

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA  
prot. 2005029720

<b>Coordinatore Scientifico</b>	Eugenio FAZIO
<b>Ateneo</b>	Università degli Studi di ROMA "La Sapienza"
<b>Titolo della Ricerca</b>	Amplificatori e sorgenti laser integrati in guide solitoniche in Er:LiNbO <sub>3</sub>
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 158.000
<b>Durata</b>	24 Mesi

### Obiettivo della Ricerca

*Il progetto si propone di realizzare sorgenti laser a 1.55  $\mu$ m, integrate in guide d'onda monomodali a profilo solitonico, sepolte all'interno di monocristalli di niobato di litio drogato in volume con erbio mediante la tecnica Czochralski. Si realizzeranno sia sorgenti singole che matrici di laser nello stesso cristallo.*

*Il progetto intende anche scrivere guide solitoniche in fibre monocristalline di niobato di litio drogate con erbio cresciute mediante la tecnica del MicroPullingDown. Tali guide solitoniche funzionerebbero da core per le fibre, dentro i quali sia propagare la luce che osservare amplificazione ottica.*

*L'obbiettivo primario dell'intero progetto sarà raggiunto mediante fasi intermedie di avanzamento dei lavori, che possono essere così definite:*

- 1) Crescita di monocristalli di niobato di litio drogati in volume con erbio mediante la tecnica Czochralski. Una prima fase prevedrà la crescita di campioni monocristallini di niobato di litio con concentrazioni di erbio, distribuito in maniera omogenea nell'interno volume, variabili tra 0 e 1mol%. Tali campioni dovranno avere qualità ottica e cristallina comparabile con i cristalli commerciali dello stesso materiale non drogato. Obiettivo finale è di definire il protocollo di crescita realizzare substrati monocristallini dalle caratteristiche riproducibili. In una seconda fase, utilizzando il protocollo di crescita prima determinato, si cercherà di crescere cristalli con concentrazioni di erbio maggiori, tra 1 e 2mol% al fine di verificare le prestazioni del materiale oltre al limite di solubilità suggerito in letteratura.*
- 2) Poling a singolo dominio ferroelettrico dei cristalli cresciuti e taglio secondo orientazioni cristallografiche predeterminate.*
- 3) Completa caratterizzazione delle proprietà strutturali ottiche del materiale, con particolare attenzione al problema del trasferimento di carica tra gli ioni erbio ed il reticolo ospite e viceversa. Da questi studi ci si aspetta di poter sviluppare un modello analitico di simulazione del processo di interazione radiazione-materiale da utilizzarsi per le simulazioni numeriche sia di formazione del solitone che per l'analisi dell'effetto laser nelle strutture da realizzare.*
- 4) Realizzazione di solitoni spaziali in niobato di litio drogato erbio e caratterizzazione di utilizzo dei canali solitonici come guide d'onda monomodali. Grande attenzione sarà data alla caratterizzazione del modo di propagazione della luce entro le guide al variare della lunghezza d'onda di utilizzo. Questa misura permetterà di quantificare a priori la sovrapposizione modale che si avrà successivamente in fase di realizzazione del laser tra il modo del fascio di pompa ed il modo del fascio emesso dalla sorgente.*
- 5) crescita di fibre di niobato di litio drogato erbio mediante la tecnica MicroPullingDown con orientazione cristallografica e composizione chimica controllate su tutta la lunghezza.*
- 6) Poling a singolo dominio ferroelettrico di fibre monocristalline di niobato di litio.*
- 7) Realizzazione di solitoni spaziali nelle fibre di niobato di litio drogato erbio e loro impiego quali core per la propagazione della luce.*
- 8) Crescita e caratterizzazione di cristalli di niobato di litio con doppio drogaggio, di erbio e di altri elementi (Yb, Fe) sensibilizzanti per l'emissione luminosa e per eventualmente intensificare l'effetto fotorifrattivo del materiale. Alla fine di questa fase sarà scelta la o le specie co-droganti con prestazioni ottimali e contestualmente la concentrazione migliore per l'amplificazione e l'effetto laser. L'obiettivo è di definire la procedura ottimale di crescita per ottenere substrato monocristallino dalle prestazioni riproducibili.*
- 9) Progetto e realizzazione del risonatore laser con dimensionamento dei componenti utilizzati ed eventualmente del sistema di raffreddamento da utilizzare.*
- 10) caratterizzazione sia spettroscopica che in potenza dell'emissione spontanea amplificata (ASE) all'interno delle guide solitoniche fino eventualmente all'accensione della cavità laser realizzata.*
- 11) Caratterizzazione del fascio laser emesso e determinazione della stabilità nel tempo del laser realizzato. Saranno in questo caso effettuate tutte le procedure in grado di ottimizzare l'efficienza di emissione, la qualità del modo e la stabilità dell'intensità emessa. Per tale ottimizzazione saranno studiati sia la stabilità delle guide solitoniche nel tempo che eventuali tecniche di stabilizzazione o nuovi materiali per questo impiego (ad esempio utilizzando una maggiore percentuale di ferro nel drogaggio). Saranno inoltre studiate, per migliorare le caratteristiche del laser, eventuali diverse composizioni stechiometriche dell'erbio e dei materiali sensibilizzanti nel niobato di litio.*
- 12) realizzazione sullo stesso chip di matrici di laser funzionanti contemporaneamente.*

