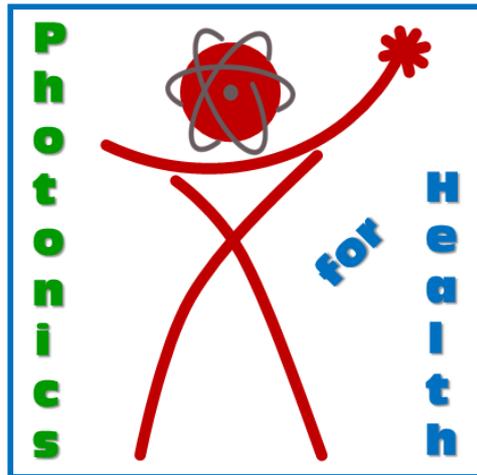




Progetto TECHEA - Technologies for Health WorkPackage WP3 – Photonics for Health



Rapporto Tecnico

Progetto TECHEA: Workpackage WP3

Attività A3.1: rivelatori di radiazione per dosimetria

DELIVERABLE D3.1.5

Francesca Bonfigli, Sabina Botti, Stefano Libera, Rosa Maria Montereali, Enrico Nichelatti, Valentina Nigro, Massimo Piccinini, Priscilla Reale, Antonino Santoni, Gaetano Terranova, Maria Aurora Vincenti

Laboratorio FSN-TECFIS-MNF, ENEA

Novembre 2023

INDICE

<u>1. PRESENTAZIONE SINTETICA DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI CONSEGUITI</u>	4
1.1 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E DEI RISULTATI CONSEGUITI	4
<u>2. PROGETTAZIONE E TEST DEL PROTOTIPO DEL LETTORE IN FOTOLUMINESCENZA PER DOSIMETRI BASATI SU LiF</u>	7
<u>3. RISPOSTA DI FOTOLUMINESCENZA DI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU LiF: IRRAGGIAMENTO A DOSI CLINICHE CON RAGGI X DURI PRODOTTI DALLA SORGENTE TECHEA-WP2</u>	11
<u>4. MODELLISTICA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SULLA FOTOLUMINESCENZA DA CENTRI DI COLORE NEL LiF PER LA DIAGNOSTICA ENERGETICA DI FASCI DI PROTONI</u>	14
4.1 AGGIORNAMENTI AL MODELLO ANALITICO PER LA CURVA DI BRAGG IN CRISTALLI DI LiF	14
4.2 MODELLISTICA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SULLA FOTOLUMINESCENZA DA CENTRI DI COLORE NEI FILM DI LiF PER LA DIAGNOSTICA ENERGETICA DI FASCI DI PROTONI	15
<u>5. REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI RIVELATORI DI RADIAZIONE INNOVATIVI A FILM SOTTILE DI LiF PER DOSIMETRIA CLINICA</u>	18
5.1 RISPOSTA DI FOTOLUMINESCENZA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X MONOCROMATICI	19
5.2 RISOLUZIONE SPAZIALE DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X MONOCROMATICI	21
5.3 RISPOSTA DI FOTOLUMINESCENZA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X DURI PRODOTTI DALLA SORGENTE TECHEA-WP2	22
<u>6. CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE MICRO-SPETTROSCOPIA RAMAN/LUMINESCENZA A SCANSIONE DI SUPERFICIE DI FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X MOLLI</u>	24
<u>7. PRODOTTI DI RICERCA</u>	26
<u>8. APPENDICI*</u>	29
APPENDICE 3.1 - RISPOSTA DI RADIOFOTOLUMINESCENZA DI RIVELATORI BASATI SU LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X DURI PRODOTTI DALLA SORGENTE TECHEA-WP2 E CONFRONTO CON IRRAGGIAMENTO GAMMA (⁶⁰Co) A DOSI CLINICHE	29

APPENDICE 5.1 – RISPOSTA DI RADIOFOTOLUMINESCENZA DI RIVELATORI BASATI SU FILM DI LIF IRRAGGIATI CON RAGGI X DURI PRODOTTI DALLA SORGENTE TECHEA-WP2.....	33
APPENDICE 6.1 - CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE MICRO-SPETTROSCOPIA RAMAN/LUMINESCENZA A SCANSIONE DI SUPERFICIE DI FILM DI LIF IRRAGGIATI CON RAGGI X MOLLI.....	37
9. <u>REFERENZE</u>	40

***Le appendici non sono riportate in questo documento in quanto contengono materiale suscettibile di pubblicazione**

1. Presentazione sintetica delle attività e dei risultati conseguiti

L'attività del **workpackage WP3, Photonics for Health**, riguarda lo sviluppo di sistemi di dosimetria clinica e di sensori indossabili per il controllo di irraggiamenti e dei pazienti durante gli stessi e le diagnostiche associate, basati su due classi di sensori a lettura completamente ottica per applicazioni bio-medicali. Il progetto prevede lo sviluppo di due tipologie di sotto-sistemi distinti:

- 1) rivelatori di radiazione innovativi per dosimetria clinica basati sulla lettura ottica della fluorescenza del fluoruro di litio, con realizzazione di dosimetri a film sottile e di un prototipo di lettore ottico dedicato per la misura della dose immagazzinata nei rivelatori di LiF e della sua distribuzione spaziale 2D e 3D nei trattamenti di adroterapia (**Linea A3.1**);
- 2) sistemi di sensori basati su tecnologia in fibra ottica (FBG), opportunamente funzionalizzati con specifico riferimento alla realizzazione di dispositivi indossabili per esami funzionali anche durante gli interventi, degenza post-operatoria e medicina sportiva (**Linea A3.2**).

Nonostante alcuni ritardi imprevisti nell'erogazione dei fondi destinati al WP3 all'inizio dell'anno finanziario 2023, nel quinto ed ultimo anno del progetto TECHEA le attività di studio, ricerca, sviluppo, sperimentazione e valorizzazione sono proseguite come dettagliato nella descrizione delle attività svolte, riportate di seguito per la Linea A3.1, raggiungendo gli obiettivi previsti.

1.1 Sintesi delle attività svolte e dei risultati conseguiti

- *Allestimento e test del prototipo di lettore in fotoluminescenza per dosimetria clinica*

È stato allestito su banco ottico un prototipo di lettore in fotoluminescenza per dosimetri basati su LiF in forma di cristallo e pasticca, in configurazione verticale compatta. Il lettore è costituito da un laser ad emissione continua alla lunghezza d'onda di 445 nm (Oxxius LBX-445-100-CSB-PPA), operante alla potenza nominale di 35 mW, che eccita la luminescenza visibile dei centri di colore F_2 ed F_3^+ formati nei dosimetri dalle radiazioni ionizzanti. Un obiettivo da microscopio (Nikon CFI Achromat 10x N.A. 0.25) la raccoglie e la focalizza sul detector Hamamatsu H7422P-40, dopo essere stata filtrata da un primo filtro interferenziale (Semrock BLP01-458R-25), che non permette alla luce del laser di raggiungere il detector e da un secondo filtro interferenziale (Chroma ET 670/50), che seleziona spettralmente l'emissione dei soli centri F_2 attorno al picco di 670 nm con un'ampiezza di banda di 50 nm. Il segnale registrato dal detector viene amplificato con un lock-in realizzato presso il Laboratorio FSN-TECFIS-DIM in ENEA C.R. Frascati, modulando il laser a una frequenza di 280 Hz. La progettazione meccanica è stata eseguita utilizzando montaggi commerciali prodotti dalla Thorlabs.

Il lettore è stato testato misurando i cristalli e le pasticche LiF:Mg,Ti irraggiate presso la sorgente primaria ^{60}Co dell'INMRI (ENEA C.R. Casaccia) a maggio 2021 e quelle irraggiate con protoni a energie e dosi cliniche presso il CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, Pavia) a maggio 2022. Recentemente è stata misurata anche la risposta di fotoluminescenza di cristalli e pasticche irraggiati a settembre 2023, in condizioni controllate, con i raggi X prodotti dalla sorgente prototipale per radioterapia TECHEA-WP2, sviluppata nell'ambito del workpackage WP2 del progetto TECHEA dal Laboratorio FSN-TECFIS-APAM per un efficace irraggiamento dei tumori al

seno. Anche in questo caso si è ottenuto un andamento lineare in funzione della dose nell'intervallo da 1 a 20 Gy. I test di stabilità continueranno anche dopo il completamento del progetto.

- *Simulazioni Monte Carlo e con modello analitico della deposizione di energia in cristalli e film di LiF da parte di protoni accelerati*

Sono proseguite le attività di simulazione riguardanti la deposizione di energia in rivelatori a base di LiF, sia in forma di cristallo che di film sottile. Il modello analitico, sviluppato per il calcolo della curva di Bragg prodotta da protoni nel LiF, è stato aggiornato per includere l'effetto dello scattering multiplo di Coulomb e la conseguente fuoriuscita di protoni dai cristalli di LiF utilizzati per la diagnostica energetica del fascio ad incidenza radente. L'inclusione di questo effetto nelle elaborazioni è significativo per energie superiori a circa 30 MeV, con un'importanza che cresce al crescere dell'energia. Inoltre, è stato sviluppato un algoritmo iterativo che permette di stimare lo spettro energetico del fascio di protoni elaborando la curva di Bragg misurata come distribuzione spaziale di fotoluminescenza dei centri di colore prodotti dall'interazione del materiale con i protoni.

Mediante simulazioni Monte Carlo, eseguite col software FLUKA, è stato affrontato il problema della deposizione di energia in film sottili di LiF depositati su substrati di silicio per studiare gli effetti di vari parametri d'irraggiamento sulla distribuzione spaziale di centri di colore luminescenti, proporzionale punto per punto alla dose assorbita dal film. I parametri considerati sono lo spessore del film, l'angolo radente di incidenza del fascio di protoni, la densità d'impacchettamento del materiale e l'energia cinetica dei protoni. Gli effetti di questi parametri sono stati verificati anche sperimentalmente.

