



Luigi Consolino, Saverio Bartalini, Paolo De Natale

Caratterizzazione di un laser a cascata quantica THz basato su generazione in differenza di frequenza

Characterization of THz quantum-cascade laser based on difference-frequency generation

Riassunto. Abbiamo realizzato una caratterizzazione completa, in termini di tunabilità e purezza spettrale, di laser THz innovativi, capaci di operare a temperatura ambiente, al fine di determinarne le potenzialità come sorgenti per spettroscopia ad alta risoluzione o come oscillatori locali, ad esempio per applicazioni in astronomia.

Parole chiave. Laser a cascata quantica terahertz, pettine di frequenze, purezza spettrale.

La parte di spettro elettromagnetico che in frequenza va da 0.1 THz a 10 THz viene denominata “lontano infrarosso” o “terahertz (THz)”, ed è una regione particolarmente importante per molte applicazioni tecnologiche e strategiche, che vanno dal campo biomedicale alla sicurezza aeroportuale, dal monitoraggio di inquinanti a livello globale a controllo qualità di cibo e prodotti agroalimentari. Queste potenzialità derivano dalla peculiarità dell’interazione radiazione-mate-

Abstract. We realized full characterization, in terms of tunability and spectral purity, of innovative THz lasers which can work at room temperature. The aim was to determine their potential as sources for high resolution spectroscopy or as local oscillators in, for example, astronomy applications.

Keywords. Terahertz quantum cascade laser, frequency comb, spectral purity

The band of the electromagnetic spectrum ranging from 0.1 THz to 10 THz is called “far infrared” or “terahertz (THz)”. This region is particularly important for many technological and strategic applications that range from biomedical science to airport security and from worldwide pollution monitoring to food quality control. The potential and the variety of these applications are determined by the particularity of the interaction of radiation with matter in the THz region.

ria nella regione THz, ma per questo stesso motivo, lo sviluppo di sorgenti e ricevitori altamente performanti è stato molto rallentato. Ancora oggi, nonostante i tremendi progressi ottenuti negli ultimi decenni, l'accuratezza delle tecniche sperimentali THz è ancora lontana da quella di altre regioni spettrali, principalmente a causa della mancanza di una sorgente laser compatta, ad alta purezza spettrale, e utilizzabile senza la necessità di sistemi criogenici.

L'Istituto Nazionale di Ottica è da molti anni alla frontiera nello sviluppo e nella caratterizzazione di sorgenti di radiazione THz, dai pionieristici lavori su *Tunable Far-Infrared* laser [1], alle recenti dimostrazioni ed all'effettivo utilizzo di un pettine di frequenze *free-standing* proprio nella regione THz [2,3].

Si inserisce in questo contesto la collaborazione con l'Università di Austin nel Texas e con il CNR-NANO di Pisa. Obiettivo della ricerca è studiare, caratterizzare ed utilizzare sorgenti laser a cascata quantica (QCL) di ultimissima generazione [4]. Queste nuove sorgenti, realizzate negli Stati Uniti, sono costituite dalle due regioni attive di due laser QCL che emettono nel medio infrarosso, intorno a 8.5 e 9.5 μm rispettivamente. La differenza tra queste due frequenze, che viene generata grazie alla non linearità del mezzo ottico di cui è costituita la regione attiva, cade proprio nel range di frequenze THz, in particolare a 2.58 THz.

La caratterizzazione condotta nei laboratori del CNR-INO ha riguardato vari aspetti del dispositivo, ed è stata resa possibile grazie all'utilizzo del già citato pettine di frequenze THz (THz FCS) come un "righello" ottico. Il THz FCS, generato all'interno di un cristallo non-lineare, è composto, nel dominio delle frequenze, da una serie equi spaziata di emissioni molto strette (i "denti" del pettine di fre-

For this same reason, however, the development of high performing laser sources and receivers has been greatly delayed. Even now, despite the enormous progress that has been made in this field in the last decades, the accuracy of the experimental THz techniques is still far from those of other spectral regions. This is mainly due to the lack of a compact laser source with high spectral purity, usable without the need of cryogenic cooling systems.