## **Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo**

Le sorgenti laser in niobato di litio drogato erbio sono state già realizzate in passato. Tuttavia il progetto introduce alcuni aspetti fondamentali rispetto alla tecnologia nota che lo rendono assolutamente unico:

1. carattere 3-dimensionale delle strutture guidanti realizzabili mediante la scrittura di solitoni spaziali;
2. bassissime perdite di propagazione della luce entro tali strutture;
3. drogaggio del materiale direttamente in fase di crescita mediante la tecnica Czochralski;
4. elevati livelli di drogaggio realizzabili;
5. realizzazione di fibre mono-cristalline in niobato di litio drogato erbio;
6. realizzazione di un "core" solitonico in tali fibre;
7. emissione laser in guide solitoniche perfettamente monomodali entro il volume di niobato di litio drogato erbio;
8. eventuale realizzazione di matrici di laser solitonici funzionanti contemporaneamente.

**1. CARATTERE 3-DIMENSIONALE DELLE STRUTTURE GUIDANTI REALIZZABILI MEDIANTE LA SCRITTURA DI SOLITONI SPAZIALI:** saranno realizzati per la prima volta solitoni spaziali in un materiale fotorifrattivo amplificatore. Tale misura, assolutamente nuova e mai realizzata prima, permetterà di scrivere guide solitoniche sfruttando le proprietà ferro-elettriche del niobato di litio. Poiché è possibile scrivere solitoni in un qualunque punto entro un cristallo di niobato di litio, tale tecnologia rappresenta un primo passo verso circuiti fotonici integrati completamente 3-dimensionali. Questo è un grosso passo in avanti rispetto alla tecnologia nota in quanto fino ad oggi sono realizzabili soltanto guide sulla superficie di substrati e non entro il loro volume.

**2. BASSE PERDITE DI PROPAGAZIONE DELLA LUCE ENTRO TALI STRUTTURE.** Poiché le guide solitoniche sono auto-scritte da fasci laser che si propagano senza diffrazione (solitoni), esse sono ottimizzate per la propagazione monomodale e quindi hanno bassissime perdite, fattore che le rende particolarmente interessanti per le applicazioni nella generazione ed amplificazione della luce laser, ove risulta critica la necessità di ridurre le perdite dei risonatori.

**3. DROGAGGIO DEL MATERIALE DIRETTAMENTE IN FASE DI CRESCITA MEDIANTE LA TECNICA CZOCHRALSKI.** La tecnica Czochralski permette di crescere cristalli direttamente drogati con concentrazioni omogenee distribuite sul volume del cristallo. Nonostante siano riportati in letteratura alcuni esempi di cristalli Er:LN cresciuti tramite la tecnica Czochralski, la caratterizzazione di suddetti sistemi è decisamente incompleta sia dal punto di vista delle proprietà investigate in quanto tali e in correlazione con il ruolo della concentrazione del drogante. L'attività proposta invece mira a caratterizzare completamente il substrato al variare del drogaggio, specialmente per quelle proprietà di interesse cruciale per la realizzazione di un laser ma il cui studio non risulta reperibile in letteratura, come ad esempio: determinazione dei coefficienti elettro-ottici, l'indice di rifrazione, parametri di cella, rapporto Li/Nb nel cristallo drogato, risposta fotorifrattiva in funzione della concentrazione del drogante e del tipo di drogante. Particolare attenzione sarà inoltre rivolta al ruolo del co-drogaggio con altri elementi, la cui investigazione non sono documentate in letteratura se non in modo approssimativo e limitate ad un livello di fattibilità. Tale studio sistematico in funzione del drogante e codrogante mira quindi a definire le condizioni composizionale ottimali per ottenere una risposta ottica (emissione laser) efficiente.