- *Realizzazione e caratterizzazione di rivelatori a film di LiF per dosimetria clinica*

È proseguita l'attività di crescita e caratterizzazione di film di LiF, che sono stati irraggiati con differenti tipi di radiazioni per lo studio della loro risposta in fotoluminescenza applicata alla dosimetria. Per i rivelatori a film sottile di LiF di spessore crescente depositati su vetro e Si(100) e irraggiati con raggi X monocromatici di energia compresa tra 5 e 12 keV a diverse dosi (collaborazione scientifica internazionale tra FSN-TECFIS-MNF (ENEA, I), Lab. LULI dell'École Polytechnique (F), Università di Osaka (J) e JIHT-Russian Academy (RU)), la dose minima rivelabile con un microscopio a fluorescenza è stata valutata essere pari a circa 10 Gy per raggi X di energia 7 keV, risultato molto promettente nell'ambito della ricerca e sviluppo di rivelatori a film sottile di LiF per dosimetria clinica. L'amplificazione della risposta di fluorescenza nei film cresciuti sul substrato di silicio, otticamente riflettente, dipende dall'energia dei raggi X e dallo spessore dei film di LiF; essa va da un minimo del 50% per l'energia di 7 keV fino a circa il 400% per energia di 9 keV.

A settembre 2023, sono stati irraggiati con i raggi X prodotti dalla sorgente prototipale per radioterapia TECHEA-WP2 anche rivelatori di radiazione a film di LiF di spessore nominale compreso fra 1 e 2 μm , cresciuti per evaporazione termica su differenti substrati (vetro, Suprasil®, Si(100) VM2000) e caratterizzati mediante profilometria a contatto, microscopia a forza atomica, diffrazione a raggi X e spettrofotometria. Gli spettri di fotoluminescenza sono stati misurati su banco ottico sotto eccitazione laser. La dose minima rilevata è pari a 10 Gy. La risposta di fotoluminescenza mostra un andamento lineare con la dose e, a parità di dose, con lo spessore.

- *Caratterizzazione mediante micro-spettroscopia Raman/luminescenza a scansione di superficie di film di LiF irraggiati con raggi-X molli*

È proseguita l'attività di studio mediante micro-spettroscopia Raman con lo spettrometro Horiba XploRA Plus su film di LiF cresciuti per evaporazione termica su diversi substrati e differente

spessore, precedentemente irraggiati con raggi X molli da laser plasma (Università di Roma Tor Vergata). In particolare, sono stati studiati film di LiF spessi circa 100 nm ed 1 μm su substrati di vetro, silicio, alluminio depositato su vetro e alluminio depositato su silicio. L'analisi di questi film contenenti centri di colore combina il segnale Raman con quello di luminescenza, evidenziando l'interazione del centro di colore con le vibrazioni reticolari, confermando la possibilità di correlare i picchi Raman allo studio delle dimensioni dei grani del film policristallino, alla continuità e alla struttura frattale.

2. Progettazione e test del prototipo del lettore in fotoluminescenza per dosimetri basati su LiF

Presso il laboratorio Stato Solido di FSN-TECFIS-MNF è stato allestito su banco ottico un prototipo di lettore in fotoluminescenza per dosimetri basati su difetti indotti da radiazione ionizzante nel LiF in forma di cristallo e pasticca. Rispetto alla configurazione di montaggio inizialmente adottata per il prototipo [1], è stata scelta una configurazione verticale, che garantisce maggiore compattezza e facilita il montaggio del campione, migliorandone la riproducibilità di posizionamento.

Il lettore è costituito da un laser a stato solido ad emissione continua alla lunghezza d'onda di 445 nm (Oxxius LBX-445-100-CSB-PPA) operante alla potenza nominale di 3.5 mW. Il fascio laser, emesso in direzione orizzontale, viene deviato di circa 70° verso l'alto da uno specchio che lo invia sul dosimetro da misurare. Il laser eccita la fotoluminescenza visibile dei centri aggregati F_2 ed F_3^+ , formati nei dosimetri basati su LiF dalle radiazioni ionizzanti, che viene raccolta da un obiettivo da microscopio (Nikon CFI Achromat 10x N.A. 0.25) e focalizzata sul fotorivelatore (fototubo Hamamatsu H7422P-40), dopo essere stata otticamente filtrata da un primo filtro interferenziale (Semrock BLP01-458R-25), che non permette alla luce del laser di raggiungere il fotorivelatore e da un secondo filtro interferenziale (Chroma ET 670/50), che seleziona l'emissione rossa dei soli centri attivi F_2 , centrata attorno alla lunghezza d'onda di picco di 670 nm con un'ampiezza di banda di 50 nm. Il segnale registrato dal fototubo viene amplificato con un lock-in basato su tecnologia ARDUINO (DSP BOX [2], gestito con software Labview), realizzato presso il laboratorio FSN-TECFIS-DIM, modulando il laser ad una frequenza di 280 Hz. La Figura 2.1 mostra il lettore con indicati i suddetti componenti, opportunamente selezionati, che sono stati assemblati utilizzando montaggi meccanici presenti in laboratorio per effettuare i test sperimentali; la Figura 2.2 mostra il DSP BOX con sopra la centralina di controllo del laser, entrambi gestiti da PC portatile.

Per realizzare un prototipo più compatto e svincolato dal banco del laboratorio, è stata eseguita la progettazione meccanica del lettore utilizzando montaggi commerciali prodotti dalla Thorlabs (vedi Figura 2.3 con indicati i codici dei componenti Thorlabs), racchiudendolo all'interno di un contenitore a tenuta di luce facilmente accessibile per il posizionamento dei dosimetri da misurare. Per verificare la funzionalità del lettore è stato misurato il segnale di radiofotoluminescenza (RFL) emesso dalle pasticche LiF:Mg,Ti irraggiate presso la sorgente di calibrazione primaria ^{60}Co a Maggio

2021 [3] e quelle irradiate con protoni a energie e dosi cliniche presso il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica a Maggio 2022 [4]. La risposta di RFL in funzione della dose per i due set di campioni è riportata in Figura 2.4 e conferma quanto misurato con lo spettrometro allestito sul banco ottico (cfr. Figura 2.1.10 in [4]).

Figura 2.1 - Prototipo di lettore di RFL per dosimetri basati su LiF realizzato con i componenti assemblati nel laboratorio Stato Solido di FSN-TECFIS-MNF.

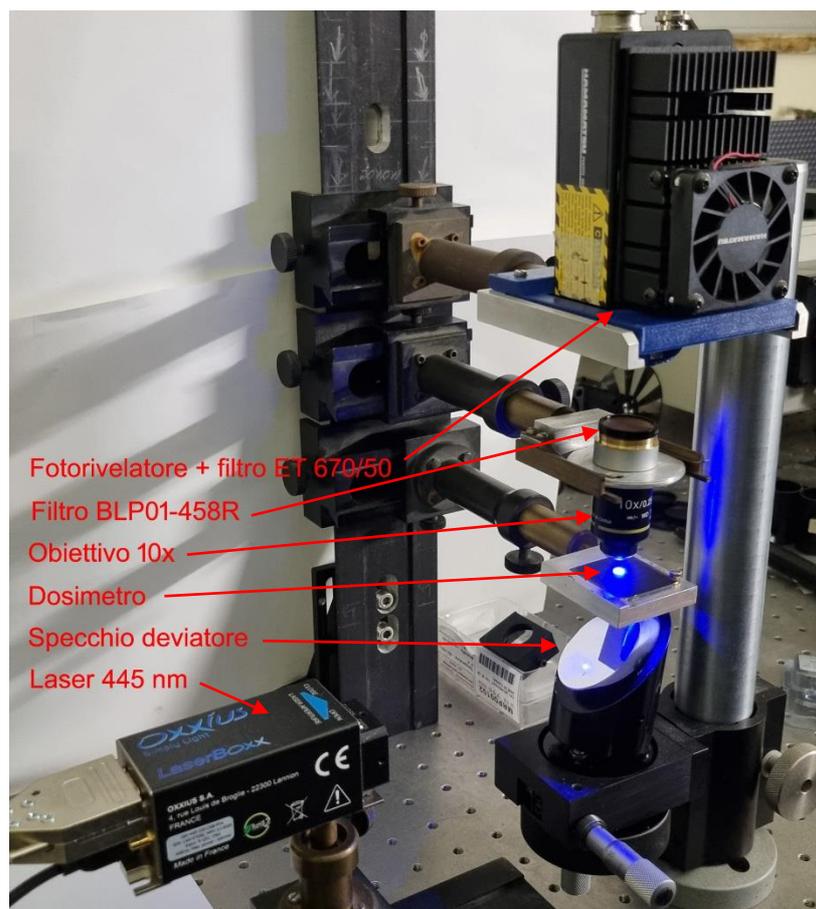


Figura 2.2 - PC portatile per la gestione del lock-in DSP BOX tramite software Labview, utilizzato per l'acquisizione dei dati del lettore.

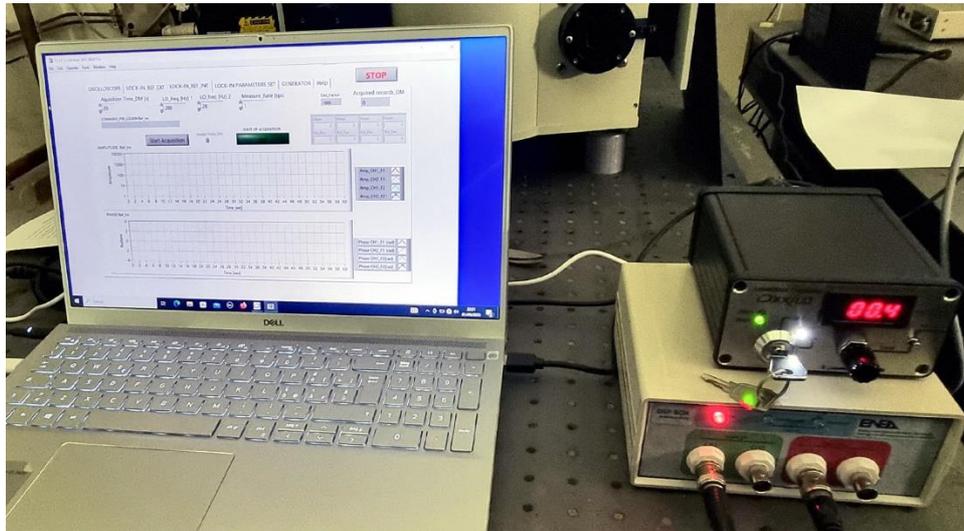


Figura 2.3 - Progetto del prototipo del lettore, assemblato utilizzando montaggi prodotti dalla Thorlabs, inserito all'interno del contenitore a tenuta di luce.

