

Francesco Cappelli

Realizzazione di una sorgente medio-infrarossa basata su laser a cascata quantica controllata da un sintetizzatore di pettini di frequenze mediante aggancio ottico (injection locking)

Tesi di Laurea Specialistica in Scienze Fisiche e Astrofisiche

Relatore: Dott. Paolo De Natale (paolo.denatale@ino.it)

Correlatore: Prof. Massimo Inguscio (inguscio@lens.unifi.it)

In questo lavoro di tesi un laser a cascata quantica (QCL) nel medio infrarosso operante a temperatura ambiente è stato iniettato otticamente con una radiazione con elevata purezza spettrale prodotta tramite un processo non lineare di generazione della frequenza differenza (DFG) a partire da due sorgenti vicino-infrarosse riferite a un sintetizzatore di pettini di frequenze (OFCS). Questo ha permesso di combinare in un'unica sorgente coerente le qualità metrologiche della radiazione DFG (*master*) con l'elevata potenza garantita dai QCL (*slave*). Il risultato finale è la realizzazione di una sorgente di radiazione medio-infrarossa singolo modo, con profilo di emissione stretto, ampiamente sintonizzabile, riferita a una frequenza assoluta e contemporaneamente intensa.

L'interesse nello sviluppo di sorgenti medio-infrarosse con le caratteristiche sopra descritte è da ricercare soprattutto per applicazioni avanzate quali la rivelazione di gas in tracce assistita da cavità di altissima finezza, la spettroscopia di elevata risoluzione, la metrologia di frequenza. In questi campi, la regione spettrale del medio infrarosso (*molecular fingerprint region*) gioca un ruolo centrale. Essa è infatti caratterizzata dalle bande rotovibrazionali fondamentali di molte tra le molecole di interesse atmosferico e astrofisico: tecniche di spettroscopia avanzata hanno qui dimostrato sensibilità di rivelazione fino a decine di parti per quadrilione.

Attualmente le uniche sorgenti coerenti compatte in grado di coprire tutta la regione spettrale del medio (fino al lontano) infrarosso sono i QCL. Si tratta di dispositivi a semiconduttore capaci di operare in continua a temperatura ambiente con potenze di emissione che tipicamente spaziano da alcune decine di mW fino ad alcuni W, presentando sintonizzabilità in frequenza fino a centinaia di cm^{-1} se montati in cavità esterna.

In condizioni di funzionamento standard i QCL presentano spettri di emissione larghi alcuni MHz, essenzialmente dominati dal rumore introdotto dagli alimentatori; è stato però dimostrato che la larghezza di riga intrinseca è molto più stretta, fino a qualche centinaio di Hz. Questa proprietà ha reso questo tipo di sorgente interessante per applicazioni di spettroscopia

di alta precisione e sensibilità, a condizione di trovare soluzioni per migliorarne l'emissione, stabilizzando la frequenza e stringendo lo spettro.

La tecnica dell'*iniezione ottica* utilizzata in questo lavoro di tesi è uno dei metodi di stabilizzazione più robusti. Essa è stata utilizzata per stabilizzare laser a gas, a stato solido e a diodo, mentre la sua efficacia sui laser a cascata quantica è qui indagata per la prima volta. L'analisi del rumore di frequenza sulle radiazioni *master* e *slave*, in condizioni di regime libero e di aggancio ottico, dimostrano che le proprietà di stabilità della radiazione DFG sono efficacemente trasferite al QCL. Rispetto al normale regime di funzionamento, il rumore di frequenza del QCL risulta ridotto da 3 a 4 ordini di grandezza e la larghezza dello spettro della radiazione risulta diminuita di un fattore 100, da qualche MHz fino ad alcune decine di kHz su una scala di tempo di 100 ms. Il confronto fra il profilo di rumore della radiazione *slave* e quello della radiazione *master* evidenzia come la stabilità del QCL iniettato risulti limitata da quella della radiazione *master*, dimostrando tra l'altro la possibilità di superare il limite di rumore predominante in questi dispositivi dovuto agli alimentatori. L'effetto complessivo è quello di un'amplificazione della potenza della DFG fino ad un fattore 1000 senza un significativo peggioramento della sua purezza spettrale. Il sistema risulta inoltre molto stabile: il QCL si mantiene agganciato per diversi minuti senza alcun intervento esterno, entro una banda di 1 GHz.

Una prospettiva interessante che si apre con questo lavoro di tesi è la possibilità di amplificare un pettine di frequenze per mezzo dell'*iniezione ottica* con un QCL come laser *slave*. Questo è un argomento di forte interesse sia per una comprensione più approfondita delle caratteristiche di guadagno del QCL, sia in vista dell'implementazione di un amplificatore di OFCS nel medio infrarosso. Le misure preliminari lasciano aperta la questione, evidenziando la necessità di ulteriori indagini, in particolare sulle proprietà di guadagno del mezzo attivo. Nuove misure sono già state programmate su altri QCL con un trattamento antiriflesso su una delle due facce ed eventualmente con una diversa struttura del mezzo attivo.