La tecnica inoltre si presta per definizione alla realizzazione di substrati che possono essere successivamente sottoposti a trattamenti di drogaggio locali (diffusione termica da film sottile depositato sulla superficie, scambio ionico, impianto ionico): tale approccio ha innumerevoli vantaggi tra i quali la possibilità di perlustrare drogaggi differenziati in regioni diverse del materiale.

**4. ELEVATI LIVELLI DI DROGAGGIO REALIZZABILI.** Mediante la tecnica Czochralski sono stati documentati il drogaggio di cristalli di niobato di litio congruente con concentrazioni nominali di Er non superiori a 1 mol.% non specificando tuttavia una stima della concentrazione di Er effettivamente attivo nel materiale se non suggerendo un limite attorno al 0.2mol% ( $1.7 \times 10^{20} \text{at/cm}^3$ ). L'attività di ricerca mira a perlustrare la possibilità aumentare tale limite a 0.5mol% effettuando post trattamenti alla crescita che diminuiscano la concentrazione di centri non radiativi.

**5. REALIZZAZIONE DI FIBRE MONO-CRISTALLINE IN NIOBATO DI LITIO DROGATO ERBIO.** Mediante la tecnica del micro-pulling down è possibile crescere monocristalli di Niobato di Litio in forma di fibre o bacchette. La tecnica è derivata dal metodo Czochralski con cui ha in comune le caratteristiche principali: possibilità di realizzazione di cristalli di elevata purezza, drogaggio in volume dei campioni direttamente durante la fase di crescita con una alta omogeneità ed elevato tasso di drogaggio raggiungibile. I vantaggi maggiori del metodo MicroPullingDown consistono principalmente nel minore costo di esercizio, maggiore velocità di crescita e campioni cresciuti direttamente nella forma e dimensioni adatte per le applicazioni di interesse.

**6. REALIZZAZIONE DI UN "CORE" SOLITONICO IN TALI GUIDE.** Per la prima volta si studierà la possibilità di ottenere fasci solitonici entro fibre monocristalline. È questo un obiettivo molto ambizioso che, se realizzato, aprirà una nuova strada di applicazione di tali fibre alle quali sarà scritto un "core" monomodale mediante la realizzazione di solitoni e guide solitoniche.

**7. EMISSIONE LASER IN GUIDE SOLITONICHE PERFETTAMENTE MONOMODALI ENTRO IL VOLUME DI NIOBATO DI LITIO DROGATO ERBIO.** Il basso livello di perdite delle guide solitoniche insieme con l'elevato drogaggio dovrebbe permettere una sensibile diminuzione della soglia di pompaggio per emissione laser in guide con drogaggio erbio dal valore attualmente riportato in letteratura di qualche decina di milliwatt di potenza luminosa necessaria. La diminuzione della potenza di soglia e quindi una migliore efficienza quantica di pompaggio sarà importantissima per le future applicazioni come matrici di laser e display attivi.

**8. EVENTUALE REALIZZAZIONE DI MATRICI DI LASER SOLITONICI FUNZIONANTI CONTEMPORANEAMENTE.** Questo aspetto del lavoro è di grande interesse in quanto ad oggi sono state realizzate matrici di sorgenti laser solo utilizzando la tecnica dei diodi emettitori a cavità verticali. Mediante la scrittura solitonica dovrebbe essere possibile realizzare a basso costo ed a bassa tecnologia associata (quindi con buona riproducibilità) matrici di laser. Questo è un aspetto strategicamente importante in genere per l'economia italiana in quanto potrebbe essere aprire nuovi sviluppi industriali a relativamente basso costo e a medio termine di realizzazione. Tale punto tuttavia potrebbe non essere studiato a causa dei tagli effettuati al budget del progetto.

## **Criteri di verificabilità**

La verifica sull'attività di ricerca condotta dalle varie unità sarà effettuata attraverso:

&#61485; Verifiche periodiche dello stato di avanzamento della ricerca attraverso riunioni dei partners nelle quali si effettuino un'analisi e discussione a consuntivo delle attività svolte e una programmazione delle attività da svolgere nel successivo periodo in base ai riscontri sperimentali.

&#61485; Verifiche periodiche attraverso scrittura di report scientifici da disporre on-line in un'area riservata. Saranno previste riunioni in teleconferenza qualora necessario.

