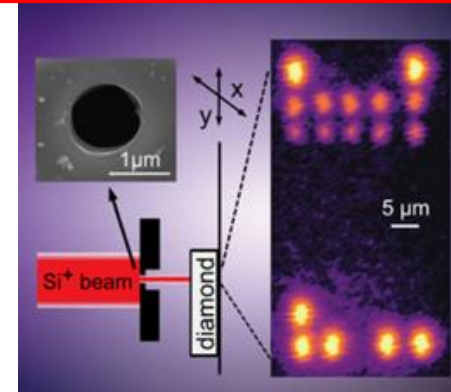
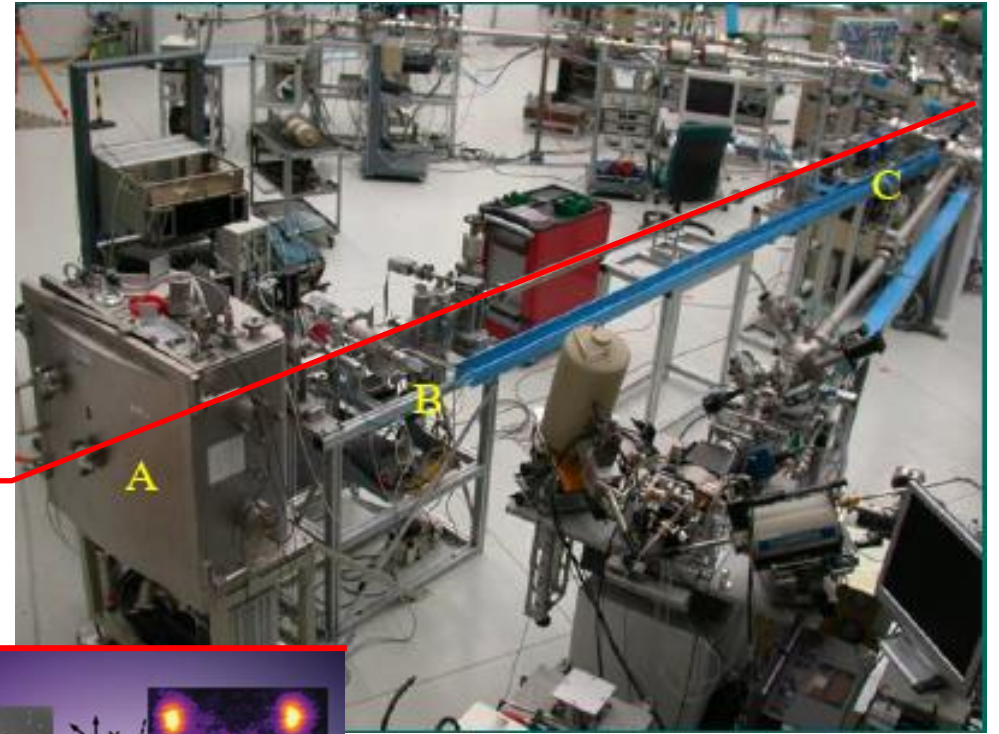


Fasci ionici e tecnologie quantistiche



Nicla Gelli, Lorenzo Giuntini, *Stefano Lagomarsino*,
Mirko Massi, Silvio Sciortino

Le tecnologie
quantistiche si
prefiggono di
generare, conservare,
elaborare, trasportare
informazione
quantistica,
sostanzialmente
stringhe di *qubit*,
codificati da sistemi
quantistici a due livelli.

$$|\varphi\rangle = \sum_{q_1, q_2, q_3, \dots = 0}^1 a_{q_1, q_2, q_3, \dots} |q_1\rangle |q_2\rangle |q_3\rangle \dots$$

$$|\varphi\rangle \in E^2 \otimes E^2 \otimes E^2 \otimes \dots$$

Le tecnologie
quantistiche si
prefiggono di
**generare, conservare,
elaborare, trasportare
informazione
quantistica,**

sostanzialmente
stringhe di *qubit*,
codificati da sistemi
quantistici a due livelli.

*Vari tipi di sistema
sono usati o allo studio
come supporto per i
qubit:*

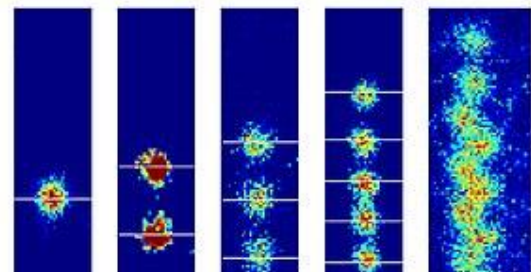
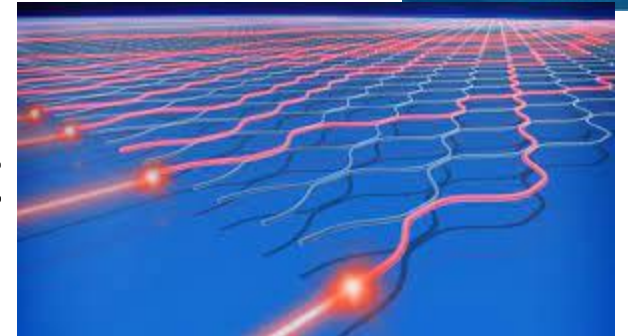
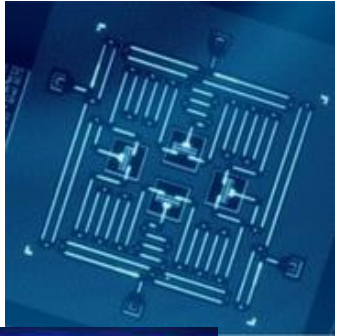
$$|\varphi\rangle = \sum_{q_1, q_2, q_3, \dots = 0}^1 a_{q_1, q_2, q_3, \dots} |q_1\rangle |q_2\rangle |q_3\rangle \dots$$

$$|\varphi\rangle \in E^2 \otimes E^2 \otimes E^2 \otimes \dots$$

→ Superconducting qubits (Sycamore (google); Eagle (IBM))

→ Bosonic qubits (Jiuzhang (USTC China))

→ Trapped ions qubits (ionQ (Md-USA))

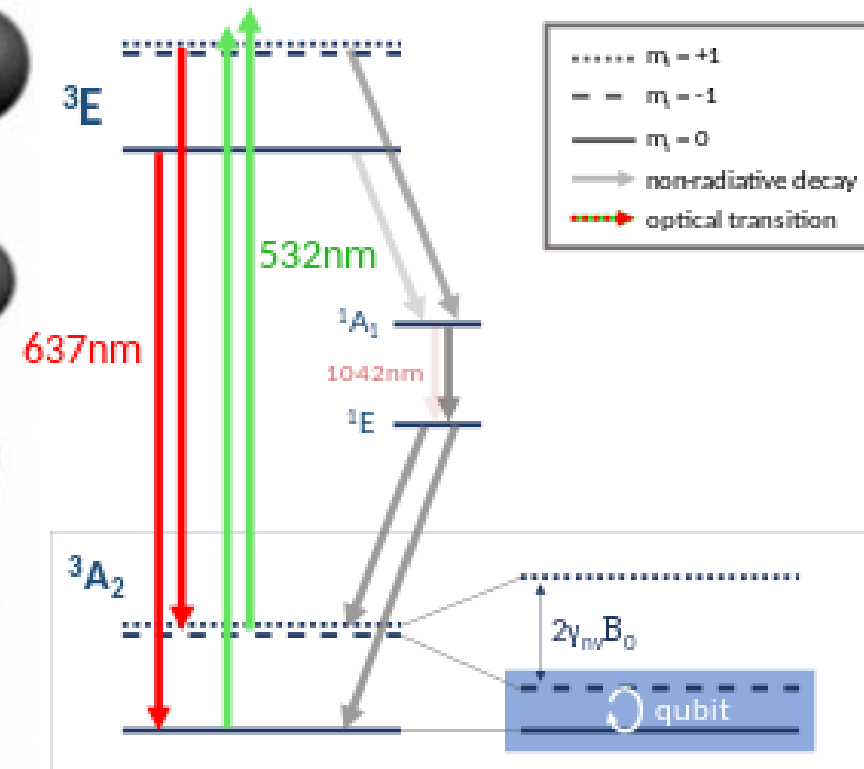
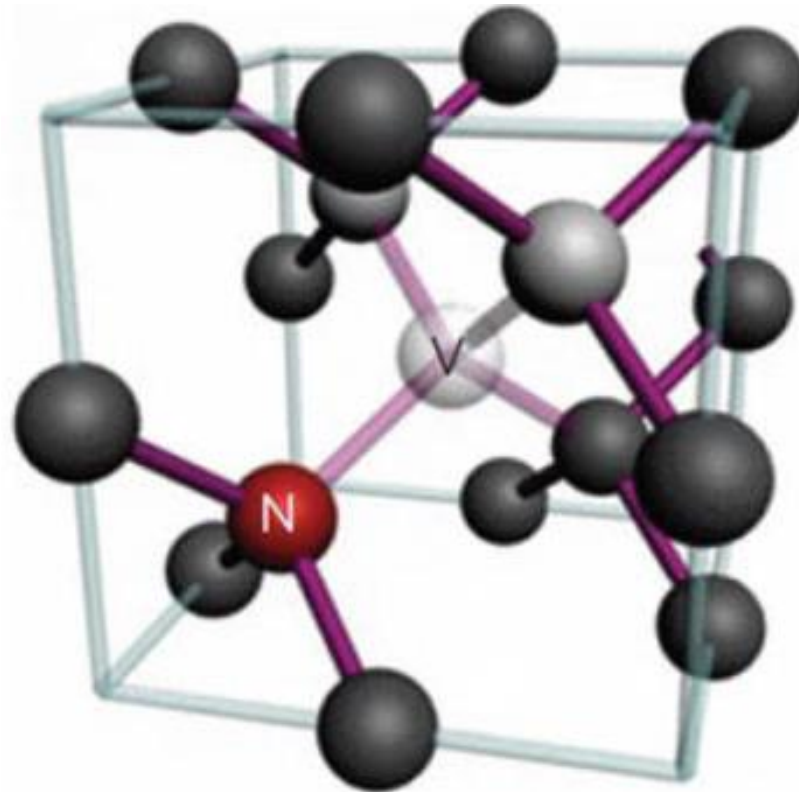


