

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005020488

Coordinatore Scientifico	Giulio Nicola CERULLO
Ateneo	Politecnico di MILANO
Titolo della Ricerca	Controllo spettrale e temporale di impulsi a femtosecondi mediante processi non lineari del secondo ordine
Finanziamento assegnato	Euro 129.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Il Progetto di Ricerca ha come scopo la comprensione, l'analisi ed il controllo degli effetti dei processi ottici non lineari del secondo ordine nel regime dei femtosecondi, in mezzi dielettrici di volume e in strutture guidanti con polarizzazione periodica dei domini ferroelettrici.

Gli obiettivi principali del Progetto possono dividersi in due categorie, riguardanti rispettivamente la ricerca di base e la ricerca applicata.

Obiettivo 1 (ricerca di base)

Dal punto di vista della ricerca di base il Progetto mira allo studio sperimentale e teorico delle condizioni che consentono il controllo delle caratteristiche temporali e spettrali di impulsi ottici a femtosecondi, controllo ottenuto mediante processi non lineari del secondo ordine in mezzi χ^2 -periodici, sia in geometria di volume che di guida. La scala temporale prescelta è quella che va da 10 a 50 fs, le lunghezze d'onda d'interesse sono quelle comprese tra 1300 e 1600 nanometri (per la frequenza fondamentale), ed i materiali utilizzati sono il niobato di litio e il tantalato di litio stechiometrico, entrambi con inversione periodica della polarizzazione dei domini ferroelettrici. All'interno di questo obiettivo primario, si possono distinguere i seguenti obiettivi secondari:

- studio dell'efficienza di generazione di seconda armonica (SHG) in presenza di elevato "mismatch" di velocità di gruppo (GVM) tra gli impulsi alla frequenza fondamentale (FF) e alla seconda armonica (SH). Si tratta di un problema di particolare interesse se lo si riferisce al problema di generare, con la massima efficienza di conversione possibile, impulsi SH a banda stretta, dell'ordine del nanometro o della frazione di nanometro, a partire da impulsi FF a banda larga, dell'ordine delle centinaia di nanometri;*
- studio degli effetti temporali indotti sugli impulsi FF dall'interazione non lineare con gli impulsi di seconda armonica (e, in un caso più generale, anche con quelli di terza armonica). Il principale tema di questo studio è l'analisi delle condizioni per la generazione di solitoni temporali (e, più in generale, per la compressione temporale degli impulsi FF) da un lato, e per il controllo del ritardo di gruppo dell'impulso FF dall'altro (quest'ultimo reso possibile dal regime di elevata GVM).*
- studio dello spostamento spettrale indotto sugli impulsi FF dall'interazione non lineare con gli impulsi SH. Lo studio è qui mirato alla caratterizzazione degli spostamenti spettrali di tipo Raman che avvengono in interazioni non-lineari del secondo ordine in cascata in presenza di forte GVM.*

Obiettivo 2 (applicazioni)

Dal punto di vista applicativo il Progetto mira a studiare, a partire dalle indagini teorico-sperimentali sopra descritte, la fattibilità della realizzazione di due dispositivi dimostratori utilizzabili in diversi campi, dalla spettroscopia alla biofisica, dalle telecomunicazioni alla caratterizzazione dei materiali. I dispositivi sono i seguenti:

- un "frequency shifter" che fornisca ± 150 nm di accordabilità ad una sorgente a femtosecondi a frequenza fissa, frutto dell'ingegnerizzazione degli effetti di spostamento spettrale sopra menzionati. Prototipi di questo tipo potrebbero diventare utili accessori per rendere accordabili sistemi laser a femtosecondi che di natura non lo sono (si pensi per esempio ai laser in fibra): si tratterebbe semplicemente di aggiungere in serie alla sorgente un dispositivo compatto opportunamente progettato.*
- un compressore spettrale che converta con elevata efficienza impulsi FF a femtosecondi a banda larga in impulsi SH a picosecondi a banda stretta, frutto dell'ingegnerizzazione dello studio di efficienza del processo di SHG sopra menzionato. L'importanza di un prototipo di questo tipo va riferita al fatto che allo stato attuale è più facile generare impulsi accordabili a femtosecondi piuttosto che a picosecondi. La prospettiva è mettere in cascata ad un'assegnata sorgente a femtosecondi un dispositivo compatto opportunamente progettato.*