&#61485; Presentazione dei risultati dell'attività scientifica svolta attraverso la partecipazione a workshop, congressi e simposi di carattere nazionale e internazionale.

&#61485; Sottomissione di articoli in riviste internazionali di impatto nella comunità scientifica.

&#61485; Disponibilità di accesso a grandi apparecchiature europee, ove è previsto l'approvazione del programma di misure.

&#61485; Analisi delle prospettive applicative, ove presenti e interazione con Industrie nel campo della fotonica per applicazione dei risultati del Progetto.

&#61485; Formazione nella ricerca e nelle ricadute applicative di dottorandi o post-doc.

&#61485; Approfondimento dello sviluppo industriale in tematiche correlate ai contenuti del presente progetto ed eventuale focalizzazione di alcune linee per fornire contributi anche nel settore applicativo.

Tale gestione mira organizzare l'attività di ricerca per rispettare gli obiettivi prefissati nel progetto, suddivisi in milestones. Per quanto riguarda le attività svolte in collaborazione e sinergia, quali le caratterizzazioni delle proprietà chimico-fisiche dei campioni cresciuti al variare dei parametri di processo, all'interno delle riunioni interunità saranno concertati i tempi di risposta di ciascuna unità di ricerca entro i quali devono essere effettuate le attività prescritte in modo da garantire il progresso delle attività di ricerca ed ottimizzare il processo di feedback sulla preparazione di materiale di partenza.

Criteri di verificabilità suddivisi per unità:

All'interno delle specifiche attività di ciascuna unità di ricerca, l'Unità di Roma applicherà come ulteriori criteri di verificabilità 3 importanti obiettivi:

1) realizzazione di solitoni spaziali e guide d'onda solitoniche in niobato di litio drogato erbio;

2) stabilizzazione nel tempo delle guide solitoniche;

3) realizzazione di un risonatore integrato entro guide solitoniche e misura della emissione spontanea amplificata con possibile accensione come laser

4) se il budget stanziato sarà sufficiente saranno effettuate prove di realizzazione di matrici di solitoni e di guide solitoniche entro lo stesso campione.

All'interno delle specifiche attività di ciascuna unità di ricerca, l'Unità di Padova applicherà come ulteriore criterio di verificabilità la crescita e caratterizzazione di un numero congruo di campioni con qualità ottica e strutturale adeguate al conseguimento degli obiettivi del progetto quantificabile come segue:

- almeno 10 cristalli di niobato di litio congruente con concentrazioni di Er diverse entro il primo anno;

- almeno 10 cristalli di niobato di litio congruente codrogato Er-Yb con concentrazioni di ErYb diverse entro il secondo anno.

- almeno 5 cristalli di niobato di litio congruente drogato Er ed eventualmente codrogato con Fe con concentrazioni di ErFe diverse entro il secondo anno.

L'Unità di Pisa ha come scopo principale la crescita di campioni di Niobato di Litio in forma di bacchette o fibre in parallelo con la crescita di campioni massivi effettuata presso l'Unità di Padova e la loro caratterizzazione ottica. Come criterio di verificabilità, quindi, applicherà la crescita e caratterizzazione di un numero congruo di campioni con qualità ottica e strutturale il più possibile simili a quelle dei campioni massivi cresciuti a Padova. In particolare si prevede la crescita di :

- almeno 10 fibre di niobato di litio congruente di diametro dell'ordine del mm e lunghezza fino a 10 cm con varie concentrazioni di Er entro il primo anno;

- almeno 5 fibre di niobato di litio congruente drogato con varie concentrazioni di Er ma diametro inferiore al mm, e almeno 10 fibre di niobato di litio congruente codrogato Er-Yb e Er-Fe con concentrazioni di ErYb (o ErFe) diverse entro il secondo anno.

I campioni verranno inoltre sottoposti ad analisi strutturale ed ottica per verificarne la qualità e la purezza. I campioni più promettenti verranno inoltre inviati alle altre Unità per completarne la caratterizzazione e per la realizzazione delle guide solitoniche.