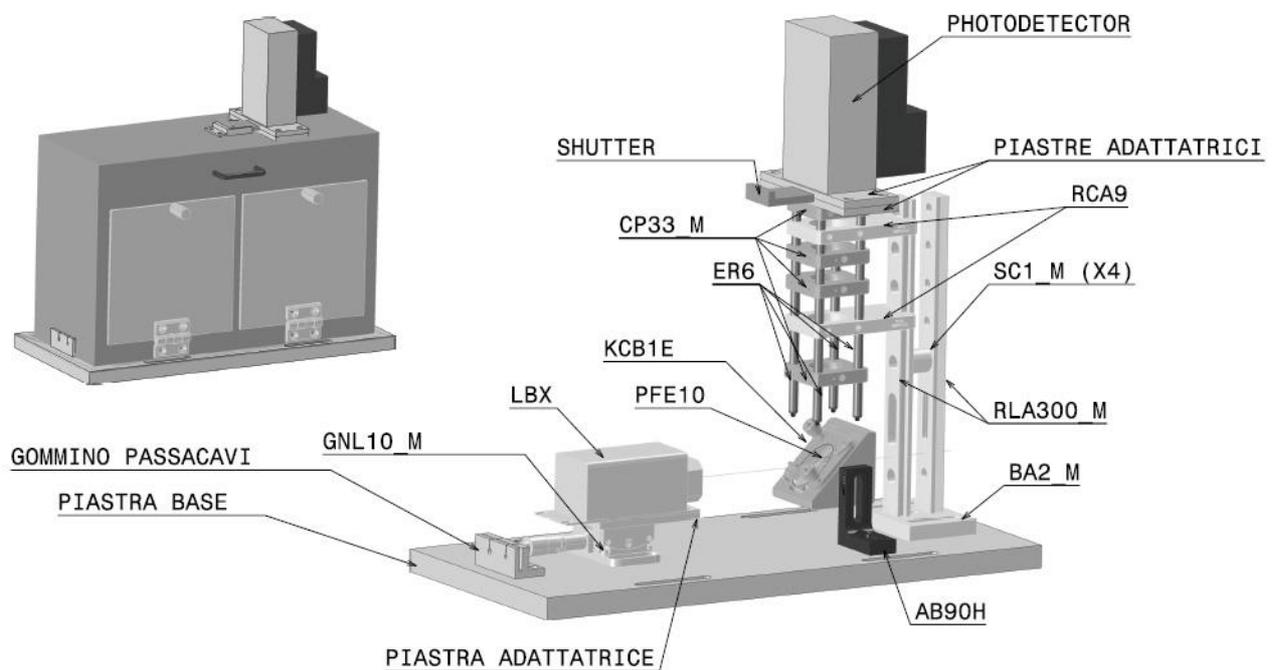
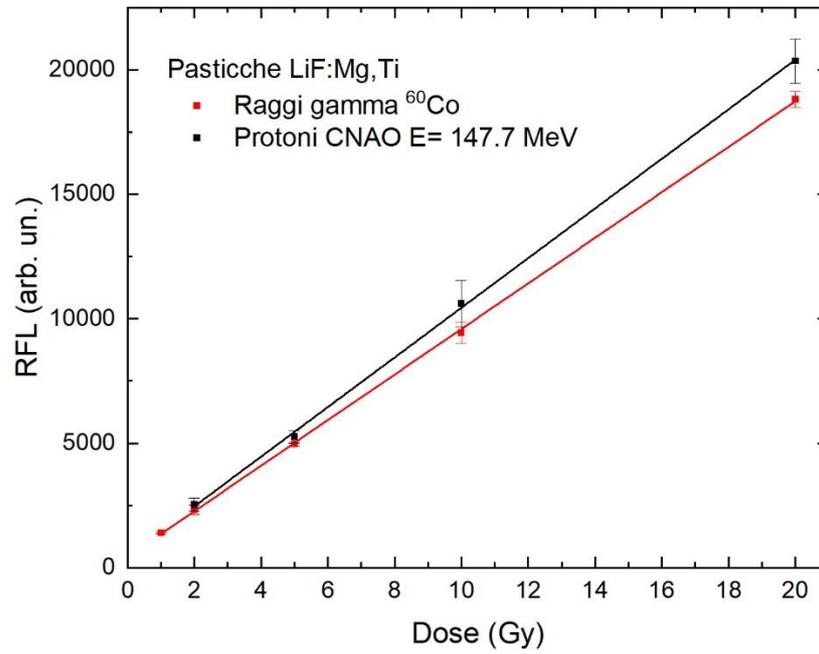


Figura 2.4 - RFL delle pasticche LiF:Mg,Ti irradiate con protoni di energia 147.7 MeV e con sorgenti di calibrazione primaria ^{60}Co misurata con il prototipo del lettore.



3. Risposta di fotoluminescenza di rivelatori di radiazione basati su LiF: irraggiamento a dosi cliniche con raggi X duri prodotti dalla sorgente TECHEA- WP2

A fine settembre 2023, sono stati eseguiti irraggiamenti in condizioni controllate, nell'intervallo di dose da 1 a 20 Gy, con i raggi X prodotti dalla sorgente prototipale per radioterapia TECHEA-WP2, sviluppata nell'ambito del workpackage WP2 del progetto TECHEA dal Laboratorio FSN-TECFIS-APAM, sia di rivelatori di radiazione basati su cristalli di LiF nominalmente puro, sia di pasticche di LiF drogato con Mg e Ti (LiF:Mg,Ti), ovvero dosimetri commerciali già ampiamente utilizzati mediante lettura di termoluminescenza (TLD-100). La sorgente, basata su un acceleratore lineare compatto di elettroni da 3 MeV, è in grado di generare raggi X di *Bremsstrahlung* per un efficace irraggiamento dei tumori al seno. I rivelatori di radiazione basati su LiF sono stati irraggiati collocandoli all'interno di un fantoccio di acqua solida. La seguente Tabella 3.1 riporta le caratteristiche dei dosimetri irraggiati e le relative dosi erogate.

Tabella 3.1 – Elenco dei dosimetri (cristalli di LiF e pasticche di LiF:Mg,Ti) irraggiati con raggi X prodotti della sorgente TECHEA-WP2 e relativi dati di irraggiamento.

Irr. #	Dosimetro	Quantità	Spessore (mm)	Dose nominale (Gy)	Dose effettiva (Gy)	Dose-rate (Gy/min)	Durata irr.
1	Cristalli	3	1	1	0.99	1.42	42''
2	Cristalli	3	1	2	2.08	1.43	1'27''
3	Cristalli	3	1	5	5.32	1.47	3'37''
4	Cristalli	3	1	10	9.97	1.42	7'
5	Cristalli	3	1	20	21.01	1.46	14'22''
6	Pasticche	4	0.89	1	1.01	1.44	42''
7	Pasticche	4	0.89	2	2.15	1.48	1'27''
8	Pasticche	4	0.89	5	5.20	1.44	3'37''
9	Pasticche	4	0.89	10	10.26	1.47	7'
10	Pasticche	4	0.89	20	21.05	1.46	14'22''

Utilizzando il prototipo di lettore sviluppato per i suddetti dosimetri (vedi paragrafo 2), è stata misurata la radiofotoluminescenza (RFL) dei centri di colore F_2 indotti nei dosimetri dall'irraggiamento, che è risultata lineare in funzione della dose.

È stato anche effettuato il confronto con la risposta in RFL dei dosimetri irraggiati durante il terzo anno del progetto con la sorgente calibrata di ^{60}Co presso INMRI (ENEA C.R. Casaccia) nello stesso intervallo di dose. I dettagli e i risultati sperimentali preliminari sono riportati nell'Appendice 3.1.

I risultati ottenuti nell'ambito del progetto dalla caratterizzazione della risposta di RFL del LiF, sia nominalmente puro che drogato, permettono di affermare che il materiale mostra caratteristiche che lo rendono adatto al suo utilizzo come dosimetro passivo per radioterapia clinica, sfruttando il segnale di RFL dei centri di colore creati dalle radiazioni ionizzanti. Infatti, è stato dimostrato che il rivelatore di LiF basato su RFL possiede le seguenti caratteristiche tipiche del dosimetro ideale:

- Risposta lineare di RFL fino alla dose clinica di 20 Gy, sia con protoni di energie cliniche (CNAO, Centro Nazionale Adroterapia Oncologica, Pavia), sia con raggi γ (sorgente calibrata ^{60}Co presso INMRI), che con raggi X duri;
- Indipendenza della risposta di RFL dall'energia del fascio di protoni a parità di dose nell'intervallo 70-200 MeV, tipicamente utilizzato in protonterapia;
- Indipendenza della risposta di RFL dal rateo di dose del fascio di protoni [5], come ricavato anche dall'irraggiamento ad energie cliniche a bassa dose in corrispondenza dello Spread Out Bragg Peak (SOBP) presso il CNAO;
- Imaging 2D – dose mapping della curva di Bragg a dosi cliniche in cristalli di LiF [6];
- Minima dose misurabile di 50 mGy con sorgente ^{60}Co utilizzando cristalli di spessore 1 mm [7];
- Segnale di RFL stabile nel tempo (misurato fino a 39 mesi nei cristalli di LiF), con possibilità di ripetere la misura senza decadimento del segnale, mantenendo così inalterata nel tempo l'informazione sulla dose assorbita;
- Valore del numero atomico effettivo Z_{eff} (LiF) = 8.3 molto prossimo a quello dell'acqua $Z_{\text{eff}}(\text{H}_2\text{O}) = 7.5$ (tissue/water equivalence);
- Possibilità di riutilizzo del materiale attraverso un processo di annealing termico di 30 minuti a 400°C, che cancella i centri di colore, rendendolo disponibile per un nuovo irraggiamento;
- Possibilità di effettuare una lettura sia in RFL che in TL, soprattutto con le pastiglie LiF:Mg,Ti.

Queste caratteristiche, in particolare la risposta in RFL misurabile su un ampio intervallo di dose e l'indipendenza dal rateo di dose, rendono inoltre il LiF un materiale promettente per il suo uso in dosimetria di fasci di radiazioni in modalità "flash-therapy", dove vengono erogate dosi > 10 Gy con un rateo di dose > 40 Gy/s.

