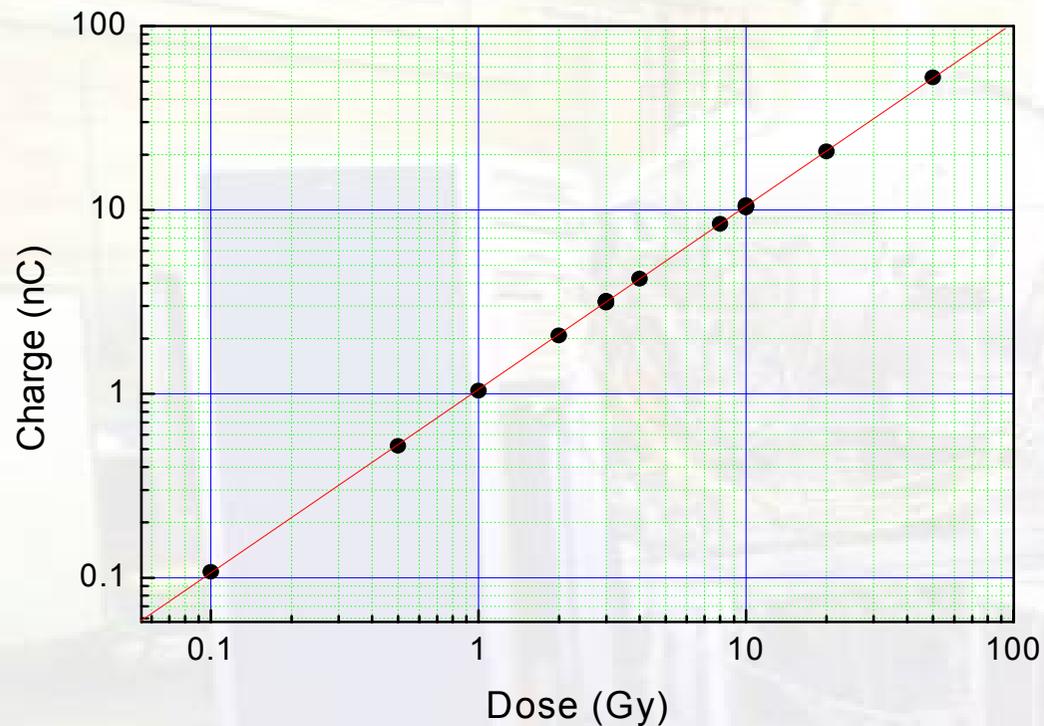
# Dipendenza dal Dose rate: fotoni

- **The Dose Rate was evaluated by changing the accelerator pulse repetition frequency (PRF) or varying the source to surface distance (SSD).**
- **A very wide range was investigated: from 40 Gy/min down to 0.029 Gy/min**
- **In all cases a linear behavior was observed, with  $0.98 < c < 1.04$**
- **This is NOT observed in NDD. They need a software correction factor to take into account this problem**