## **Elenco delle Unità di Ricerca**

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di ROMA "La Sapienza"
<b>Responsabile Scientifico</b>	Eugenio FAZIO
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 58.000

## **Compito dell'Unità**

*Il gruppo di Roma ha come ruolo primario la realizzazione di solitoni spaziali, la scrittura delle guide d'onda e la realizzazione dei laser, sia singole cavità che multiple in forma di matrici.*

*Per far questo effettuerà inizialmente una caratterizzazione spettroscopica dei campioni cresciuti dalle altre unità di ricerca nonché le misure dell'efficienza fotorifrattiva e fotovoltica al fine di determinare le proprietà dei campioni e di conseguenza le condizioni operative ottimali. Particolare attenzione sarà rivolta al comportamento elettrico dei materiali al fine di poter controllare eventuali fenomeni indesiderati di trasferimento di carica tra gli ioni emettitori ed il reticolo cristallino ospite.*

*Insieme con le altre unità studierà quindi un modello analitico per descrivere l'interazione radiazione-materia. Tale modello potrebbe essere utilizzato per simulare numericamente il comportamento ottico nonlineare del materiale e di conseguenza il processo di formazione dei fasci solitonici e del loro utilizzo come guide ottiche integrate. Si cercherà quindi di realizzare solitoni in primi campioni di niobato di litio drogato erbio realizzati dagli altri gruppi e se ne caratterizzeranno i canali come guide solitoniche. Dalle misure di luminescenza dell'erbio effettuate dagli altri gruppi e dalle misure di formazione dei canali solitonici, si studieranno, in equipe con gli altri gruppi, eventuali composizioni particolari di co-droganti per aumentare l'efficienza di emissione e la formazione dei canali.*

*Verranno quindi studiate particolari specchiature dei campioni per realizzare laser integrati e saranno effettuate prove di accensione di laser.*

*Se il budget lo permetterà saranno provate realizzazioni di matrici di solitoni anche se il taglio apportato probabilmente non permetterà una realizzazione completa di questo aspetto pratico.*

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di PISA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Alessandra TONCELLI
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 49.200

## **Compito dell'Unità**

*Il gruppo di Pisa ha come ruolo primario la crescita fibre monocristalline di niobato di litio drogate in volume con erbio, mediante la tecnica MicroPullingDown in parallelo con la crescita di campioni massivi realizzata presso il gruppo di Padova.. Studierà anche la possibilità di effettuare contemporaneamente drogaggi con vari altri materiali per sensibilizzare l'emissione luminosa e l'effetto fotorifrattivo. A causa del taglio effettuato al budget richiesto, si prevede che il numero di campioni cresciuti possa essere inferiore a quello inizialmente dichiarato soprattutto per quanto riguarda l'esplorazione della crescita di campioni con diversi diametri e con diversi co-droganti in quanto per ottenere campioni di elevata purezza e' necessario per ogni diametro (e preferibilmente anche per ogni drogante), utilizzare crogioli di Platino nuovi, opportunamente disegnati per il diametro voluto. Il gruppo effettuerà anche il poling, il taglio e la lappatura dei campioni cresciuti. Effettuerà anche la caratterizzazione del drogaggio, della struttura cristallina e della struttura a bande sia delle fibre cresciute in sede che dei cristalli cresciuti dall'unità di Padova. Il confronto dei risultati ottenuti con quelli degli altri gruppi permetterà di ottimizzare gli apparati sperimentali, la loro taratura e soprattutto si deciderà insieme come procedere nel lavoro sperimentale. Inoltre parteciperà alla caratterizzazione del modo di propagazione delle guide solitoniche e soprattutto delle perdite di propagazione.*

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di PADOVA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Paolo MAZZOLDI
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 50.800

## **Compito dell'Unità**

*Il gruppo di Padova ha come ruolo primario la crescita i campioni di niobato di litio drogati in volume con erbio sotto forma di monocristalli, mediante la tecnica Czochralski. Studierà anche la possibilità di effettuare drogaggi con vari altri elementi contemporaneamente per sensibilizzare l'emissione luminosa e l'effetto fotorifrattivo. L'attività prevedrà la realizzazione di substrati monocristallini attraverso la applicazione di un processo di poling del materiale, provvedendo alla fornitura di substrati delle dimensioni e orientazioni prefissate attraverso l'orientazione, taglio e la lappatura dei campioni cresciuti. Effettuerà la caratterizzazione della composizione chimica, della struttura cristallina, delle principali proprietà ottiche sia dei campioni cresciuti in sede che delle fibre cresciute dall'unità di Pisa. Il confronto dei risultati ottenuti con quelli degli altri gruppi permetterà di ottimizzare gli apparati sperimentali, la loro taratura e soprattutto di concertare la prosecuzione dei lavori (sia di natura sperimentale che teorica). Inoltre parteciperà alla caratterizzazione del modo di propagazione delle guide solitoniche. Insieme con le altre unità studierà un modello analitico di descrizione dell'interazione radiazione-materia.*