4. Modellistica dei rivelatori di radiazione basati sulla fotoluminescenza da centri di colore nel LiF per la diagnostica energetica di fasci di protoni

L'utilizzo di cristalli e film sottili di LiF come rivelatori di radiazione per caratterizzare lo spettro energetico dei fasci di protoni comporta l'analisi delle immagini di fotoluminescenza prodotte dall'emissione luminosa di centri di colore nel materiale e visualizzate in un microscopio ottico a fluorescenza. Questi centri di colore sono un prodotto dell'interazione del materiale con il fascio di protoni, che nelle nostre caratterizzazioni incide ad angolo radente sul rivelatore. Si può assumere che la loro densità sia, punto per punto, linearmente dipendente dalla dose assorbita per valori di quest'ultima inferiori a circa 10^4 – 10^5 Gy. L'analisi delle immagini di fotoluminescenza consiste, essenzialmente, nell'estrarre da ognuna di esse una sezione longitudinale lungo la direzione di propagazione del fascio, tale da rappresentare una replica della curva di Bragg dei protoni nel materiale. Il confronto dell'intensità luminosa di tale curva con simulazioni Monte Carlo (con il software FLUKA [8-11]) di deposizione di energia nel materiale e/o il suo fit mediante un modello analitico di curva di Bragg nel LiF permette di valutare lo spettro energetico dei protoni che la hanno prodotta.

4.1 AGGIORNAMENTI AL MODELLO ANALITICO PER LA CURVA DI BRAGG IN CRISTALLI DI LiF

L'approccio mediante confronto con simulazioni Monte Carlo è collaudato e molto affidabile; tuttavia, esso richiede che lo spettro energetico del fascio di protoni, tipicamente da noi rappresentato con una combinazione lineare di gaussiane, sia immesso in input dall'utente. In assenza di indizi in base ai quali elaborare una prima ragionevole ipotesi di distribuzione energetica, questo metodo implica che la ricerca dello spettro proceda attraverso un approccio iterativo guidato dalla forma della curva di Bragg misurata, dal suo confronto con la simulazione e, ultimo ma non ultimo, dall'esperienza dell'utente.

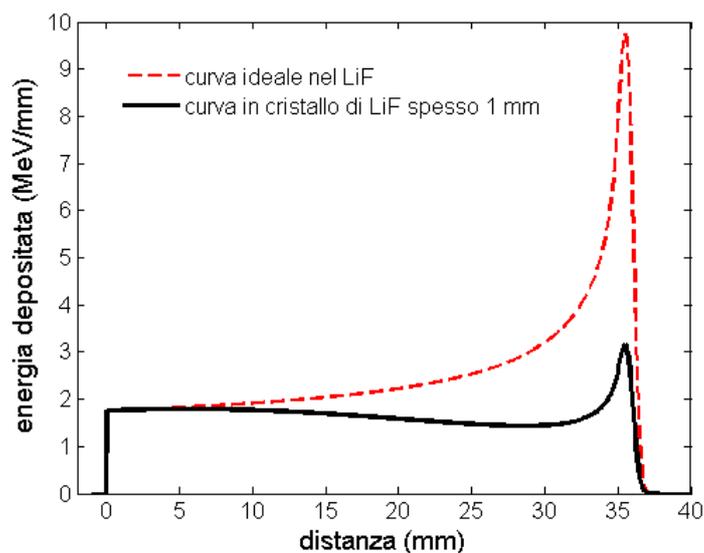
Un metodo alternativo più diretto, anche se applicabile solo al caso dei cristalli e non a quello dei film sottili, consiste nell'eseguire il fit della curva di Bragg sperimentale mediante un modello analitico. A tale approccio, già ampiamente utilizzato con successo in precedenza, sono stati ultimamente applicati dei miglioramenti adatti a fronteggiare situazioni particolari:

- è stata inclusa nel calcolo analitico della curva di Bragg la possibile fuoriuscita di protoni attraverso le facce del cristallo di LiF, con conseguente diminuzione dell'energia da essi

depositata nel rivelatore, causata da scattering multiplo di Coulomb. Figura 4.1 mostra un esempio di tale calcolo eseguito in Matlab per un cristallo di LiF, spesso 1 mm, irraggiato a incidenza radente da un fascio di protoni di energia 100 MeV (linea continua nera) e il suo confronto con la corrispondente curva in un blocco dello stesso materiale (curva tratteggiata rossa);

- è stato sviluppato un algoritmo di fit che utilizza il calcolo analitico della curva di Bragg di cui sopra e che permette di considerare distribuzioni spettrali energetiche del fascio di protoni di forma qualsiasi e non limitata a combinazioni lineari di gaussiane.

Figura 4.1 – Curve di Bragg in un cristallo di LiF spesso 1 mm (linea continua nera) e in un blocco dello stesso materiale (linea tratteggiata rossa) prodotte dall’irraggiamento a incidenza radente con un fascio di protoni di energia 100 MeV. Simulazioni effettuate in Matlab col modello analitico per il calcolo delle curve di Bragg nel LiF aggiornato con gli effetti dello scattering multiplo di Coulomb.



Queste due estensioni del modello analitico di curva di Bragg sono state oggetto di una comunicazione su invito a un recente congresso internazionale tenutosi in Giappone [12].

4.2 SIMULAZIONI MONTE CARLO DI DEPOSIZIONE DI ENERGIA IN FILM SOTTILI DI LiF

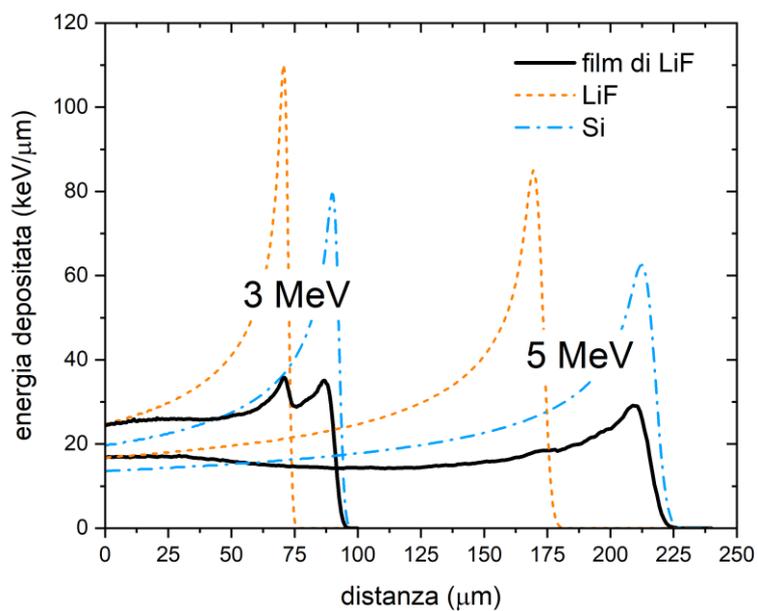
Come sopra accennato, il modello analitico per la curva di Bragg nel LiF non è adeguato a trattare il caso di un fascio di protoni incidente ad angolo radente su un film sottile. Il motivo principale è che la deposizione di energia in film sottili di LiF su substrati di vari materiali (tipicamente Si e SiO₂) è prodotta principalmente da protoni che, a causa dello scattering multiplo di Coulomb, si propagano soprattutto nel substrato prima di attraversare il film di LiF o terminare in esso la loro corsa. La

principale conseguenza di questo fatto è la formazione nel film di una curva di Bragg differente da quella che si otterrebbe nel materiale LiF se questo non fosse in forma di film sottile. Tuttavia, ciò è completamente vero per energie dei protoni sufficientemente alte, mentre al di sotto di una certa soglia di energia dei protoni si può ipotizzare che, grazie al conseguente valore limitato della distanza di propagazione, gli eventi di scattering nel film sottile e nel substrato non siano sufficienti a espellere dal film i protoni in esso entrati e a far migrare nel film i protoni entrati nel substrato.

Allo scopo di studiare non solo la soglia energetica al di sopra della quale lo scattering multiplo di Coulomb inizia ad apportare gli effetti sopra descritti, ma anche le modifiche alla curva di Bragg nel film indotte da leggeri disallineamenti del rivelatore rispetto alla radenza perfetta, sono state eseguite diverse simulazioni Monte Carlo di film sottili di LiF su substrato di Si irraggiati da un fascio di protoni ad angolo radente, riportate e discusse in una recente pubblicazione [13]. I risultati ivi presentati mostrano che la soglia energetica al di sopra della quale lo scattering multiplo di Coulomb inizia ad essere effettivo nella formazione della curva di Bragg nel film di LiF è identificabile con un intervallo di transizione tra 2 e 5 MeV circa. Inoltre, sopra tali valori di energia, la curva di Bragg che si forma nel film risulta essere distorta rispetto a quella classica, che è caratteristica di protoni monocromatici; ulteriori distorsioni vengono provocate anche da leggeri disallineamenti, anche dell'ordine della frazione di grado, del rivelatore rispetto alla radenza perfetta. Il confronto con evidenze sperimentali di simulazioni Monte Carlo eseguite per film sottili di LiF su substrati di Si e SiO₂ a energie più alte del fascio di protoni (circa 35 MeV) confermano le precedenti conclusioni.

La Figura 4.2 mostra, a titolo di esempio, le curve di Bragg simulate in un film di LiF, spesso 1 μm e depositato su un substrato di Si spesso 0.5 mm, relative all'irraggiamento a incidenza radente con fasci monocromatici di protoni rispettivamente di energie 3 e 5 MeV. Si nota che mentre a 3 MeV sono presenti due picchi a profondità corrispondenti ai picchi delle curve ideali nei materiali LiF e Si (non in forma di film), a 5 MeV sopravvive solo il picco corrispondente a quello nel Si, segno che l'effetto dello scattering multiplo di Coulomb sopra discusso determina in modo praticamente completo la formazione della curva di Bragg nel film. Anche se non riportiamo le curve in figura, a energie inferiori a 3 MeV le curve di Bragg nel film presentano un picco principale in corrispondenza di quello della curva ideale nel LiF, essendo trascurabile a queste energie il ruolo dello scattering multiplo di Coulomb.