Molti difetti puntiformi nei semiconduttori, in quanto sistemi quantistici a livelli energetici discreti, si propongono come supporto per i qubit, per la loro

- Robustezza
- Stabilità
- Operatività a T-ambiente
- Miniaturizzazione, scalabilità

$$|\varphi\rangle = \sum_{q_1, q_2, q_3, \dots=0}^1 a_{q_1, q_2, q_3, \dots} |q_1\rangle |q_2\rangle |q_3\rangle \dots$$

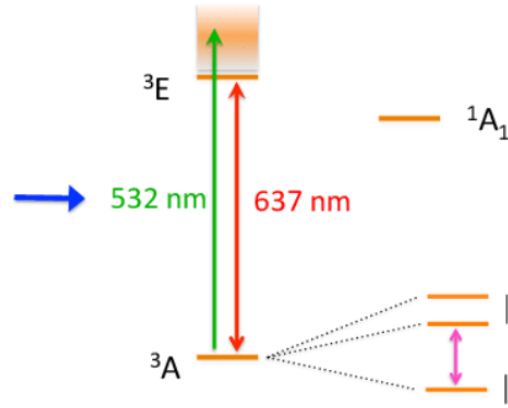
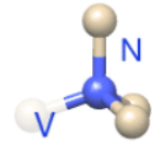
$$|\varphi\rangle \in E^2 \otimes E^2 \otimes E^2 \otimes \dots$$



Possibili applicazioni per questi sistemi:

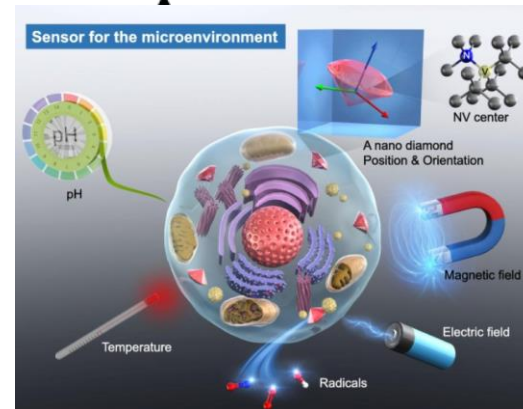
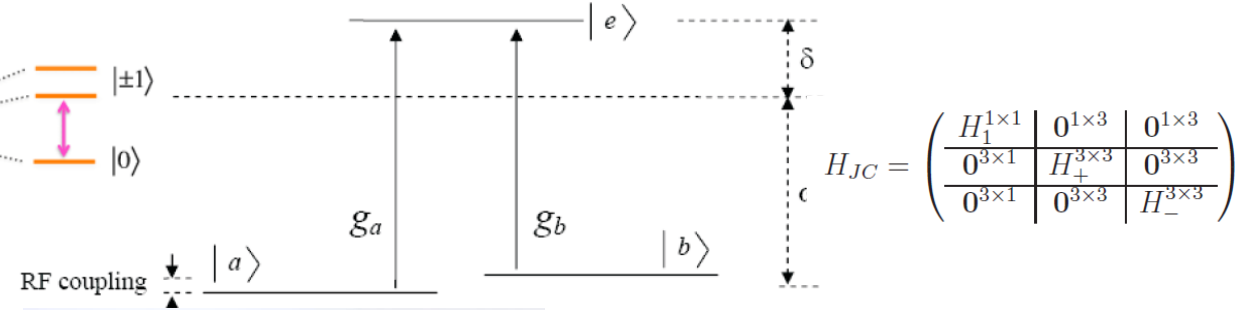
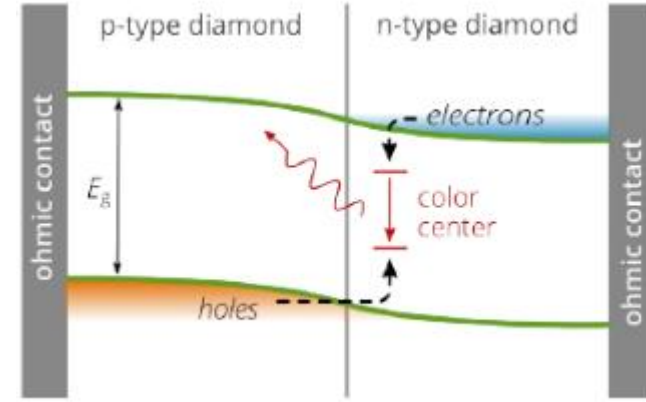
Emettitore di singolo fotone
(eccitazione ottica o elettrica) per
comunicazione quantistica (es.
crittografia)

Memorie quantistiche



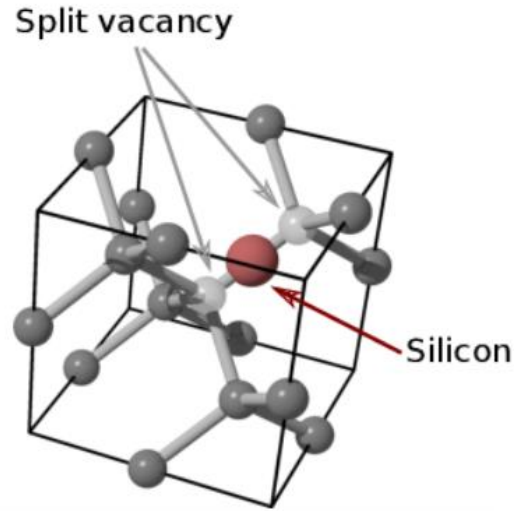
Porte quantistiche

Nanosensori (campo E-M, temperatura,
ph, pressione, ...)

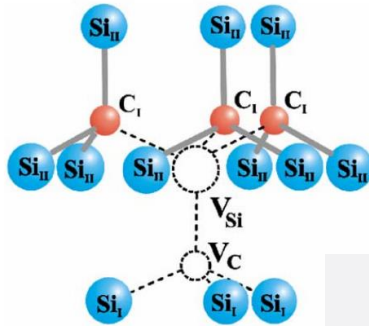


Attività attuali e in progetto nella fabbricazione di centri di colore al **LABEC**

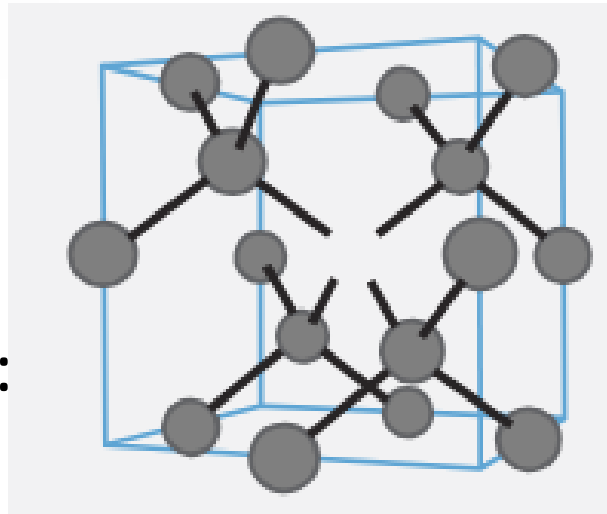
Centri SiV nel
Diamante:



Divacanze
nel carburo
di Silicio:



GR1 in
diamante:

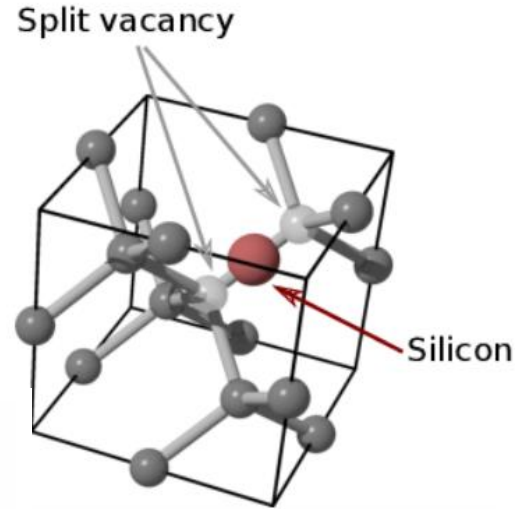


In ciascuno di questi casi, il nostro metodo di fabbricazione consiste in:

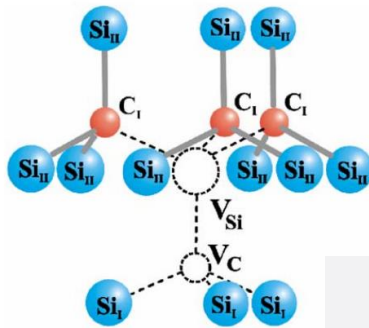
- **Introdurre** una impurezza nel reticolo per impiantazione **e/o**
- **Introdurre** un certo numero di vacanze reticolari mediante danno indotto da fasci ionici
- favorire, mediante **annealing termico/ottico**, l'occupazione di siti sostituzionali o l'aggregazione di 2 tipi di difetto e quindi l'attivazione dei centri

Attività attuali e in progetto del **LABEC** nella fabbricazione di centri di colore:

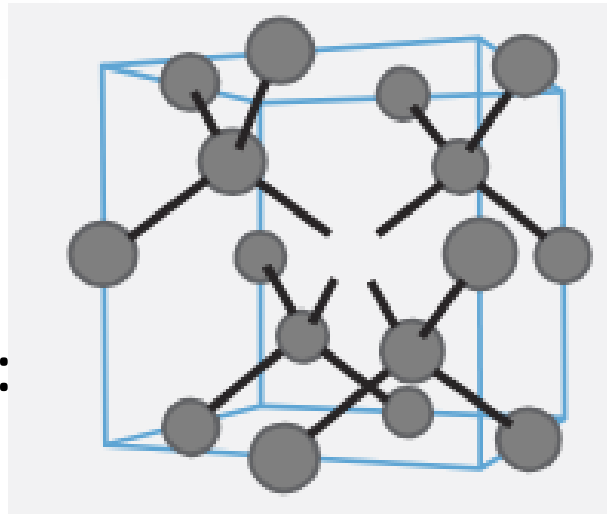
Centri SiV nel
Diamante:



Divacanze
nel carburo
di Silicio:



GR1 in
diamante:



Metodi di fabbricazione alternativi, come l'introduzione di difetti durante la crescita del cristallo, non permettono di controllare altrettanto finemente la posizione del difetto introdotto nel cristallo

La linea DEFEL al LABEC offre, in una sola facility, tutte le caratteristiche indispensabili in una attività di ricerca di questo tipo. Ovvero **flessibilità** nella:

1) specie da impiantare

Scegliere il tipo di difetto

Modulare la distribuzione del danno in profondità

2) energia di impiantazione

Scegliere la profondità (es. in una giunzione)

Impiantare ioni diversi a una stessa profondità

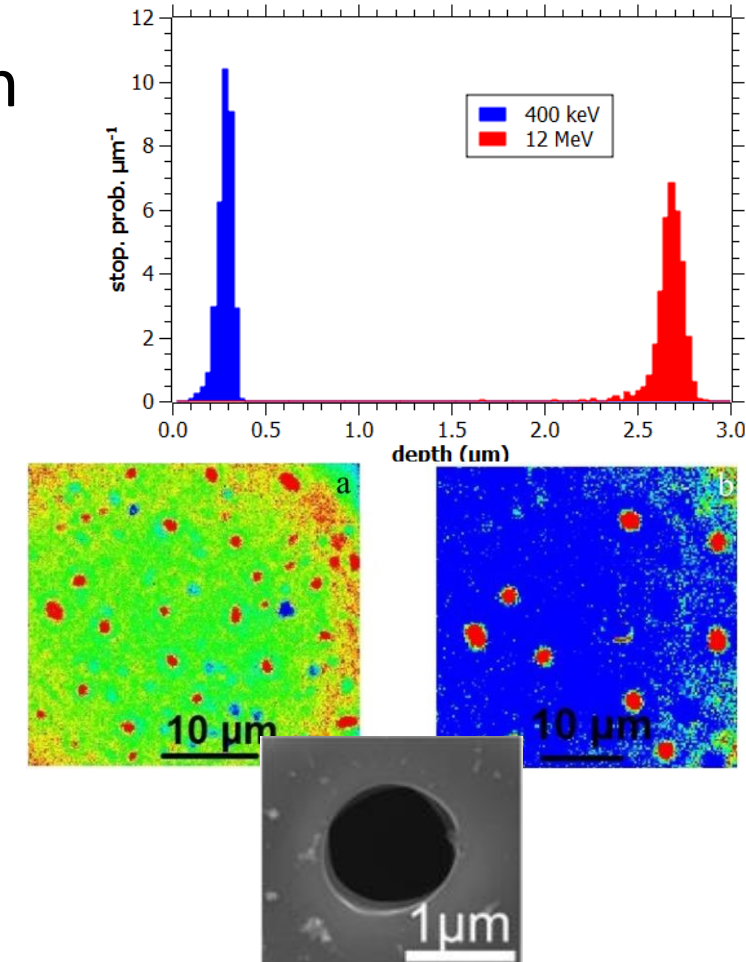
3) fluenza

Min 10^7 - 10^8 cm^{-2} (centri isolati)

Max 10^{14} - 10^{15} cm^{-2} (drogaggi elettrici)

3) area impiantata

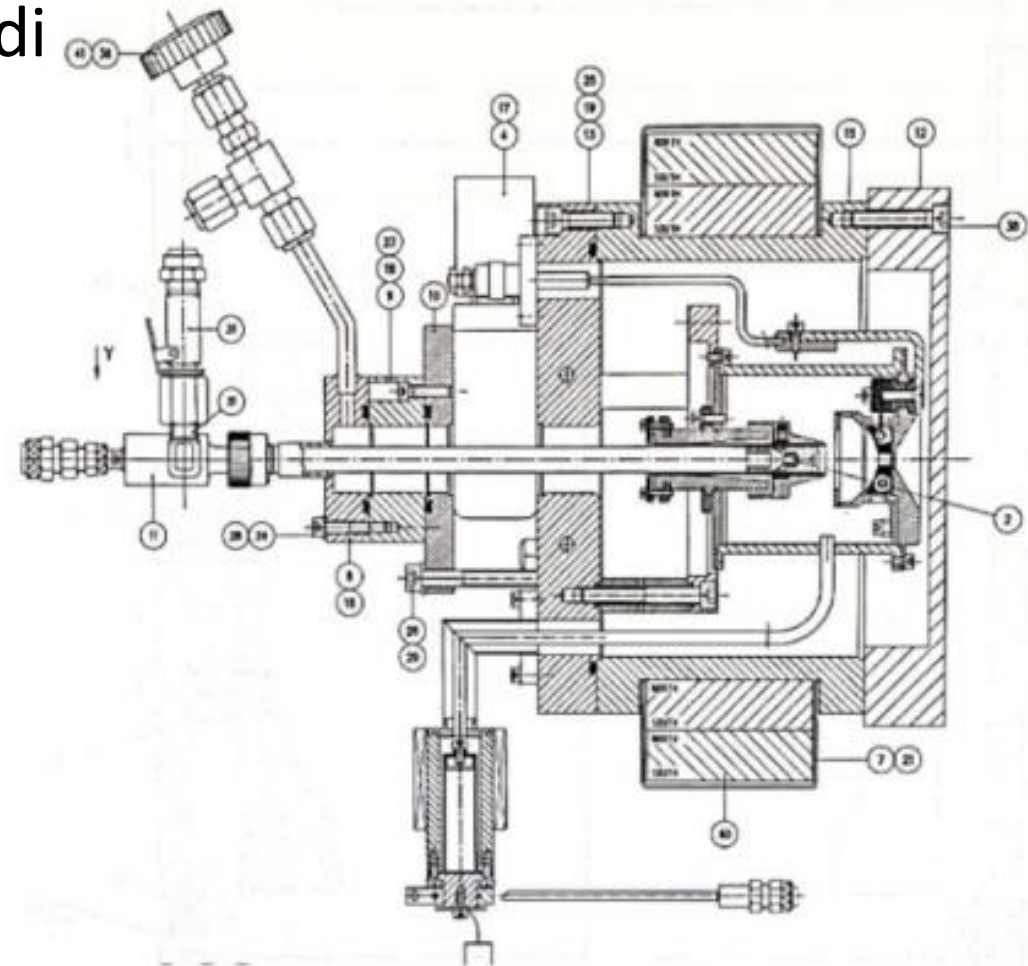
Min $\sim 1\mu\text{m}^2$ - Max $\sim 1\text{mm}^2$



La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per **la Specie ionica**

1) La sorgente a sputtering a stato solido 860 permette di impiantare una grande varietà di Ioni.



La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per la Specie ionica

- 1) La sorgente a sputtering a stato solido 860 permette di impiantare una grande varietà di Ioni.

Attività operative

- 1.1) Impiantazione Silicio in diamante (per fabbricare centri SiV in diamante)
- 1.2) Danneggiamento SiC con Silicio (generare V senza alterare la stechiometria)
- 1.3) Danneggiamento con protoni di diamante e SiC

In prospettiva

- 1.4) Danneggiamento del diamante con carbonio
- 1.5) impiantazione metalli di transizione in diamante o in carburo di silicio (esempi, vanadio in SiC, Cr in diamante)

La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

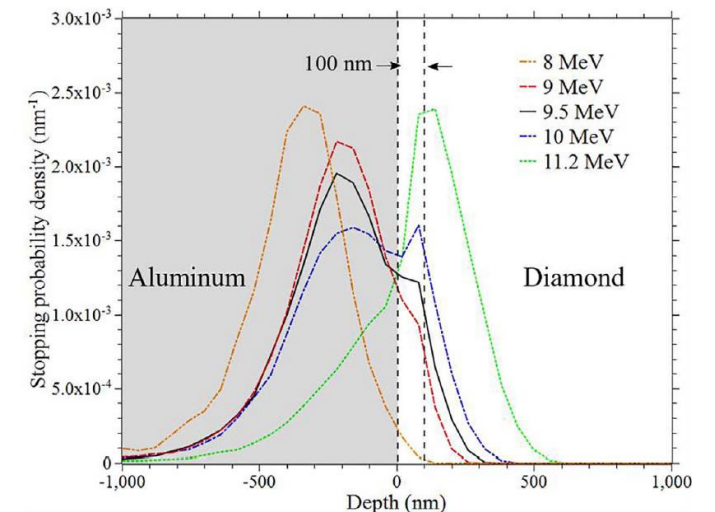
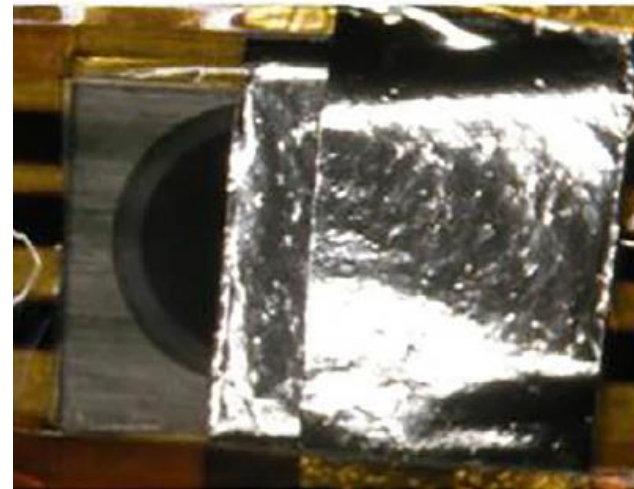
Per l'Energia

2) Le caratteristiche di progetto del Tandetron spaziano fra 0.7 e 3 MV

Attività operative

2.1) Abbiamo esteso l'intervallo inferiore a 0.1 - 0.2 MV, e a seconda dello stato di ionizzazione spaziamo nel range 0.2 - 12 MeV

2.2) rallentiamo i fasci con opportune schermature (tecnica usata comunemente anche da altri gruppi) per impiantare superficialmente.