Al termine del progetto verrà realizzato, per lo meno in forma prototipale, il dimostratore di uno dei due dispositivi.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Negli ultimi quindici anni lo sviluppo nel campo dell'ottica non-lineare è stato considerevolmente favorito dallo sviluppo dei sistemi laser basati sulle proprietà del Titanio in Zaffiro e delle tecniche di inversione periodica dei domini in materiali ferroelettrici. Ultimamente è possibile generare impulsi di durata fino a 20 fs con energia sino a 1 mJ anche con sistemi commerciali, il che permette di studiare regimi non-lineari sempre più estremi di interazione radiazione-materia. D'altro canto l'inversione periodica dei domini in cristalli ferro-elettrici ha offerto la possibilità di sfruttarne appieno gli elevati coefficienti non lineari diagonali, e di ottenere la condizione di "phase-matching" nella regione spettrale desiderata. Grazie a valori di efficienza così elevati, i materiali periodicamente invertiti sono divenuti negli ultimi anni i principali mezzi per realizzare amplificatori ed oscillatori ottici

parametrici, sorgenti compatte nel blu e nel verde, interruttori tutto-ottici e convertitori di frequenza per applicazioni nelle telecomunicazioni.

Di fatto, nonostante l'elevatissima non linearità, i cristalli χ^2 -periodici vengono raramente impiegati con impulsi a femtosecondi. Cristalli quali il BBO e l'LBO sono generalmente preferiti soprattutto per la minore dispersione, che consente di ottenere agevolmente condizioni di "phase-matching" non critiche. La minore non linearità viene compensata dall'elevata potenza di picco degli impulsi a femtosecondi. E' stato tuttavia dimostrato recentemente come dalla cascata di processi del secondo ordine in presenza di elevata dispersione del materiale, ed elevate non linearità e lunghezza di interazione, sia possibile modificare in maniera consistente le caratteristiche spettrali e temporali degli impulsi a femtosecondi iniettati. Mediante una scelta opportuna del mezzo χ^2 -periodico e delle condizioni sperimentali, è possibile pertanto arrivare a controllare finemente le proprietà temporali e spettrali degli impulsi a femtosecondi. Questo aspetto costituisce la principale innovazione del progetto di ricerca rispetto allo stato dell'arte, ed è di importanza fondamentale per diverse applicazioni. Per esempio, allo stato attuale l'accordabilità in lunghezza d'onda degli impulsi a femtosecondi viene ottenuta mediante amplificatori ottici parametrici (OPA) che sono piuttosto complessi. Sarebbe particolarmente utile sviluppare dispositivi più semplici degli OPA che consentano di variare la frequenza portante di impulsi a femtosecondi con continuità e su larga banda. Questi dispositivi incrementerebbero le prestazioni di sorgenti quali i laser in fibra, che sono molto compatti ed efficienti ma presentano frequenza fissa. Un'altra problematica innovativa collegata alla manipolazione di impulsi a femtosecondi è la conversione di impulsi a femtosecondi in impulsi a picosecondi per applicazioni che richiedano impulsi a banda stretta quali la spettroscopia Raman risolta in tempo o la generazione superficiale di frequenza somma. Allo stato attuale la tecnica adottata è quella di filtrare spettralmente un impulso a femtosecondi, al prezzo però di rilevanti perdite di energia. Una soluzione più semplice ed efficiente sarebbe un dispositivo non lineare che trasformi con elevata efficienza impulsi a femtosecondi a larga banda in impulsi a picosecondi a banda stretta.

Allo scopo di realizzare le funzionalità sopra accennate, ed altre ancora, un ruolo chiave è giocato dalla non-linearità cubica efficace che si può ottenere nell'interazione in cascata di due o tre onde in materiali χ^2 . Questa non-linearità, il cui segno può essere facilmente controllato solo cambiando il segno del "phase-mismatch", può essere sfruttata per ottenere spostamenti spettrali e compensare effetti di diffrazione e/o dispersione, dando origine a campi elettromagnetici estremamente localizzati in spazio e/o tempo, detti solitoni. La maggior parte degli effetti finora riportati in letteratura riguarda l'ambito ristretto dei solitoni spaziali e della scala temporale dei picosecondi. Nel dominio del tempo, sono stati ottenuti risultati significativi solo da pochi e non sono stati ancora riportati esperimenti con impulsi sotto i 100fs in cristalli χ^2 -periodici, né in un mezzo di volume né in guida d'onda.