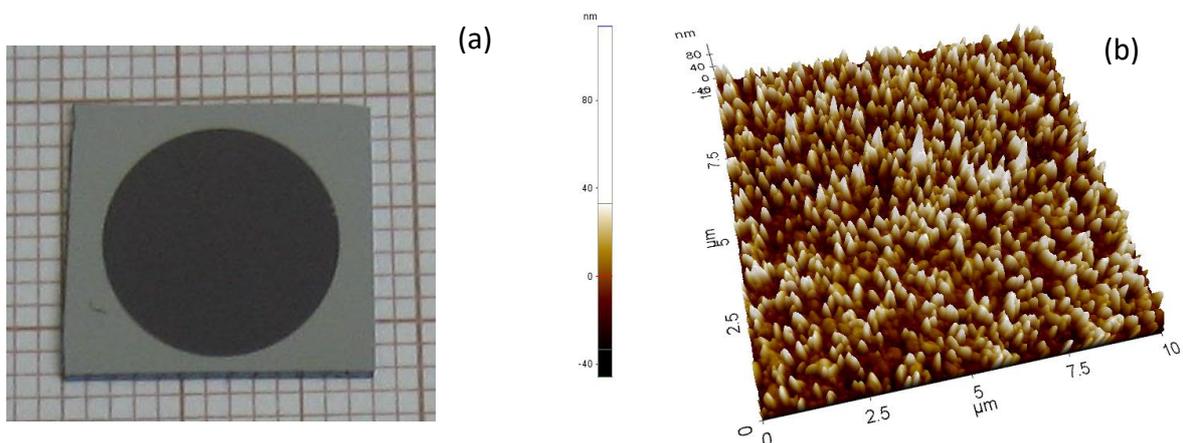
Figura 4.2 – Curve di Bragg in un film di LiF, spesso 1 μm e depositato su un substrato di Si spesso 0.5 mm, prodotte da fasci di protoni monocromatici e loro confronto con le corrispondenti curve ideali nei due materiali. Simulazioni Monte Carlo effettuate con FLUKA.



5. Realizzazione e caratterizzazione di rivelatori di radiazione innovativi a film sottile di LiF per dosimetria clinica

Nell'ambito del WP3 sono stati sviluppati e testati, mediante l'irraggiamento con fasci di raggi X e protoni, rivelatori di radiazione a film sottile di LiF di sensibilità aumentata per dosimetria clinica. Questi rivelatori, basati sulla lettura ottica della fotoluminescenza dei centri di colore aggregati F_2 ed F_3^+ indotti dall'irraggiamento, sono stati cresciuti per evaporazione termica, in condizioni sperimentali controllate, su differenti substrati (vetro, Suprasil®, Si(100), VM2000, film di alluminio depositati per evaporazione termica su vetro e silicio) presso il laboratorio Stato Solido: evaporazione di film per fotonica di FSN-TECFIS-MNF in ENEA C.R. Frascati. Figura 5.1 mostra la fotografia di un rivelatore di radiazione a film di LiF di spessore 1 μm depositato per evaporazione termica su Si(100) (a) e l'immagine 3D di un'area $(10 \times 10) \mu\text{m}^2$ acquisita con un microscopio a forza atomica (b).

Figura 5.1 – (a) Fotografia di un rivelatore a film di LiF di spessore 1 μm depositato per evaporazione termica su Si(100) e (b) immagine 3D di un'area $(10 \times 10) \mu\text{m}^2$ acquisita con un microscopio a forza atomica.



Questi rivelatori sono caratterizzati da una risposta di fotoluminescenza lineare con la dose negli intervalli di dose investigati, da un ampio campo di vista, un elevato range dinamico ed un'altissima risoluzione spaziale, che in linea di principio è determinata dalle dimensioni dei difetti elettronici (scala atomica) indotti dall'irraggiamento, che sono "i pixel" dei rivelatori a film di LiF, ma che in

pratica è limitata dalle caratteristiche dei microscopi ottici e dalle tecniche utilizzate per la lettura ottica della radiofotoluminescenza (RFL).

I rivelatori basati su film di LiF sono facili da maneggiare, insensibili alle condizioni ambientali e non richiedono trattamenti chimici post-irraggiamento. Sono inoltre caratterizzati da un'elevata versatilità, in quanto possono essere definiti geometria, dimensioni e spessore del rivelatore a seconda dello specifico esperimento da realizzare, in quanto la tecnica di crescita per deposizione fisica da fase vapore, in particolare l'evaporazione termica, è relativamente semplice e scalabile.

5.1 RISPOSTA DI FOTOLUMINESCENZA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X MONOCROMATICI

Rivelatori a film di LiF di tre spessori nominali, 0.5, 1.1 e 1.8 μm , depositati su di vetro e Si(100) sono stati irraggiati con raggi X di energia 5, 7, 9 e 12 keV a differenti dosi nell'intervallo fra 2 e 7×10^3 Gy presso la beamline METROLOGIE del sincrotrone SOLEIL (Parigi, Francia). L'irraggiamento con raggi X di energia 5 e 9 keV è stato effettuato a due sole dosi, mentre l'irraggiamento a 7 e 12 keV è stato effettuato con 5 dosi. Figura 5.2 mostra le immagini in fluorescenza dei 5 spot immagazzinati nei rivelatori a film di LiF di spessore 1.8 μm cresciuti su vetro (a) e Si(100) (b) ed irraggiati con raggi X di energia 7 keV, acquisite col microscopio Nikon Eclipse 80i equipaggiato con una lampada al mercurio (100 W) opportunamente filtrata nell'intervallo spettrale del blu, come sorgente di eccitazione, e una camera sCMOS per l'acquisizione dell'intensità luminosa (obiettivo 2 \times , tempo di esposizione 2 s, binning 2 \times 2, dinamica sCMOS 16 bit). Nelle immagini, i rettangoli bianchi tratteggiati evidenziano gli spot irraggiati alle dosi più basse che non sono visibili ad occhio nudo. A partire dalla elaborazione delle immagini in fluorescenza, è stata ottenuta la risposta di radiofotoluminescenza dei rivelatori, riportata in Figura 5.3 per i film di LiF di spessore crescente depositati su vetro (a) e su Si(100) (b) ed irraggiati con raggi X di energia 7 keV, insieme al best fit lineare degli andamenti. In entrambi i casi la risposta in radiofotoluminescenza dei rivelatori di LiF mostra un andamento lineare con la dose, nell'intervallo di dose investigato, che dipende dallo spessore dei film e dalla natura del substrato. A parità di dose, l'intensità di fotoluminescenza dei rivelatori a film di LiF cresciuti su silicio è maggiore rispetto a quella dei film cresciuti su vetro nello stesso run di deposizione, in virtù della maggiore riflettività del silicio nell'intervallo spettrale del visibile, caratteristico delle emissioni dei centri di colore F_2 ed F_3^+ e della luce di eccitazione utilizzata per la lettura ottica dei rivelatori. L'amplificazione è dipendente dall'energia dei raggi X e dallo

spessore dei film di LiF e va da un minimo del 50% per l'energia di 7 keV fino a circa il 400% per l'energia di 9 keV.

La dose minima rivelabile, nell'intervallo di dose investigato, è stata valutata essere pari a circa 10 Gy, risultato molto promettente nell'ambito della ricerca e sviluppo di rivelatori a film sottile di LiF per dosimetria, previsti dal WP3-A3.1 [14,15].

Figura 5.2 - Immagini in fluorescenza, acquisite col microscopio ottico convenzionale, dei 5 spot immagazzinati nei film di LiF di spessore 1.8 μm cresciuti su vetro (a) e su Si(100) (b) ed irraggiati con raggi X di energia 7 keV (dimensioni dell'immagine: $(1.67 \times 1.41) \text{ cm}^2$). I rettangoli bianchi evidenziano gli spot irraggiati alle dosi più basse che non sono visibili ad occhio nudo.

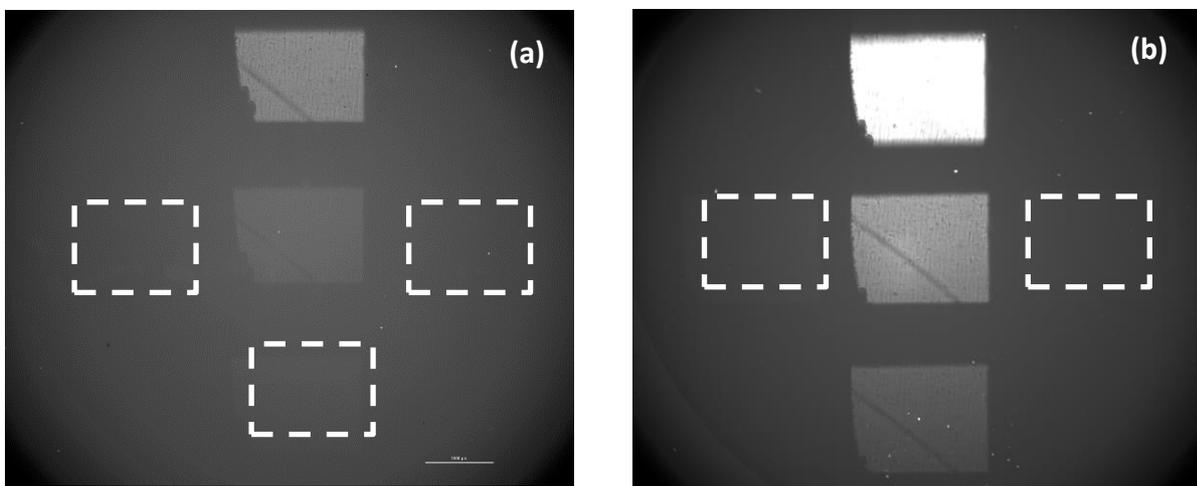
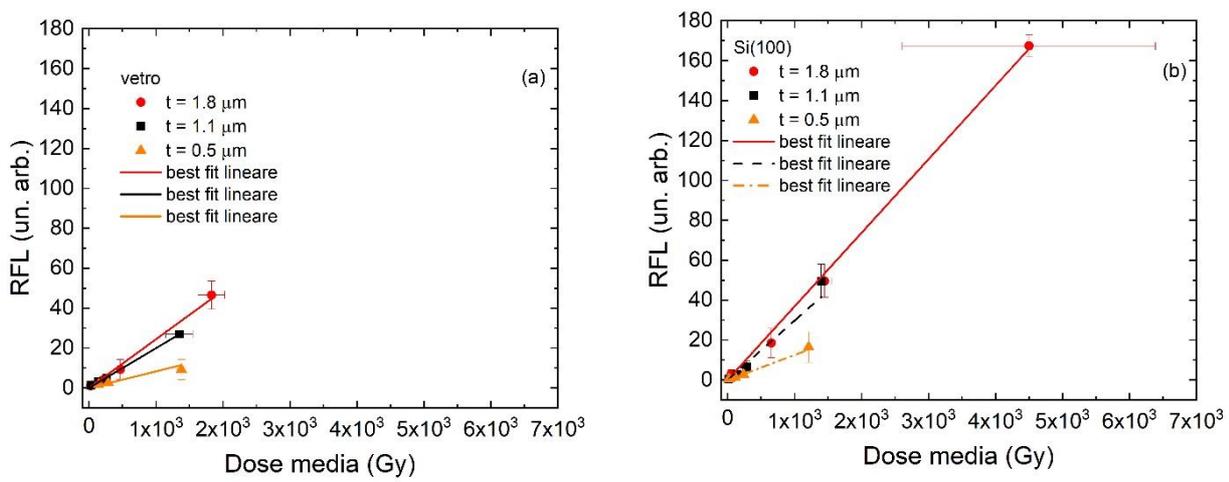