La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per l'Energia

2) Le caratteristiche di progetto del Tandetron spaziano fra 0.7 e 3 MV

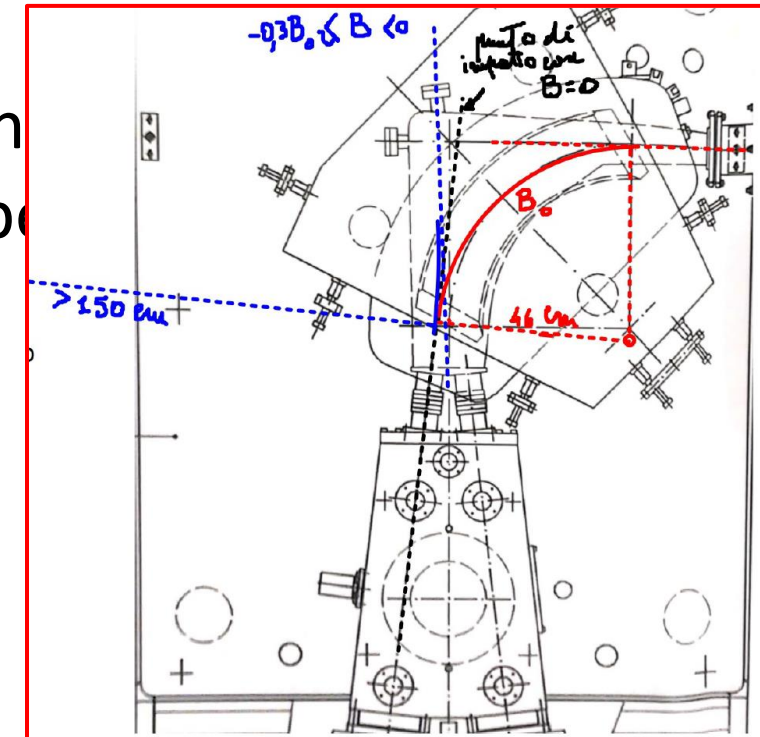
Attività operative

2.1) Abbiamo esteso l'intervallo inferiore a 0.1 - 0.2 MV, e a seconda dello stato di ionizzazione spaziamo nel range 0.2 - 12 MeV

2.2) rallentiamo i fasci con opportune schermature (tecnicamente comunemente anche da altri gruppi) per impiantare su

In prospettiva

2.3) Esiste la possibilità di aprire un canale per fasci non accelerati, in prossimità della sorgente a sputtering, in modo da operare intorno ai 35 keV.

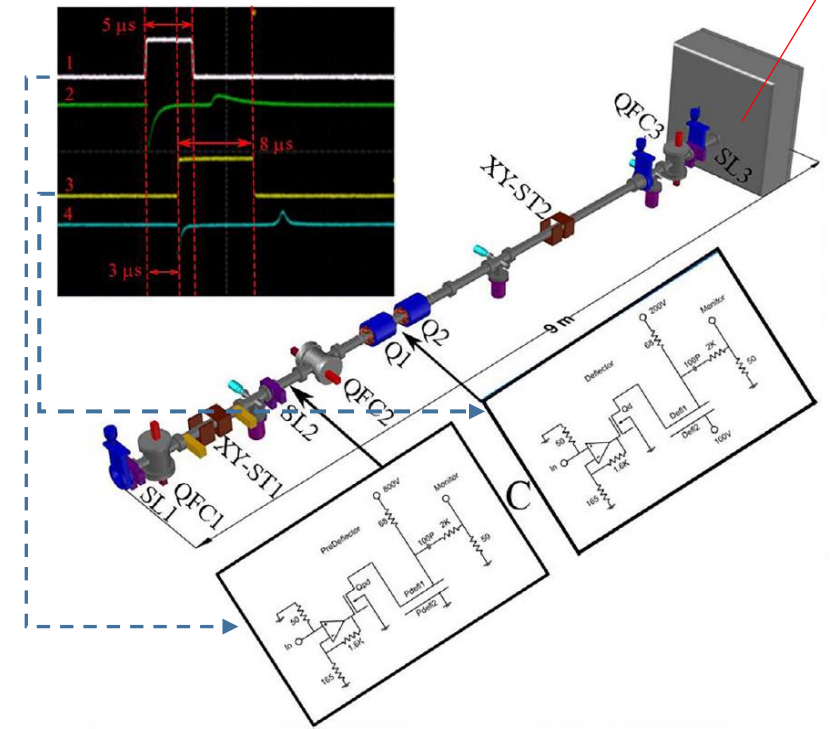
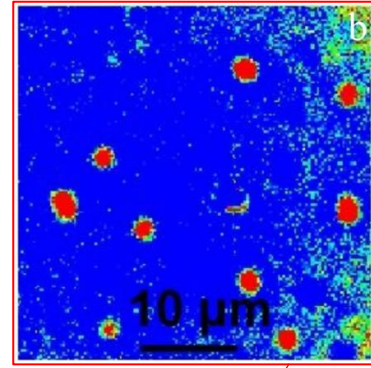


La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per la **Fluenza**

Attività operative

2.1) Il deflettore elettrostatico, sviluppato per il test di rivelatori con fasci impulsati, viene usato con impulsi di lunghezza $\sim \mu\text{s}$ per consentire fluenze $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$, regime per centri isolati individuabili otticamente.



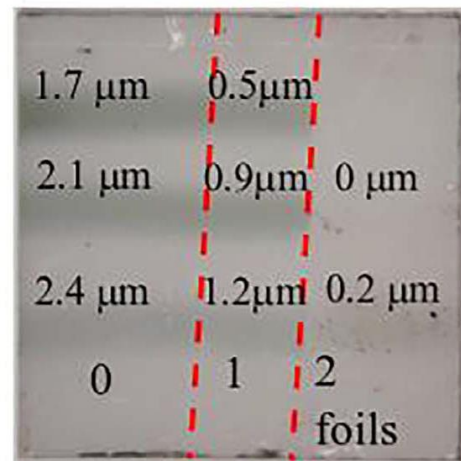
La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per la **Fluenza**

Attività operative

2.1) Il deflettore elettrostatico, sviluppato per il test di rivelatori con fasci impulsati, viene usato con impulsi di lunghezza $\sim \mu\text{s}$ per consentire fluenze $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$, regime per centri isolati individuabili otticamente.

2.2) Usato in regime continuo, con le correnti usuali (1-10 nA/mm²), si raggiungono alte fluenze (drogaggi intensi o danneggiamenti) in tempi $< 1000 \text{ s}$.



6 MeV

8 MeV $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ Si-ions}$

10 MeV

1.7 μm	0.5 μm	
2.1 μm	0.9 μm	0 μm
2.4 μm	1.2 μm	0.2 μm
0	1	2
		foils

La linea DEFEL ha offerto ottime caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per **la Fluenza**

Attività operative

2.1) Il deflettore elettrostatico, sviluppato per il test di rivelatori con fasci impulsati, viene usato con impulsi di lunghezza $\sim \mu\text{s}$ per consentire fluenze $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$, regime per centri isolati individuabili otticamente.

2.2) Usato in regime continuo, con le correnti usuali (1-10 nA/mm²), si raggiungono alte fluenze (drogaggi intensi o danneggiamenti) in tempi $< 1000 \text{ s}$.

2.3) Compiuti esperimenti di impiantazione deterministica di protoni 1 MeV in campioni diamanti da noi equipaggiati con rivelatori pixelati (esp. Timespot)