L'attività di ricerca sperimentale e teorica del progetto si inserisce nel contesto di cui sopra con tre principali elementi di novità:

- i) l'estensione dello studio delle dinamiche spettrali e temporali di impulsi a femtosecondi al caso dei cristalli χ^2 -periodici, sia in geometria di volume che di guida, con impulsi al di sotto dei 50 fs e con lunghezze d'onda attorno a 1500 nm;
- ii) l'indagine di nuovi fenomeni, quali l'osservazione di solitoni temporali in un mezzo a dispersione normale, lo studio dell'efficienza del processo di generazione di seconda armonica in presenza di elevata "group-velocity-mismatch" (GVM) e con impulsi nella scala dei femtosecondi, la dipendenza del ritardo di gruppo dell'impulso FF mediante intensità e "phase-mismatch", lo studio e l'ingegnerizzazione dello spostamento spettrale dell'impulso FF indotto dal processo in cascata in presenza di elevata GVM;
- iii) lo studio di fattibilità di due prototipi, un "frequency-shifter" che consenta di rendere accordabile in lunghezza d'onda una sorgente a femtosecondi di frequenza fissa, e un compressore spettrale per convertire impulsi a femtosecondi a larga banda in impulsi a picosecondi a banda stretta, e la realizzazione sperimentale di uno di essi.

Criteri di verificabilità

Il Progetto di Ricerca è organizzato in due Fasi Annuali (FASE 1, FASE 2); ciascuna Fase è suddivisa in Pacchetti di Lavoro (WP), con propri obiettivi parziali e finali verificabili, con compiti precisi e sinergici affidati alle diverse unità che partecipano al progetto, come spiegato dettagliatamente nel Programma di Ricerca. La verificabilità dei risultati della ricerca sarà pertanto basata sul raggiungimento degli obiettivi di ciascun WP, come di sotto sinteticamente riportato.

CRITERI DI VALIDAZIONE DELL'ATTIVITA' SVOLTA IN FASE 1

WP.1 - Studio sperimentale e teorico dell'evoluzione delle caratteristiche temporali e spettrali di impulsi a femtosecondi nei processi non lineari del secondo ordine in cristalli χ^2 periodici, e ottimizzazione dell'efficienza di SHG con impulsi a femtosecondi.

WP.2 - Realizzazione di guide d'onda di elevata qualità ottica da utilizzare negli esperimenti del secondo anno.

WP.3 - Sviluppo di un codice numerico FDTD per l'analisi delle interazioni quadratiche a due e più onde sulla scala dei femtosecondi in materiali χ^2 -periodici.

CRITERI DI VALIDAZIONE DELL'ATTIVITA' SVOLTA IN FASE 2

WP.4 - Analisi teorica e numerica di processi non lineari del secondo ordine con impulsi a femtosecondi in strutture "bulk" e guidanti χ^2 -periodiche.

WP.5 - Controllo delle caratteristiche temporali e spettrali di impulsi a femtosecondi iniettati in strutture guidanti χ^2 -periodiche.

WP.6 - Dimostrazione prototipale di un dispositivo basato sui fenomeni studiati, a scelta tra: "frequency-shifter" di impulsi a femtosecondi di frequenza fissa, con ampia banda ed accordabile finemente in frequenza; compressore spettrale per la conversione efficiente di impulsi a larga banda nel vicino IR in impulsi a banda stretta nel visibile.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Politecnico di MILANO
Responsabile Scientifico	Giulio Nicola CERULLO
Finanziamento assegnato	Euro 73.000

Compito dell'Unità

L'Unità di Milano Politecnico è responsabile dell'attività sperimentale del progetto, avente come scopo il controllo delle proprietà spettrali e temporali di impulsi a femtosecondi tramite propagazione in opportuni mezzi χ^2 -periodici, in configurazione sia guidata che non. Quest'attività porterà alla dimostrazione di un prototipo a scelta tra: i) un "frequency shifter" che renda accordabile una sorgente a femtosecondi con frequenza fissata, e ii) un compressore spettrale che converta con elevata efficienza impulsi a femtosecondi in impulsi a picosecondi.