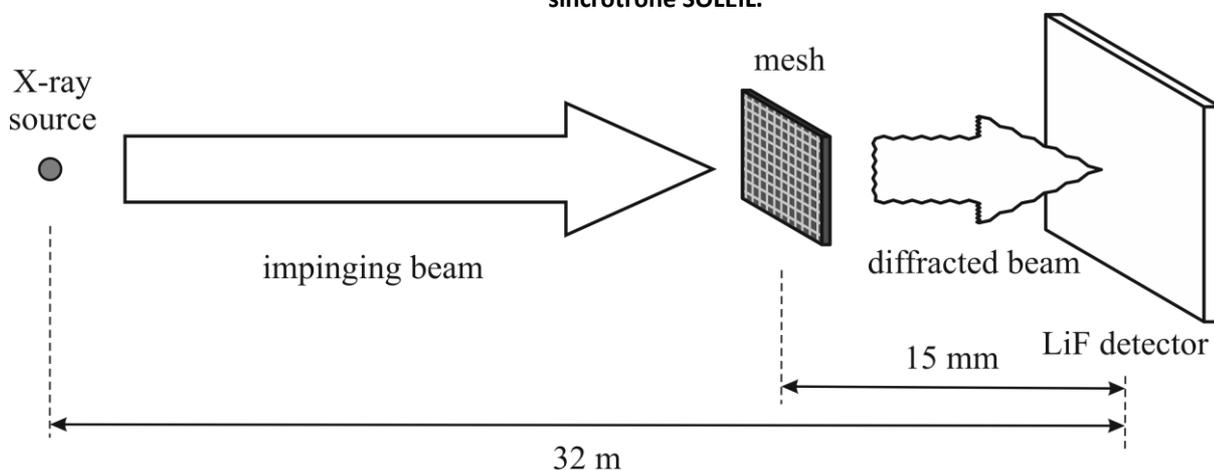
Figura 5.3 – Risposta in radiofotoluminescenza dei rivelatori a film di LiF di diverso spessore cresciuti su vetro (a) e su Si(100) (b), irraggiati con raggi X di energia 7 keV.



5.2 RISOLUZIONE SPAZIALE DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X MONOCROMATICI

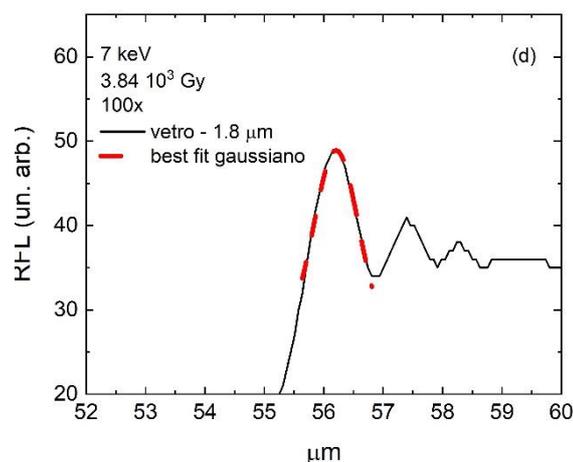
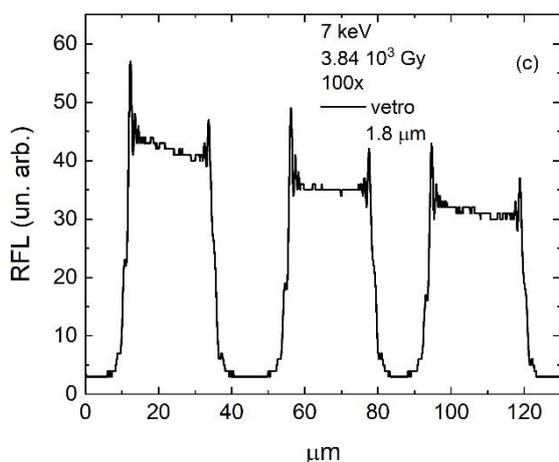
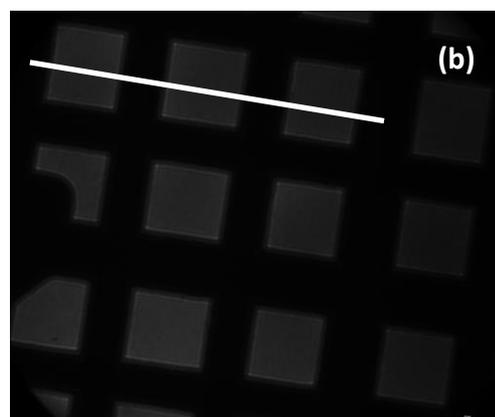
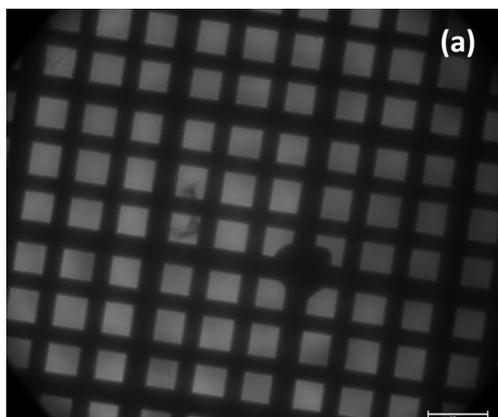
Per valutare la risoluzione spaziale dei rivelatori a film di LiF cresciuti su vetro e su Si(100), presso la beamline METROLOGIE del sincrotrone SOLEIL sono stati effettuati esperimenti di imaging interponendo fra la sorgente dei raggi X e i rivelatori di LiF una mesh di oro ad una distanza di 15 mm da quest'ultimi, secondo lo schema di irraggiamento riportato in Figura 5.4. Gli irraggiamenti sono stati effettuati con raggi X monocromatici di energia 7 e 12 keV ad una dose di circa 3.5×10^3 Gy.

Figura 5.4 - schema del set-up sperimentale degli esperimenti di imaging X presso la beamline METROLOGIE del sincrotrone SOLEIL.



Le Figure 5.5 (a) e (b) mostrano l'immagine in fluorescenza della mesh d'oro immagazzinata nel rivelatore a film di LiF di spessore nominale $1.8 \mu\text{m}$ depositato su substrato di vetro, irraggiato con fasci X monocromatici di energia 7 keV ad una dose di 3.84×10^3 Gy. Le immagini sono state acquisite col microscopio ottico a fluorescenza Nikon Eclipse 80i utilizzando obiettivi con ingrandimento $40\times$ e $100\times$, rispettivamente. Figura 5.5 (c) riporta il profilo di intensità di fotoluminescenza lungo la linea bianca indicata in Fig. 5.5 (b). La risoluzione spaziale del rivelatore a film di LiF è stata stimata considerando la zona "edge-enhancement" del profilo di intensità di fotoluminescenza dello spot luminoso centrale di Fig. 5.5 (c). In Figura 5.5 (d) è riportata la porzione sinistra di questo spot luminoso (da 52 a $60 \mu\text{m}$) insieme col best fit gaussiano (curva rossa tratteggiata) del picco più alto del pattern di diffrazione. La risoluzione spaziale del rivelatore, definita dalla larghezza a metà altezza della curva gaussiana, è pari a $(0.44 \pm 0.04) \mu\text{m}$, confrontabile con quella minima prevista teoricamente per il microscopio ottico utilizzato per l'acquisizione delle immagini [14,15].

Figura 5.5 - Immagine in fluorescenza della mesh d'oro immagazzinata nel rivelatore a film di LiF di spessore nominale 1.8 μm depositato su substrato di vetro, irraggiato con fasci X monocromatici di energia 7 keV ad una dose di 3.84×10^3 Gy, acquisita col microscopio ottico convenzionale con ingrandimento dell'obiettivo 40 \times (barra di misura = 50 μm) (a) e 100 \times (barra di misura = 20 μm) (b); (c) profilo di intensità di fotoluminescenza acquisito lungo la linea bianca indicata in Fig. 5.5 (b); (d) dettaglio del profilo di intensità (c) relativo al secondo spot luminoso, insieme al best-fit con una funzione gaussiana (curva rossa tratteggiata) del picco di intensità di fotoluminescenza più elevata del pattern di diffrazione.



5.3 RISPOSTA DI FOTOLUMINESCENZA DEI RIVELATORI DI RADIAZIONE BASATI SU FILM DI LiF IRRAGGIATI CON RAGGI X DURI PRODOTTI DALLA SORGENTE TECHEA-WP2

Rivelatori a film di LiF di spessore nominale compreso fra 1 e 2 μm sono stati cresciuti per evaporazione termica su differenti substrati (vetro, Suprasil®, Si(100), VM2000) e caratterizzati mediante profilometria a contatto, microscopia a forza atomica (AFM), diffrazione a raggi X e spettrofotometria (Appendice 5.1).

I rivelatori a film di LiF depositati su Si(100) e VM2000 sono stati poi irraggiati a fine settembre 2023 con i raggi X prodotti dalla sorgente prototipale per radioterapia TECHEA-WP2, sviluppata nell'ambito del WP2 del progetto TecHea dal Laboratorio FSN-TECFIS-APAM. La sorgente, basata su un acceleratore lineare compatto di elettroni da 3 MeV, è in grado di generare raggi X di *Bremsstrahlung* per un efficace irraggiamento dei tumori al seno.

La Tabella 5.1 riporta le dosi di irraggiamento dei rivelatori a film di LiF.

Tabella 5.1 – Dosi di irraggiamento dei rivelatori di radiazione a film di LiF irraggiati con raggi X prodotti dalla sorgente prototipale TECHEA-WP2.