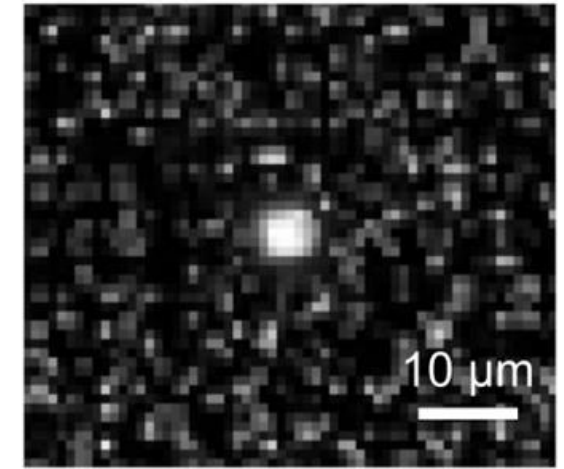
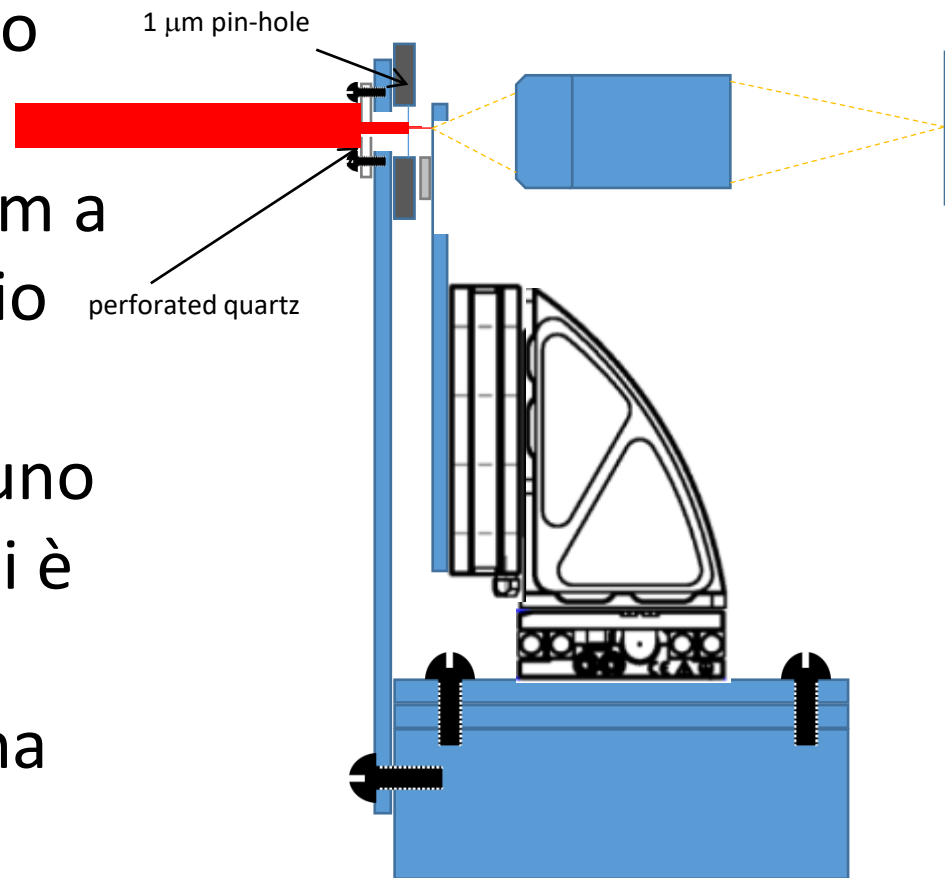
In prospettiva: impiantazione deterministica di singoli centri

La linea DEFEL ha offerto buone caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per l'area impiantata.

Attività operative

4.1) Il fascio viene sagomato per mezzo di pin-holes con diametri che variano da $1\mu\text{m}$ a 1mm . La posizione del fascio viene determinata dalla luminescenza prodotta su uno schermo di zaffiro, dove poi è collocato il campione con motori nanometrici, con una precisione che in pratica dipende dalla risoluzione del sistema microscopico.



La linea DEFEL ha offerto buone caratteristiche di flessibilità, e si sta lavorando per estenderne ulteriormente il range delle condizioni d'uso

Per **l'area impiantata**.

Attività operative

4.1) Il fascio viene sagomato per mezzo di pin-holes con diametri che variano da $1\mu\text{m}$ a 1mm . La posizione del fascio a valle del pin-hole viene determinata dalla luminescenza prodotta su uno schermo di zaffiro, poi in tale posizione viene collocato il campione con motori nanometrici, con una precisione che in pratica dipende dalla risoluzione del sistema microscopico.

In prospettiva

4.2) I pin-holes più piccoli presentano un effetto di diffusione da parte del bordo più importante, per cui alcuni ioni possono essere deflessi a piccoli angoli e alterare la distribuzione voluta. Si sono eseguiti esperimenti per la minimizzazione di questo effetto e il problema è ancora allo studio.

Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni

S Lagomarsino, S Calusi, M Massi, N Gelli, S Sciortino, F Taccetti, L Giuntini, A Sordini, M Vannoni, F Bosia, D Gatto Monticone, P Olivero, BA Fairchild, P Kashyap, ADC Alves, MA Strack, S Praver, AD Greentree. *Refractive index variation in a free-standing diamond thin film induced by irradiation with fully transmitted high-energy protons*. **Scientific Reports** 7 (2017) 385

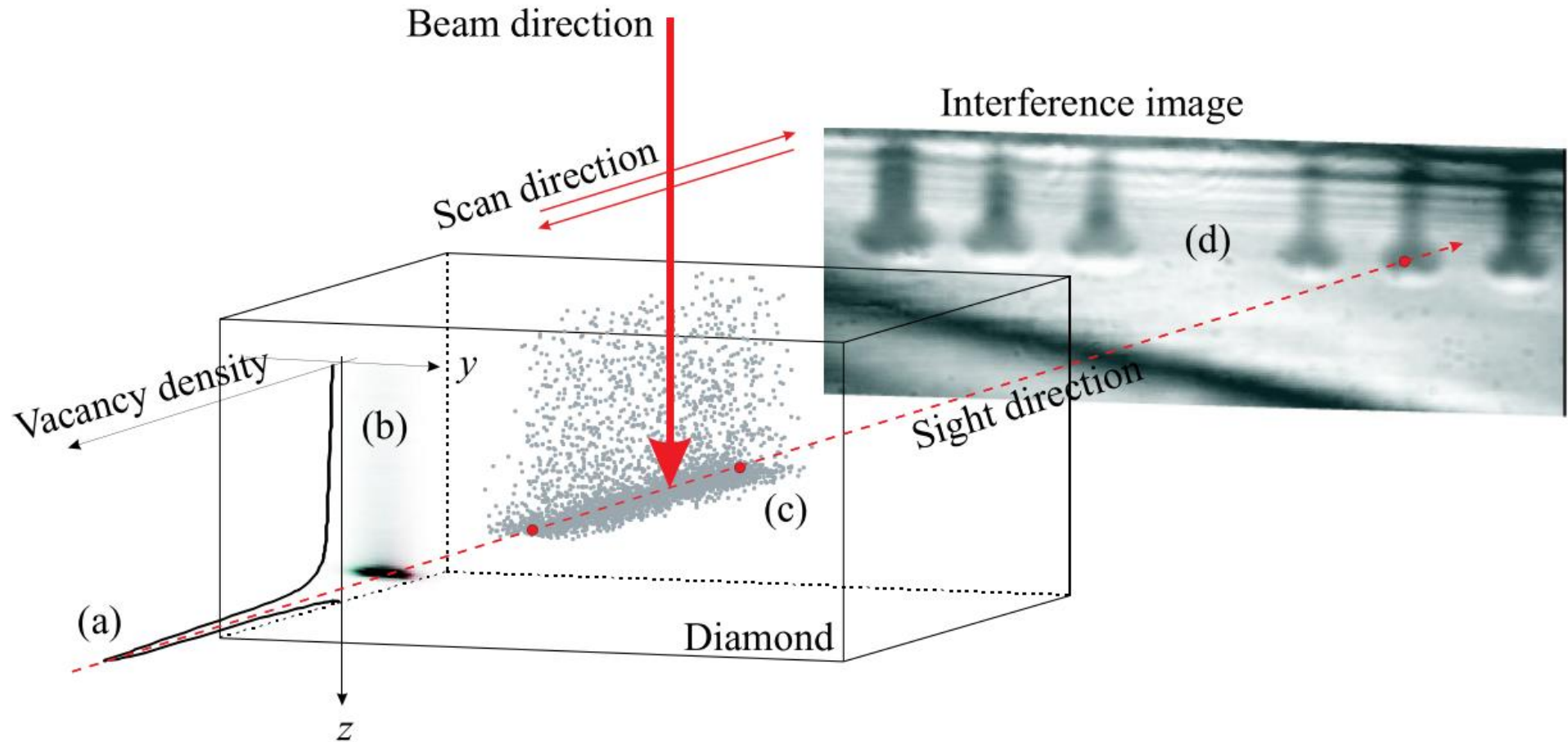
P. Olivero, S. Calusi, L. Giuntini, S. Lagomarsino, A. Lo Giudice, M. Massi, S. Sciortino, M. Vannoni, E. Vittone (2010). *Controlled variation of the refractive index in ion-damaged diamond*. *Diamond And Related Materials*, vol. 19, p. 428-431, ISSN: 0925-9635, doi: 10.1016/j.diamond.2009.12.011

Lagomarsino S, Olivero P, Bosia F, Vannoni M, Calusi S, Giuntini L, Massi M (2010). *Evidence of light guiding in ion-implanted diamond*. **Physical Review Letters**, vol. 105, p. 233903-1-233903-4, ISSN: 0031-9007, doi: 10.1103/PhysRevLett.105.233903

Ettore Vittone, Oksana Budnyk, Alessandro Lo Giudice, Paolo Olivero, Federico Picollo, Hao Wang, Federico Bosia, Silvia Calusi, Lorenzo Giuntini, Mirko Massi, Stefano Lagomarsino, Silvio Sciortino, Giampiero Amato, Stefano Borini, Milko Jaksic, Zeljko Pastuovic, Natko Skukan, Maurizio Vannoni. *Modification of the electrical and optical properties of single crystal diamond with focused MeV ion beams*. *MRS Proceedings* 1203, 1203-J17-06 (2009)

Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni



S Lagomarsino,
Monticone, P
variation in a
Reports 7 (20
P. Olivero, S. C
Controlled var
ISSN: 0925-96
Lagomarsino S
implanted di
10.1103/PhysR
Ettore Vittone,
Calusi, Lorenz
Jaksic, Zeljko

atto
dex
tific
10).
431,
ion-
doi:
lvia
ilko
ngle

Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature

S Lagomarsino, S Sciortino, N Gelli, A M Flatae, F Gorelli, M Santoro, M Chiari, C Czelusniac, M Massi, F Taccetti, M Agio, L Giuntini. *The center for production of single-photon emitters at the electrostatic-deflector line of the Tandem accelerator of LABEC (Florence)*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 422 (2018) 31-40