L'attività di ricerca può essere riassunta nello studio sperimentale delle modifiche temporali e spettrali di impulsi a femtosecondi indotte da processi di SHG (generazione di seconda armonica) in cristalli e guide d'onda χ^2 -periodici. Questo studio verrà svolto nei primi 18 mesi di Progetto e sarà focalizzato all'indagine dei seguenti punti:

- spostamento spettrale di impulsi a femtosecondi intorno a 1500 nm iniettati in condizioni opportune di intensità e "phase-mismatch" in cristalli PPLN (niobato di litio χ^2 -periodico) e PPSLT (tantalato di litio χ^2 -periodico), in geometria di volume (mesi 1-12), e in geometria guidata (mesi 13-18);
- efficienza del processo di SHG in condizioni in cui la lunghezza del cristallo è significativamente maggiore della lunghezza di separazione tra gli impulsi FF (frequenza fondamentale) e SH (seconda armonica), cioè in regime di elevata GVM (disadattamento tra le velocità di gruppo);
- condizioni per la generazione di solitoni temporali, e, più in generale, per la miglior compressione temporale degli impulsi FF;
- controllo del ritardo di gruppo degli impulsi FF tramite intensità e "phase-mismatch".

Quest'indagine porterà alla realizzazione prototipale e alla caratterizzazione (mesi 19-24) di uno dei seguenti due dispositivi: i) un "frequency-shifter" che fornisca ± 150 nm di accordabilità ad una sorgente a femtosecondi a frequenza fissa; ii) un compressore spettrale che converta con elevata efficienza impulsi FF a femtosecondi a banda larga in impulsi SH a picosecondi a banda stretta. L'attività di ricerca sopra menzionata è particolarmente impegnativa e richiede che alcune grandi attrezzature siano già disponibili e che diverse competenze siano già consolidate. Tra le prime, l'Unità di Milano ha realizzato un amplificatore parametrico capace di impulsi sotto i 50 fs accordabili nell'infrarosso con energia fino a 500 nJ, e un forno opportunamente progettato per la fabbricazione di guide d'onda di elevata qualità mediante scambio protonico. Tra le principali competenze richieste, l'Unità di Milano vanta una vasta esperienza nella spettroscopia ultra-veloce che richiede normalmente la caratterizzazione spettrale e temporale di impulsi ultra-brevi, e ha sviluppato un banco di caratterizzazione particolarmente accurato per la determinazione di tutti i parametri ottici rilevanti di guide d'onda.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di PADOVA
Responsabile Scientifico	Gianfranco NALESSO
Finanziamento assegnato	Euro 33.500

Compito dell'Unità

L'Unità di Padova prenderà parte allo sviluppo della parte teorica del progetto. Negli anni passati l'Unità ha infatti sviluppato una notevole esperienza nello studio di fenomeni ottici non lineari.

Seguendo la stessa divisione per fasi riportata nella Descrizione del Programma di Ricerca, nel testo che segue si evidenzia il Ruolo Operativo dell'Unità di Padova.

Nel primo anno di attività, corrispondente alla FASE 1 (m1-12) del Programma di Ricerca, l'Unità di Padova si occuperà di studiare e comprendere alcuni fenomeni spettrali e temporali che hanno origine nei processi a tre fotoni sulla scala dei femtosecondi. Dal punto di vista della prosecuzione del progetto, il secondo obiettivo di questa fase, per l'Unità di Padova, è la predisposizione di strumenti che saranno necessari nel prosieguo del progetto per le sperimentazioni in guida d'onda. In particolare l'Unità di Padova sarà coinvolta in WP.1 e in WP.3:

WP.1(m1-12): studio teorico dei processi ottici a due onde (w , $2w$), in dispositivi di volume per dimostrare come tali processi possano essere sfruttati per accordare le proprietà spettrali e temporali di impulsi ai femtosecondi. Il lavoro in questione viene svolto dall'unità di Padova (parte teorica e di simulazione) unitamente all'unità di Milano (parte sperimentale).