Rivelatore	Substrato	Temperatura substrato (°C)	Spessore nominale (µm)	Dose (Gy)
NLiF94 n°12	Si (100)	300	2	20
NLiF95 n°12	Si (100)	300	1.5	20
NLiF96 n°12	Si (100)	300	1	20
NLiF97 n°18	VM200	37	1.5	20
NLiF93 n°7	Si (100)	300	1	10
NLiF93 n°8	Si (100)	300	1	20
NLiF93 n°9	Si (100)	300	1	50
NLiF93 n°11	Si (100)	300	1	100

Gli spettri di radiofotoluminescenza, emessa dai centri di colore F_2 ed F_3^+ indotti dall'irraggiamento, sono stati misurati su banco ottico sotto eccitazione con luce laser di lunghezza d'onda 445 nm. I risultati preliminari, ottenuti dall'elaborazione degli spettri di fotoluminescenza, mostrano un andamento lineare dell'intensità netta di radiofotoluminescenza a 678 nm (intensità di fotoluminescenza a 678 nm a cui è stata sottratta l'intensità, considerata fondo, emessa alla stessa lunghezza d'onda da un campione gemello non irraggiato) in funzione della dose per i campioni depositati nello stesso run di deposizione (stesso spessore nominale) irraggiati a dosi crescenti nell'intervallo di dose compreso fra 10 e 100 Gy e una dose minima rivelabile pari a 10 Gy (Appendice 5.1).

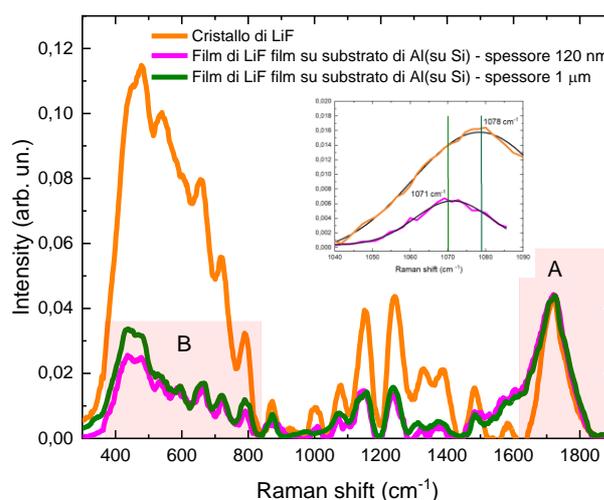
È stato inoltre ottenuto un andamento lineare dell'intensità netta di radiofotoluminescenza in funzione dello spessore dei film di LiF per i campioni di spessore crescente irraggiati con raggi X alla dose di 20 Gy (Appendice 5.1).

6. Caratterizzazione mediante micro-spettroscopia Raman/luminescenza a scansione di superficie di film di LiF irraggiati con raggi X molli

I campioni analizzati sono film di LiF di spessori nominali di 1 μm e 120 nm cresciuti su substrati di vetro, Si(100), alluminio (film di spessore circa 200 nm depositato su silicio) mediante evaporazione termica presso il Laboratorio FSN-TECFIS-MNF. I film di LiF sono stati irraggiati con un singolo impulso di raggi X molli prodotti da una sorgente laser plasma (Laser Nd:YAG/glass, 1064 nm, impulsi di 15 ns) con target di rame presso l'Università degli Studi di Roma Tor Vergata (Dip. Ingegneria Industriale). I film di spessore nominale 1 μm sono stati irraggiati in camera da vuoto con una fluensa di circa 20 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, mentre quelli di spessore nominale di 120 nm con una fluensa di circa 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Rispetto a questi ultimi film, un cristallo di LiF commerciale (5x5x0.5) mm^3 è stato irraggiato per confronto con una fluensa di circa 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Il ruolo della struttura del film policristallino nell'efficienza di formazione del centro di colore è un aspetto fondamentale da studiare per lo sviluppo di rivelatori di radiazione luminescenti basati su film di LiF ad elevata sensibilità. A tale scopo, è stata effettuata una analisi dei film di LiF irraggiati mediante la spettroscopia Raman (effettuata con micro-spettrometro confocale Raman Horiba XploRA Plus presso il Laboratorio FSN-TECFIS-MNF). Data l'alta simmetria della struttura cubica (fcc, face centered cubic) del LiF, tutti i modi sono Raman inattivi al primo ordine, ma sono permesse le combinazioni ed ordini superiori dei modi. L'introduzione di un difetto elettronico come il centro di colore, distrugge la simmetria traslazionale del reticolo, permettendo l'osservazione dello spettro Raman anche al primo ordine. Pertanto la spettroscopia Raman permette di ottenere informazioni sull'interazione del centro di colore con le vibrazioni reticolari. La Figura 6.1 a) confronta lo spettro Raman acquisito in un punto del cristallo di LiF irraggiato con quelli acquisiti su film di LiF irraggiati (su substrato di film di Al su Si) di due spessori nominali diversi (120 nm e 1 μm). Gli spettri Raman sono stati acquisiti eccitando con un laser alla lunghezza d'onda di emissione di 638 nm (lontano dalla banda di assorbimento dei centri di colore F_2 ed F_3^+ , evitando quindi emissione di luminescenza da parte di questi centri). Gli spettri Raman, sia del cristallo che dei film di LiF, mostrano l'aspetto così detto "bunched" tipico degli alogenuri alcalini, legato al loro elevato numero di modi vibrazionali ammessi. Si osserva l'allargamento di spettro dei film di LiF rispetto al cristallo (vedi la zona A evidenziata sul grafico) dovuto al loro più alto grado di disordine strutturale. D'altro canto, si osserva anche un allargamento di spettro Raman del film di LiF di spessore 120 nm rispetto a quello di 1 μm dovuto alla loro diversa

struttura microscopica (vedi, per esempio, la zona B evidenziata sul grafico), associabile ad un più alto grado di disordine strutturale del film più sottile. Inoltre si osserva uno shift del picco dello spettro Raman dei film rispetto a quello del cristallo (vedi grafico nell'inset) verso più alti numeri d'onda, legato ad una possibile compressione reticolare che avviene durante la crescita del film.

Figura 6.1 – Spettri Raman acquisiti in un punto del cristallo e in un punto dei film di LiF cresciuti su substrato di alluminio (spessori nominali 120 nm e 1 μm) irraggiati con raggi X molli.



La combinazione di queste tecniche micro-spettroscopiche costituisce un metodo efficace e significativo per studiare il ruolo della struttura policristallina dei film di LiF nell'efficienza di formazione dei centri di colore a livello microscopico, aspetto fondamentale per lo sviluppo di film di LiF come rivelatori di immagine a raggi X basati sulla lettura della fotoluminescenza.

In Appendice 6.1 sono riportate le analisi di film LiF contenenti micro-radiografie X di una griglia metallica e di un'ala di libellula dimostrando come la microscopia in fluorescenza accoppiata alla micro-spettroscopia Raman rappresenti uno strumento molto avanzato per caratterizzare i film di LiF luminescenti, utilizzati come rivelatori X di immagine.

7. Prodotti di Ricerca

Publicazioni su rivista con referee

F. Pollastrone, M. Piccinini, R. Pizzoferrato, A. Palucci, R.M. Montereali, *Fully-digital low-frequency lock-in amplifier for photoluminescence measurements*, Analog Integr Circ Sig Process (2023). <https://doi.org/10.1007/s10470-022-02125-9> (open access)

R.M. Montereali, E. Nichelatti, V. Nigro, L. Picardi, M. Piccinini, A. Ampollini, S. Libera, C. Ronsivalle, and M.A. Vincenti, *Proton Bragg peak imaging by colour centre radiophotoluminescence in lithium fluoride thin film radiation detectors on silicon*, J. Mater. Science: Materials in Electronics 34, 377 (2023) 10.1007/s10854-022-09770-w, I.F. 2.78 (open access)

M. Piccinini, E. Nichelatti, M. A. Vincenti, V. Nigro, C. Ronsivalle, A. Ampollini, P. Nenzi, G. Bazzano, E. Trinca, R. M. Montereali, *Dynamic range and dose linearity of the radiophotoluminescence intensity in lithium fluoride crystals irradiated with 2.3 and 26 MeV protons*, J. Lumin. 259 (2023) 119833 <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.119833>, I.F. 4.17

M.A. Vincenti, R.M. Montereali, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, M. Koenig, P. Mabey, G. Rigon, H.J. Dabrowski, Y. Benkadoum, P. Mercere, P. Da Silva, T. Pikuz, N. Ozaki, S. Makarov, S. Pikuz and B. Albertazzi, *Optical characterization of lithium fluoride thin-film imaging detectors for monochromatic hard X-rays*, JINST 18 (2023) C04012

Rosa Maria Montereali, Valentina Nigro, Massimo Piccinini, Maria Aurora Vincenti, Alessandro Ampollini, Paolo Nenzi, Concetta Ronsivalle and Enrico Nichelatti, *Bragg curve detection of low-energy protons by radiophotoluminescence imaging in lithium fluoride thin films*, Sensors 23 (2023) 4779, I.F. 3.847 (open access)

M. Zaltieri, D. Lo Presti, M. Bravi, M.A. Caponero, S. Sterzi, E. Schena, C. Massaroni, *Assessment of a Multi-Sensor FBG-Based Wearable System in Sitting Postures Recognition and Respiratory Rate Evaluation of Office Workers*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 70 (5) (2023) 1673 – 1682. DOI: 10.1109/TBME.2022.3225065

F. De Tommasi, D. Lo Presti, M.A. Caponero, M. Carassiti, E. Schena, C. Massaroni, *Smart Mattress Based on Multipoint Fiber Bragg Gratings for Respiratory Rate Monitoring*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 72 (2023) 4000710. DOI: 10.1109/TIM.2022.3232615

M. A. Vincenti, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, B. Albertazzi, Y. Benkadoum, H. Dabrowski, M. Koenig, G. Rigon, P. Mabey, P. Mercere, P. Da Silva, T. Pikuz, N. Ozaki, E. Filippov, S. Makarov, S. Pikuz, and R. M. Montereali, *Visible radiophotoluminescence of color centers in lithium fluoride thin films for high spatial resolution imaging detectors for hard X-rays*, ECS Journal of Solid State Science and Technology 12 (2023) 066008 DOI: 10.1149/2162-8777/acdd9b, IF 2.483

De Tommasi F., Massaroni C., Caponero M.A., Schena E., Lo Presti D., Carassiti M., *Wearable 3D-Printed Thumb-Shaped Device Based on Fiber Bragg Grating Sensor for Epidural Space Detection* IEEE Sensors Journal, 23 (15), 16907 – 16914 (2023). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3286284. IF 4.3

De Tommasi F., Massaroni C., Caponero M.A., Carassiti M., Schena E., Lo Presti D., *FBG-Based Mattress for Heart Rate Monitoring in Different Breathing Conditions*, IEEE Sensors Journal, 23 (13), 14114 – 14122 (2023). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3275323. IF 4.3

Lo Presti D., Pizza F., Leitao C., Massaroni C., Caponero M.A., Antunes P., Schena E., *Design, fabrication and metrological characterization of a 3D-printed strain sensor based on fiber Bragg*

grating technology, 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd4.0 and IoT 2023 - Proceedings, pp. 332 – 337. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT57462.2023.10180021.