S Lagomarsino, A M Flatae, S Sciortino, F Gorelli, M Santoro, F Tantussi, F De Angelis, N Gelli, F Taccetti, L Giuntini, M Agio. *Optical properties of silicon-vacancy color centers in diamond created by ion implantation and post-annealing*. Diamond and Related Materials. 84 (2018) 196-203S

Lagomarsino, F Gorelli, M Santoro, N Fabbri, A Hajeb, S Sciortino, L Palla, C Czelusniak, M Massi, F Taccetti, L Giuntini, N Gelli, D Yu Fedyanin, F S Cataliotti, C Toninelli, M Agio. *Robust luminescence of the silicon-vacancy center in diamond at high temperatures*. AIP Advances 5 (12), p.127117 (2015)

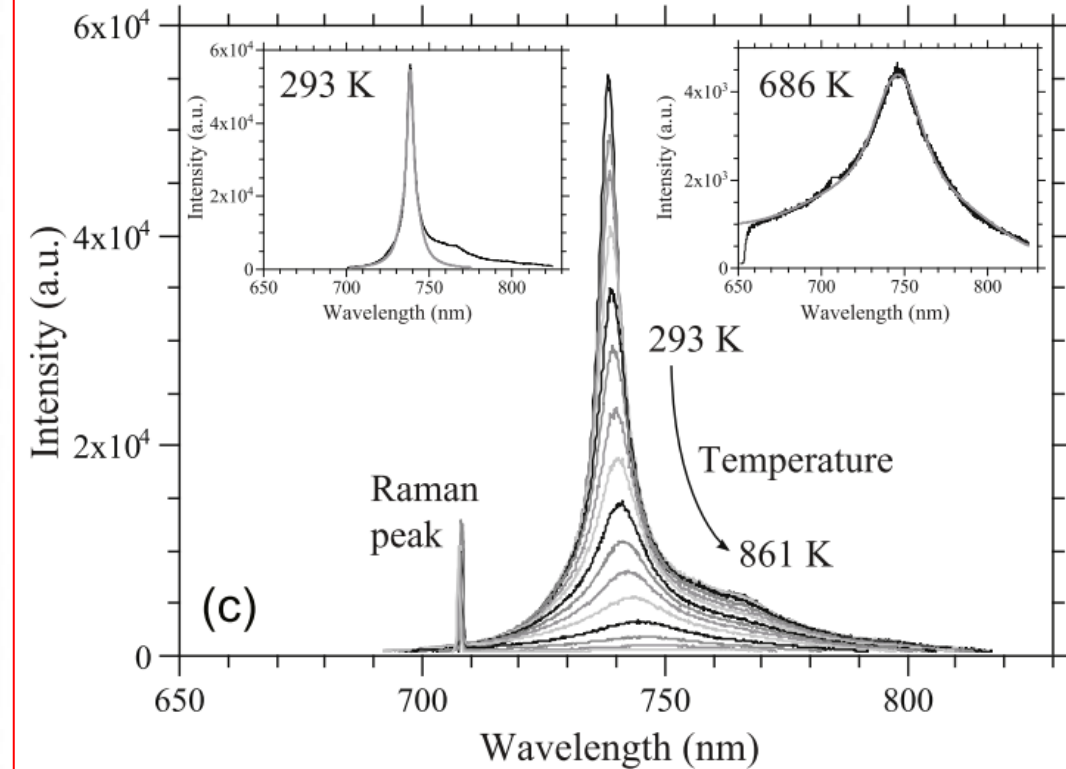
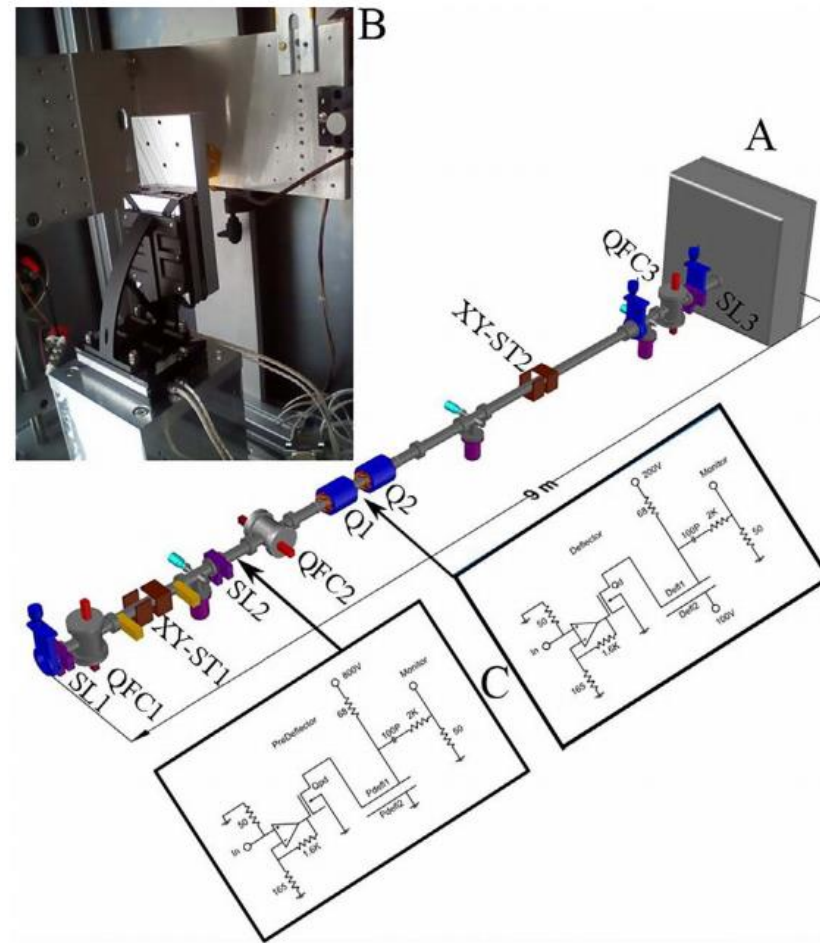
Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature

S Lagomarsino, S Taccetti, M Agio, I *of the Tandem acce*
Beam Interactions v

S Lagomarsino, A M Giuntini, M Agio. *C post-annealing. Dia*

Lagomarsino, F Go Giuntini, N Gelli, D *center in diamond a*



Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo

Stefano Lagomarsino, Assegid M Flatae, Haritha Kambalathmana, Florian Sledz, Lukas Hunold, Navid Soltani, Philipp Reuschel, Silvio Sciortino, Nicla Gelli, Mirko Massi, Caroline Czelusniak, Lorenzo Giuntini, Mario Agio. *Creation of silicon-vacancy color centers in diamond by ion implantation*. *Frontiers in Physics* 8, 626 (2022)

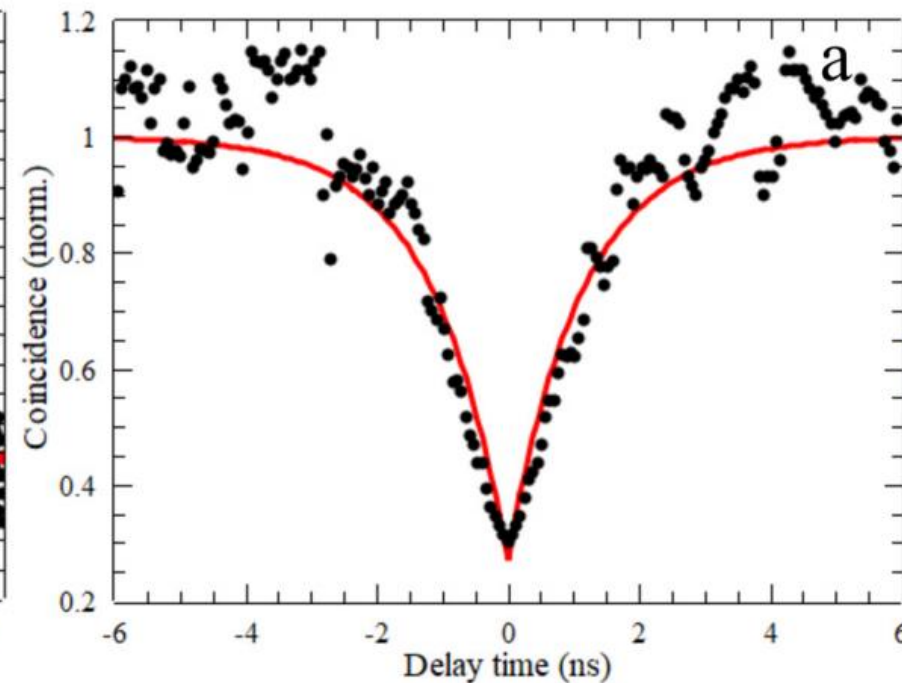
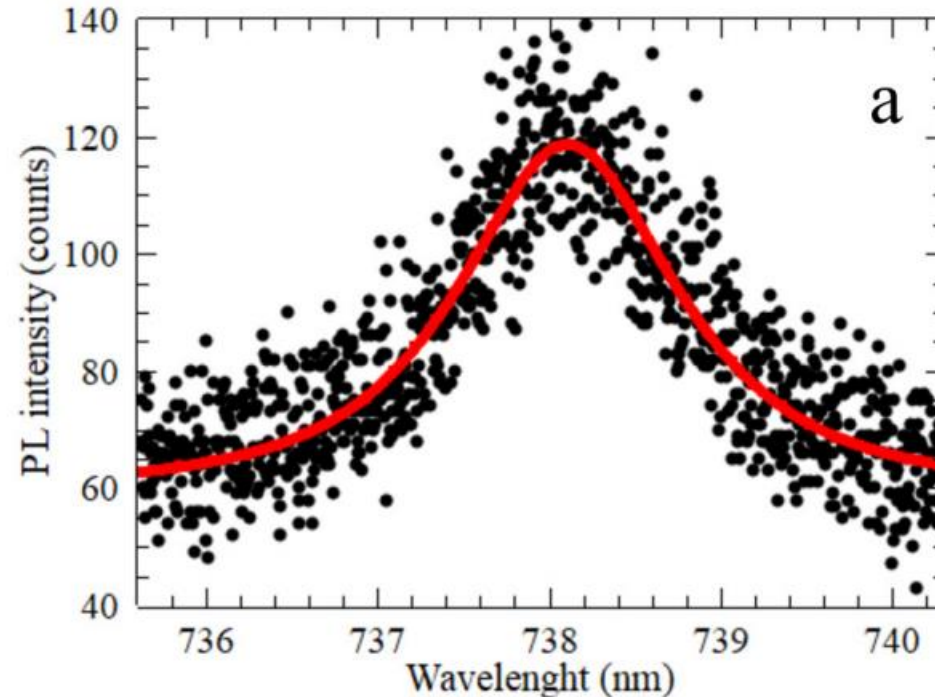
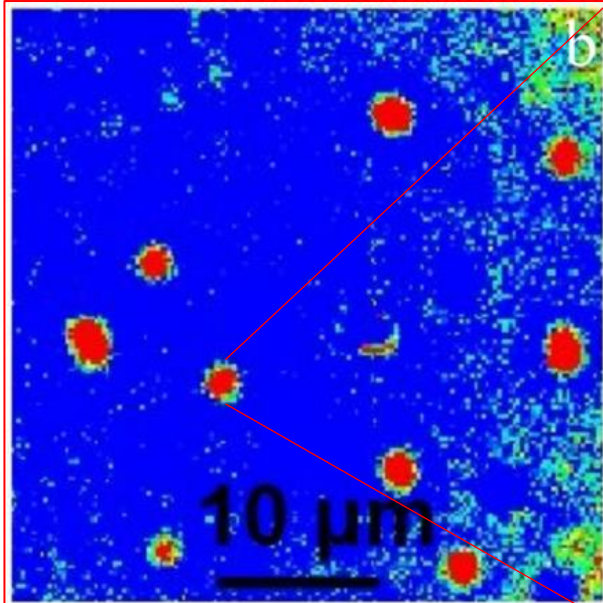
S Lagomarsino, A M Flatae, S Sciortino, F Gorelli, M Santoro, F Tantussi, F De Angelis, N Gelli, F Taccetti, L Giuntini, M Agio. *Optical properties of silicon-vacancy color centers in diamond created by ion implantation and post-annealing*. *Diamond and Related Materials*. 84 (2018) 196-203