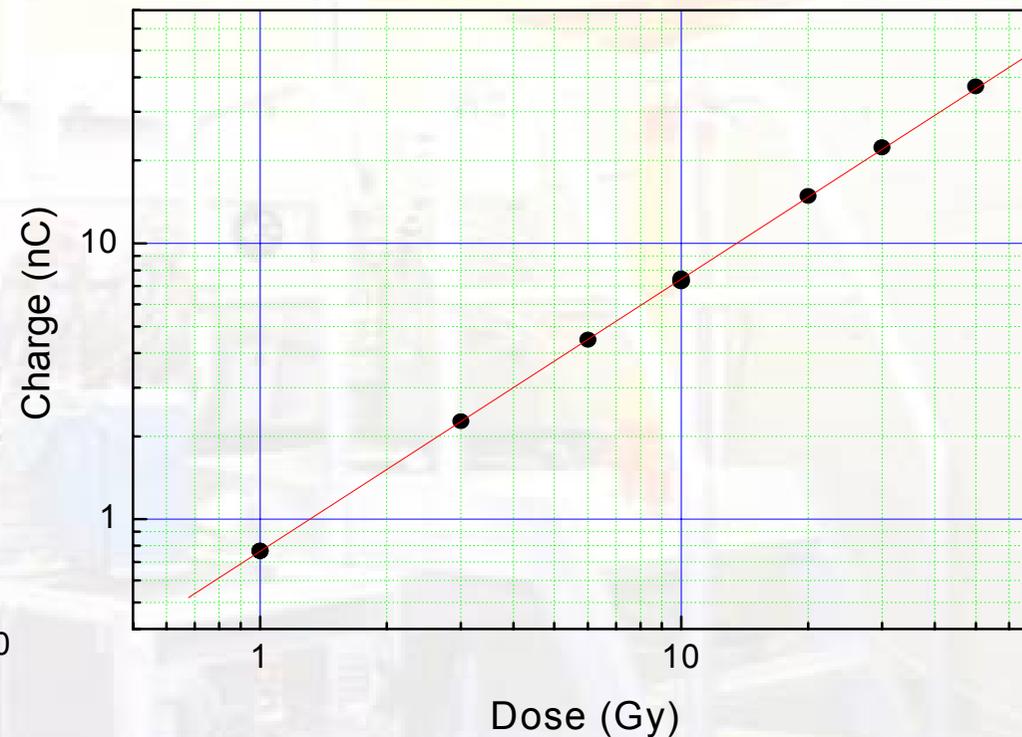


# Linearità: protoni 60 MeV (LNS)

sSCD 448

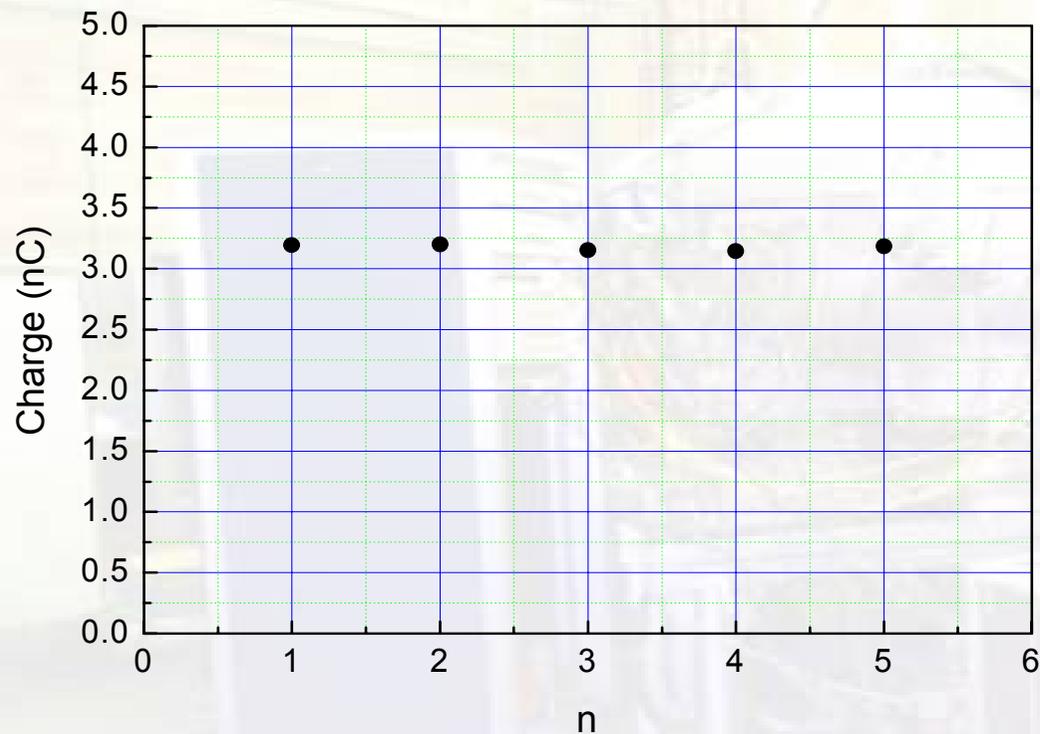


sSCD 462

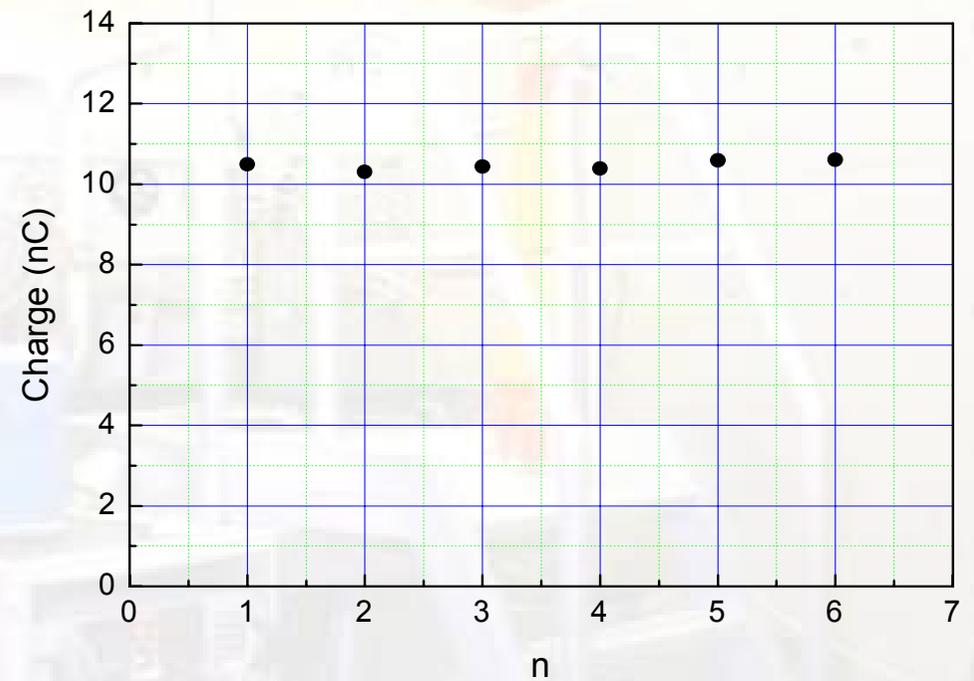


# Stabilità: protoni 60 MeV

**Dose: 3 Gy**



**Dose: 10 Gy**



# Conclusioni

- ❑ Il diamante è un materiale che presenta notevoli proprietà da un punto di vista meccanico, ottico ed elettronico. Presenta anche delle ottime qualità per essere usato come dosimetro.
- ❑ E' resistente al danno da radiazione.
- ❑ Molti sforzi si sono fatti negli anni per migliorare la qualità dei film di diamanti.
- ❑ Rivelatori pCVD presentano difetti che limitano sia l'efficienza di raccolta cariche che la risoluzione in energia. Essi possono essere utilizzati come monitor di fascio o come rivelatori in un tracciatore (dove viene richiesto un buon Signal/Noise e una resistenza al danno da radiazioni ma non una elevata risoluzione energetica)
- ❑ Rivelatori sCVD presentano una buona riproducibilità, un'efficienza di raccolta carica del 100% e una risoluzione in energia che li rendono confrontabili con il silicio. Ottimi per spettroscopia e ottimi come dosimetri.