De Tommasi F., Lo Presti D., Caponero M.A., Carassiti M., Schena E., Massaroni C., *FBG-Based Mattress for Continuous Respiratory Rate Estimation: Influence of Positioning Over and Under the Bed*, 2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2023 - Conference Proceedings. DOI: 10.1109/MeMeA57477.2023.10171865

Lo Presti D., Massaroni C., Bianchi D., Caponero M., Gizzi A., Schena E., *Development of a flexible sensor based on fiber Bragg grating technology for simultaneous respiratory and heartbeat measurements*, 2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2023 - Conference Proceedings. DOI: 10.1109/MeMeA57477.2023.10171903

Partecipazioni a Conferenze

M. Piccinini, E. Nichelatti, V. Nigro, M.A. Vincenti, C. Ronsivalle, A. Ampollini, E. Trinca, P. Nenzi, G. Bazzano, R.M. Montereali, *Photoluminescent lithium fluoride proton detectors for clinical dosimetry*, Biophysics@Rome Conference 2023, 19-20 April 2023, Roma, Italia. POSTER

E. Nichelatti, M.D. Astorino, F. Borgognoni, C. Ronsivalle, *An iterative algorithm to estimate the energy spectrum of an electron beam from PDD curves*, IPAC '23, 14th International Particle Accelerator Conference, Venice (Italy), 7-12 May 2023. POSTER

G. Bazzano, A. Ampollini, M.D. Astorino, F. Borgognoni, F. Fortini, P. Nenzi, L. Picardi, C. Ronsivalle, E. Trinca, V. Surrenti, M. Vadrucci, E. Nichelatti, *Electron beam qualification at ENEA Frascati Particle Accelerators laboratory*, IPAC '23, 14th International Particle Accelerator Conference, Venice (Italy), 7-12 May 2023. POSTER

R.M. Montereali, V. Nigro, M. Piccinini, M.A. Vincenti, P. Nenzi, C. Ronsivalle, E. Nichelatti, *Proton Bragg Curve Imaging By Color Center Photoluminescence In Radiation Detectors Based On Lithium Fluoride Films*, SiO₂ – 2023, 14th International Conference on SiO₂, advanced dielectrics and related devices, Palermo (Italy), 12-14 June, 2023. ORAL

M.A. Vincenti, R.M. Montereali, F. Bonfigli, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, M. Koenig, P. Mabey, G. Rigon, H.J. Dabrowski, Y. Benkadoum, P. Mercere, P. Da Silva, T. Pikuz, N. Ozaki, S. Makarov, S. Pikuz, B. Albertazzi, *Advanced Spectroscopic Investigation of Colour Centres in LiF Crystals Irradiated with Monochromatic Hard X-rays*, SiO₂ – 2023, 14th International Conference on SiO₂, advanced dielectrics and related devices, Palermo (Italy), 12-14 June 2023. POSTER

M. Piccinini, A. Mirandola, V. Nigro, M.A. Vincenti, M. Ciocca, R.M. Montereali, *Radiophotoluminescence response of LiF:Mg,Ti pellets irradiated with clinical proton beams in the 70-200 MeV energy range*, 20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD-20), Viareggio (Italy), 17-21 September 2023. ORAL

M. Piccinini, E. Nichelatti, V. Nigro, M.A. Vincenti, A. Ampollini, M.D. Astorino, G. Bazzano, P. Nenzi, E. Trinca, C. Ronsivalle, R.M. Montereali, *Imaging and characterization of low-energy protons spread-out Bragg peaks by photoluminescent color centers in LiF crystals*, 20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD-20), Viareggio (Italy), 17-21 September 2023. POSTER.

F. Bonfigli, S. Botti, M.A. Vincenti, R.M. Montereali, P. Gaudio, R. Rossi, Fluorescence and Raman micro-spectroscopy of LiF films containing radiation-induced defects for X-ray detection, High precision X-ray Measurements HPXM2023, LNF-INFN Frascati, Rome (Italy) 19-23 June 2023. ORAL

E. Nichelatti, M. Piccinini, P. Nenzi, L. Picardi, C. Ronsivalle, R.M. Montereali, “Energy diagnostics of proton beams by color center luminescence imaging in LiF crystals: empirical implementation of scattering-degraded fluence into an analytical energy-loss model,” REI-21 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators, Fukuoka (Japan), 3-8 September 2023. INVITED ORAL

M.A. Vincenti, R.M. Montereali, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, M. Koenig, P. Mabey, G. Rigon, B. Albertazzi, Y. Benkadoum, T. Pikuz, N. Ozaki, E.D. Filippov, S. Makarov, S. Pikuz, Photoluminescent colour centres in lithium fluoride film imaging detectors for monochromatic hard X-rays, 109° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Salerno, 11 - 15 settembre 2023, Atti del Congresso, ISBN: 978-88-7438-134-0, p.195-196.

Lo Presti D., Pizza F., Leita C., Massaroni C., Caponero M.A., Antunes P., Schena E., Design, fabrication and metrological characterization of a 3D-printed strain sensor based on fiber Bragg grating technology, IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd4.0 and IoT 2023, Brescia, 6 – 8 Giugno 2023.

De Tommasi F., Lo Presti D., Caponero M.A., Carassiti M., Schena E., Massaroni C., FBG-Based Mattress for Continuous Respiratory Rate Estimation: Influence of Positioning Over and Under the Bed, 2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2023 – Jeju (Corea del Sud), 14 – 16 Giugno 2023.

Lo Presti D., Massaroni C., Bianchi D., Caponero M., Gizzi A., Schena E., Development of a flexible sensor based on fiber Bragg grating technology for simultaneous respiratory and heartbeat measurements, 2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2023 - Jeju (Corea del Sud), 14 – 16 Giugno 2023.

Rapporti Tecnici

A. Santoni, P. Reale, G. Terranova, I. Ferrari, Spettroscopia fotoelettronica a raggi x molli per la caratterizzazione di materiali: costruzione, montaggio e commissioning di un nuovo apparato per spettroscopia di fotoemissione, ENEA Technical Report RT-2023-11-ENEA

9. Referenze

- [1] Appendice 11, report del secondo anno.
- [2] F. Pollastrone, M. Piccinini, R. Pizzoferrato, A. Palucci, R.M. Montereali, “Fully-digital low-frequency lock-in amplifier for photoluminescence measurements”, *Analog integrated circuits and signal processing* 115, 67-76 (2023), <https://doi.org/10.1007/s10470-022-02125-9>
- [3] Appendice 4.1, report del terzo anno
- [4] Appendice 2.1, report del quarto anno
- [5] M. Piccinini, E. Nichelatti, M.A. Vincenti, V. Nigro, C. Ronsivalle, A. Ampollini, P. Nenzi, G. Bazzano, E. Trinca, R.M. Montereali, “Dynamic range and dose linearity of the radiophotoluminescence intensity in lithium fluoride crystals irradiated with 2.3 and 26 MeV protons”, *Journal of Luminescence* 259, 119833 (2023).
- [6] M. Piccinini, E. Nichelatti, A. Ampollini, G. Bazzano, C. De Angelis, S. Della Monaca, P. Nenzi, L. Picardi, C. Ronsivalle, V. Surrenti, E. Trinca, M. Vadrucci, M.A. Vincenti, R.M. Montereali, "Dose response and Bragg curve reconstruction by radiophotoluminescence of color centers in lithium fluoride crystals irradiated with 35 MeV proton beams from 0.5 to 50 Gy", *Radiation Measurements* 133, 106275 (2020).
- [7] M. Piccinini, E. Nichelatti, M. Pimpinella, V. De Coste, R.M. Montereali, “Dose response of visible color center radiophotoluminescence in lithium fluoride crystals irradiated with a reference ^{60}Co beam in the 1-20 Gy dose range”, *Radiation Measurements* 151, 106705 (2022).
- [8] Sito web ufficiale di FLUKA: <https://fluka.cern>
- [9] G. Battistoni et al., *Ann. Nucl. Energy* 82 (2015) 10-18.
- [10] C. Ahdida et al., *Front. Phys.* 9 (2022) 788253.
- [11] V. Vlachoudis, *Proceedings of the International Conference on Mathematics, Computational Methods, and Reactor Physics (M&C2009)*, Saratoga Springs, New York, NY, USA, 3–7 May 2009.
- [12] E. Nichelatti et al., *Proceedings of the 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-21)*, Fukuoka, Japan, 3-8 September 2023.
- [13] R.M. Montereali et al., *Sensors* 23 (2023) 4779.
- [14] M.A. Vincenti, R.M. Montereali, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, M. Koenig, P. Mabey, G. Rigon, H.J. Dabrowski, Y. Benkadoum, P. Mercere, P. Da Silva, T. Pikuz, N. Ozaki, S. Makarov, S. Pikuz, B. Albertazzi, *Optical characterization of lithium fluoride thin-film imaging detectors for*

monochromatic hard X-rays, *J. Instrum.* 18 (2023) C04012. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/04/C04012>, I.F. 1.121 (open access).

[15] M. A. Vincenti, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, B. Albertazzi, Y. Benkadoum, H. Dabrowski, M. Koenig, G. Rigon, P. Mabey, P. Mercere, P. Da Silva, T. Pikuz, N. Ozaki, E. Filippov, S. Makarov, S. Pikuz, and R. M. Montereali, Visible radiophotoluminescence of color centers in lithium fluoride thin films for high spatial resolution imaging detectors for hard X-rays, *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 12 (2023) 066008 DOI: 10.1149/2162-8777/acdd9b, IF 2.483.

[16] Appendice 2.1, report del terzo anno.

[17] Appendice 3.1, report del terzo anno.