Contributi dell'attività del Labec nelle tecnologie quantistiche

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo

~~Stefano Lagomarsino. Assegid M. Flatae. Haritha Kambalathmana. Florian Sledz. Lukas Hunold. Navid Soltani.~~

~~Philipp Dorschner, Sil~~



Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

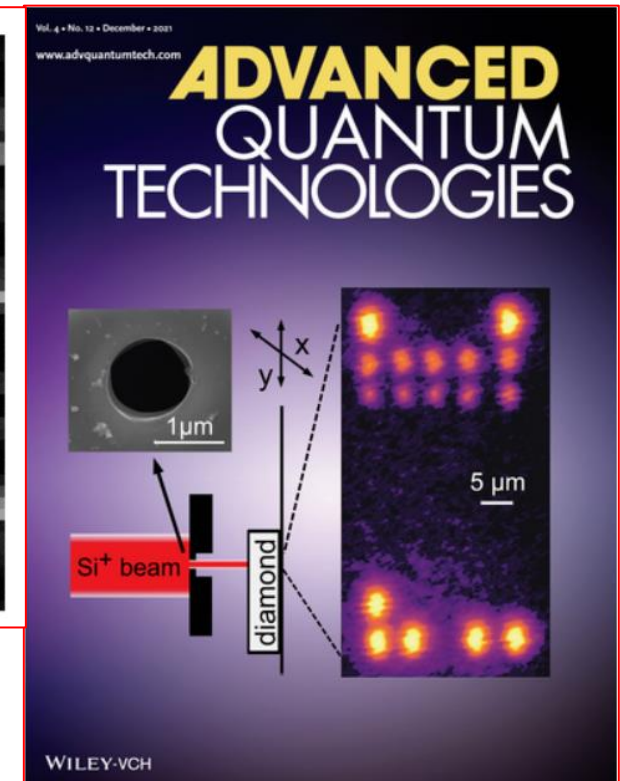
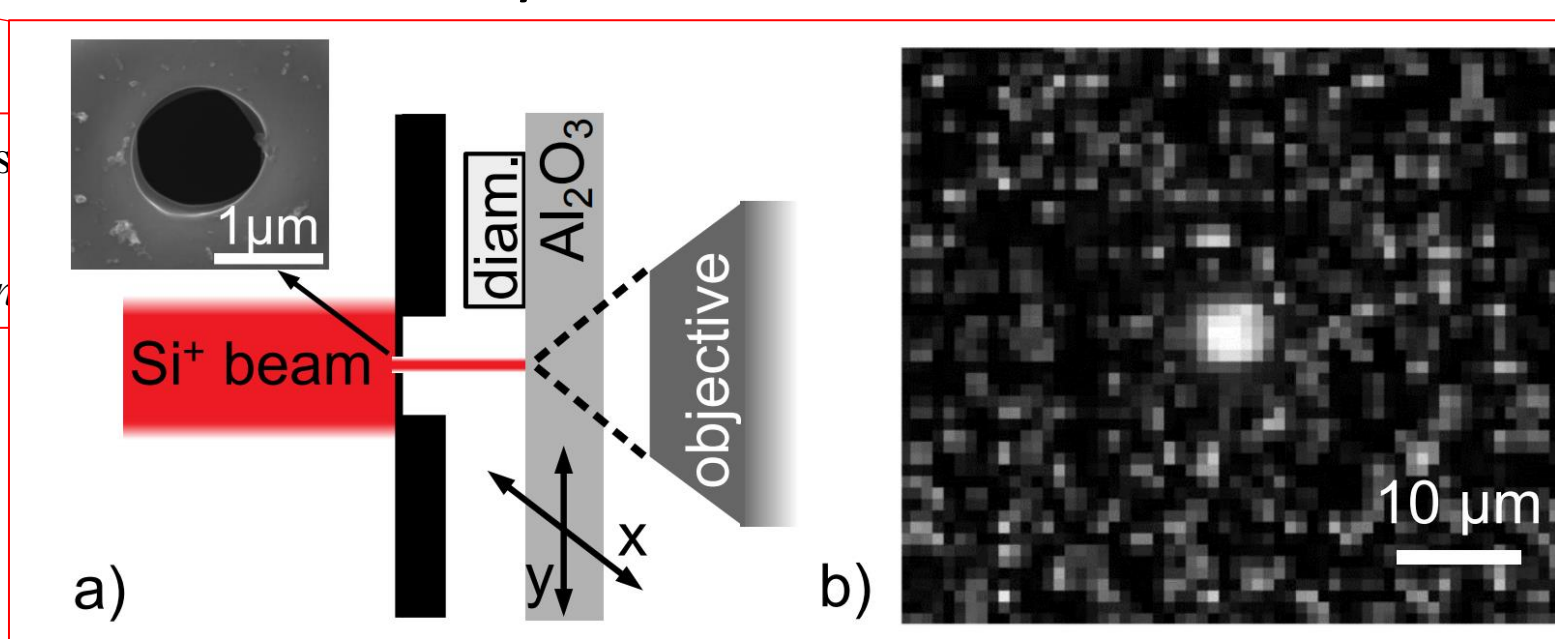
- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo
- 4) Fabbricazione di arrays di centri SiV

Lukas Hunold, Stefano Lagomarsino, Assegid M Flatae, Haritha Kambalathmana, Florian Sledz, Silvio Sciortino, Nicla Gelli, Lorenzo Giuntini, Mario Agio. *Scalable Creation of Deep Silicon-Vacancy Color Centers in Diamond by Ion Implantation through a 1- μ m Pinhole*. Advanced Quantum Technologies (2021) 2100079

Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo
- 4) Fabbricazione di arrays di centri SiV

Lukas
Nicla
by Ion



Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo
- 4) Fabbricazione di arrays di centri SiV
- 5) Impiantazione in membrane di diamante equipaggiate con antenne ottiche per migliorare la collimazione e il rate di emissione spontanea