WP.3(m7-12): anche sulla base dei risultati preliminari ottenuti (in WP1 e WP2), verranno poste le basi metodologiche per lo sviluppo di programmi di simulazione per lo studio delle interazioni a più onde (w , $2w$, $3w$), simulatori progettati su misura per le esigenze della Fase 2 del presente programma di ricerca. Il lavoro in questione viene svolto dall'Unità di Padova (parte teorica) congiuntamente all'Unità di Bologna (implementazione dei codici).

Nel secondo anno di attività, corrispondente alla FASE 2 (m13-24) del Programma di Ricerca, l'Unità di Padova avrà il seguente

ruolo: (i) analisi teorica e numerica accurata di processi non lineari del secondo ordine con impulsi a femtosecondi in strutture "bulk" e guidanti χ^2 -periodiche, (ii) dimostrazione prototipale di un "frequency shifter" o di un "compressore spettrale". In particolare L'Unità di Padova sarà coinvolta in WP4 e in WP.6:

WP.4(m13-18): studio teorico delle interazioni a più onde ($w, 2w, 3w$) in guide a canale per il controllo temporale e spettrale delle proprietà della frequenza fondamentale e/o della sua seconda armonica e/o della sua terza armonica. Il lavoro teorico in questione viene svolto dall'Unità di Padova con il supporto dell'Unità di Bologna, che si occuperà prevalentemente dell'implementazione di codici. Parte del lavoro svolto in WP.4 supporterà le contemporanee indagini sperimentali in WP.5.

WP.6(m19-24): realizzazione e caratterizzazione di un dispositivo prototipale che costituisce uno degli obiettivi finali del progetto: "frequency-shifter" o "compressore spettrale". Il lavoro in questione viene svolto dalle unità di Padova e Bologna (parte teorica e di simulazione) congiuntamente all'unità di Milano (parte sperimentale).

Sede dell'Unità	Università degli Studi di BOLOGNA
Responsabile Scientifico	Paolo BASSI
Finanziamento assegnato	Euro 22.500

Compito dell'Unità

L'Unità di Bologna prenderà parte allo sviluppo della parte teorica del progetto. Negli anni passati l'Unità ha infatti sviluppato una notevole esperienza nello sviluppo di metodi numerici per lo studio di fenomeni ottici lineari e non lineari, come più diffusamente illustrato nel modello B del progetto. L'Unità di Bologna si prenderà cura dei problemi di tipo numerico, ma sarà anche coinvolta nello sviluppo dei modelli teorici che dovranno poi essere portati alla messa a punto di opportuni codici di calcolo assieme all'Unità di Padova e con un continuo scambio di informazioni con l'Unità di Milano, responsabile della parte sperimentale del progetto.

L'Unità di Bologna si occuperà in una prima fase (WP2) del problema dell'ottimizzazione delle interazioni non lineari studiando le caratteristiche delle guide ottiche che saranno poi realizzate e caratterizzate dall'Unità di Milano. Per questo scopo saranno utilizzati codici basati sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM), da adattare al tipo di problema sotto indagine in quanto, ad esempio, è necessaria l'interpolazione dei risultati sui grigliati uniformi utilizzati dai solutori propagativi, per avere strumenti più adatti ad alcune parti del progetto che saranno oggetto della fase 2.

Poi (WP3), l'Unità di Bologna svilupperà un codice basato sulla tecnica delle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FDTD) per risolvere le Equazioni di Maxwell in regime non lineare senza approssimazioni, salvo, naturalmente quelle legate alla discretizzazione spaziale e temporale del dominio. Questo sarà fatto estendendo codici sviluppati in precedenza dall'Unità di Bologna e basati su questa tecnica allo scopo di valutare, assieme all'Unità di Padova, quali ipotesi semplificative possono essere fatte sulle equazioni senza ridurre la validità del modello.

Le informazioni così ottenute verranno usate (WP4) dall'Unità di Bologna, sempre assieme all'Unità di Padova, per sviluppare un codice BPM che descriva in modo appropriato le interazioni non lineari tra impulsi a femtosecondi in strutture a domini ferroelettrici invertiti. Questa parte numerica richiederà anche un approfondito studio dei fenomeni fisici e sarà sviluppata ancora assieme all'Unità di Padova.

Infine (W6), i codici numerici verranno utilizzati, assieme alle altre due Unità, per progettare un prototipo (frequency-shifter" o "compressore spettrale") e interpretare i risultati ottenuti ed eventualmente modificare le caratteristiche dei dispositivi.