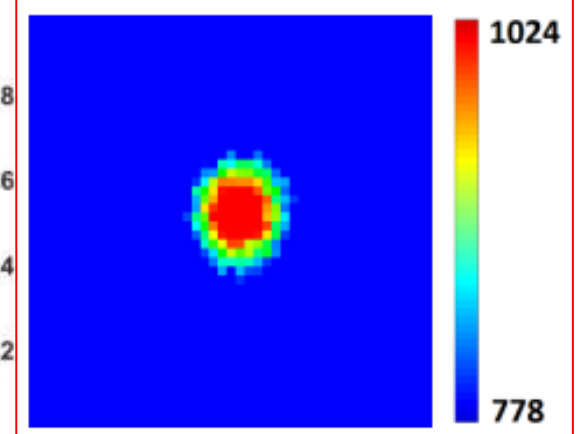
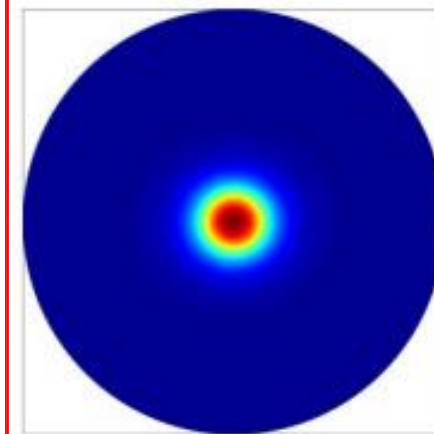
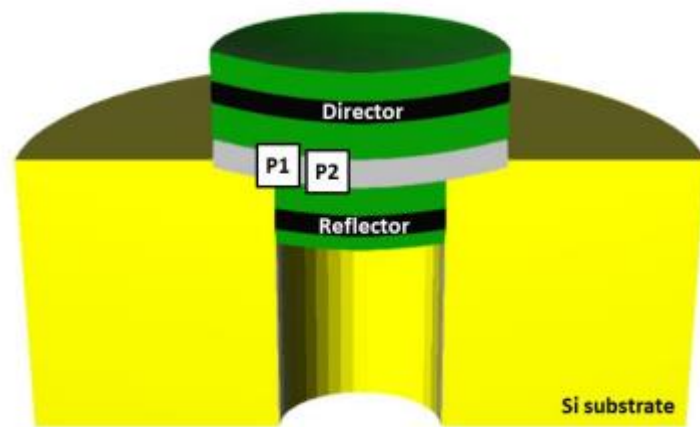
H Kambalathmana, AM Flatae, S Lagomarsino, H Galal, F Tantussi, GC Messina, E Wörner, C Wild, N Gelli, S Sciortino, L Giuntini, F De Angelis, M Agio. *Exploring ultrafast single-photon emission of silicon-vacancy color centers in diamond nano-membranes coupled with gold nano-cones*. Quantum Nanophotonic Materials, Devices, and Systems 2019

Hossam Galal, Assegid M Flatae, Stefano Lagomarsino, Gregor Schulte, Christoph Wild, Eckhard Wörner, Nicla Gelli, Silvio Sciortino, Holger Schönherr, Lorenzo Giuntini, Mario Agio. *Highly efficient light extraction and directional emission from diamond color centers using planar Yagi-Uda antennas*. arXiv:1905.03363

Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo
- 4) Fabbricazione di arrays di centri SiV
- 5) Impiantazione in membrane di diamante equipaggiate con antenne ottiche per migliorare la collimazione e il rate di emissione spontanea

H Kambalathmana, A
Sciortino, L Giuntini,
centers in diamond na
and Systems 2019
Hossam Galal, Assegio
Gelli, Silvio Sciortino,
directional emission fr



Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

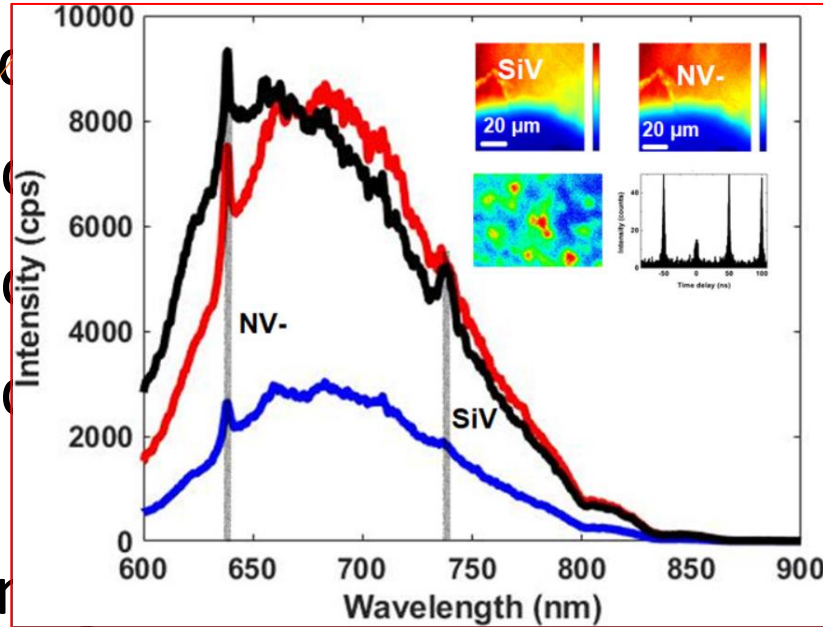
- 1) Fabbricazione di guide d'onda nel diamante con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione di centri SiV in diamante fotostabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione di centri SiV per emissione di fotone singolo
- 4) Fabbricazione di arrays di centri SiV
- 5) Impiantazione in membrane di diamante equipaggiate con antenne ottiche per migliorare la collimazione e il rate di emissione spontanea
- 6) Impiantazione di centri SiV in diodi Schottky per emissione di singolo fotone eccitata elettricamente.

Assegid Mengistu Flatae, Stefano Lagomarsino, Florian Sledz, Navid Soltani, Shannon S Nicley, Ken Haenen, Robert Rechenberg, Michael F Becker, Silvio Sciortino, Nicla Gelli, Lorenzo Giuntini, Francesco Taccetti, Mario Agio. *Silicon-vacancy color centers in phosphorus-doped diamond*. *Diamond and Related Materials* (2020) 107797

F Sledz, AM Flatae, S Lagomarsino, S Piccolomo, SS Nicley, K Haenen. *Light emission from color centers in phosphorus-doped diamond*. *European Physical Journal Web of Conferences* (2022) **266**, 09008

Attività del Labec nelle tecnologie quantistiche: contributi

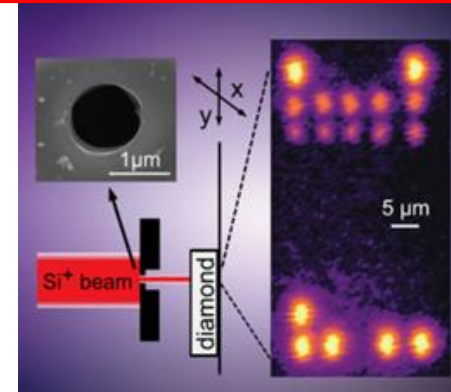
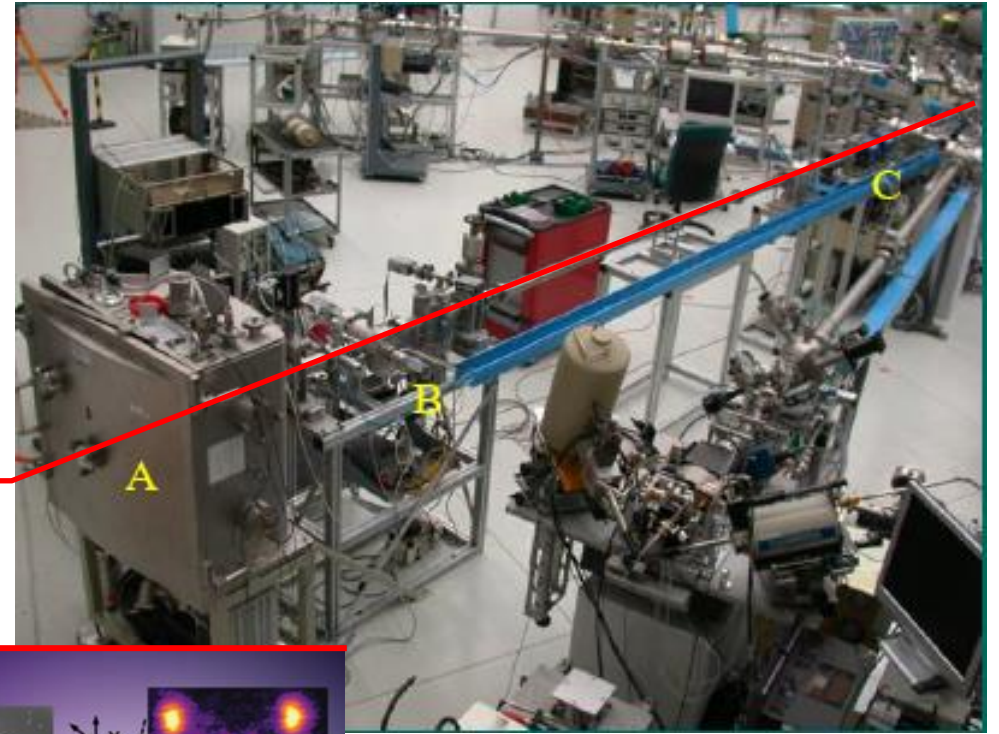
- 1) Fabbricazione e caratterizzazione di centri NV- in diamanti con micro-fascio di protoni
- 2) Fabbricazione e caratterizzazione di centri NV- in diamanti stabili ad alte temperature
- 3) Fabbricazione e caratterizzazione di centri NV- in diamanti di fotone singolo
- 4) Fabbricazione e caratterizzazione di centri NV- in diamanti
- 5) Impiantazione di centri NV- in diodi Schottky per emissione di fotone singolo equipaggiata con antenne
- 6) Impiantazione di centri SiV in diodi Schottky per emissione di singolo fotone eccitata elettricamente. il rate di emissione spontanea



Assegid Mengistu Flatae, Stefano Lagomarsino, Florian Sledz, Navid Soltani, Shannon S Nicley, Ken Haenen, Robert Rechenberg, Michael F Becker, Silvio Sciortino, Nicla Gelli, Lorenzo Giuntini, Francesco Taccetti, Mario Agio. *Silicon-vacancy color centers in phosphorus-doped diamond*. *Diamond and Related Materials* (2020) 107797

F Sledz, AM Flatae, S Lagomarsino, S Piccolomo, SS Nicley, K Haenen. *Light emission from color centers in phosphorus-doped diamond*. *European Physical Journal Web of Conferences* (2022) **266**, 09008

Fasci ionici e tecnologie quantistiche



Nicla Gelli, Lorenzo Giuntini, *Stefano Lagomarsino*,
Mirko Massi, Silvio Sciortino