For years the National Institute of Optics (CNR-INO) has been at the forefront in the development and characterization of THz radiation sources, from pioneering works on *Tunable Far-Infrared* lasers [1] to the more recent demonstrations and effective use of a *free-standing* frequency comb in the THz region [2, 3].

On this specific issue, the National Institute of Optics is now collaborating with the University of Texas at Austin and with CNR-NANO in Pisa. The objective of the research is to study, characterize and utilize next-generation quantum cascade laser sources (QCLs) [4]. These new sources, developed in the United States, are formed by two active regions of two QC lasers that emit at mid-infrared wavelengths, at roughly 8.5 and 9.5 μm , respectively. The difference between these two frequencies, which is generated thanks to the nonlinearity of the active region of the laser, falls within the THz frequency range, specifically at 2.58 THz.

Research carried out in CNR-INO labs was aimed at characterizing many aspects of the device, and was possible thanks to the use of the above-mentioned THz frequency comb (THz FCS), which acts as a frequency "ruler". The THz FCS, generated inside a nonlinear crystal, consists, in the frequency domain, of a series of evenly spaced and very narrow emissions (the

quenze), delle quali si conosce con altissima precisione la frequenza assoluta. Le misure sono state effettuate costruendo un sistema eterodina capace di confrontare la frequenza di emissione della nuova sorgente con quelle conosciute del pettine di frequenze. È stato possibile in questo modo determinare non soltanto la frequenza assoluta della radiazione THz con una precisione mai raggiunta prima di 4×10^{-10} (ovvero un errore di circa 1 kHz su 2.58 THz), ma anche la sua purezza spettrale e i parametri di accordabilità in frequenza del dispositivo.

Le misure che riguardano l'accordabilità sono riportate in Fig. 1: la frequenza della radiazione emessa dal THz QCL viene monitorata in modo continuo al variare della temperatura del dispositivo (Fig. 1a) e della corrente di iniezione (Fig. 1b) a diverse temperature di utilizzo.

Le misure che riguardano la purezza spettrale sono riportate in Fig. 2. In particolare Fig. 2a presenta il tipico segnale di battimento rivelato tra il THz QCL e uno dei denti che compongono il THz FCS. Poiché le emissioni che compongono il pettine di frequenze sono molto strette in frequenza, la larghezza del segnale rivelato si può attribuire in modo integrale al dispositivo in esame. Questa larghezza può essere misurata al variare del tempo di osservazione, come riportato in Fig. 2b. Grazie a questa analisi si evince un'ottima prestazione del nuovo dispositivo in termini di purezza spettrale. Infatti, con un tempo di analisi di 1 ms si misura una larghezza di emissione di circa 400 kHz.

I risultati ottenuti da questa caratterizzazione confermano che questi dispositivi sono utilizzabili anche come sorgenti per spettrometri molecolari ad alta risoluzione, o come oscillatori locali in sistemi eterodina. Inoltre questi nuovi

"teeth" of the frequency comb), whose absolute frequency is known with extreme accuracy. Measurements were taken by building a heterodyne system, able to compare the new source emission frequency with those of the frequency comb. In this way it was possible both to determine the absolute frequency of the THz radiation with an unprecedented accuracy of 4×10^{-10} (in other words, an error of approximately 1 kHz on 2.58 THz), and also to retrieve information about its spectral purity and the tunability parameters of the device. Measurements related to tunability are shown in Figure 1. The frequency of the radiation emitted by the THz QCL is continuously monitored with respect to temperature variations of the device (Figure 1a) and to the driving current (Figure 1b) at different experimental temperatures.

Measurements concerning spectral purity are shown in Figure 2. Specifically, Figure 2a represents the typical beat signal recorded between the THz QCL and one of the teeth of the THz FCS. As the emissions that make up the frequency comb are very narrow in frequency, the recorded signal width can be completely attributed to the device under investigation. This width can be measured at different time scales, as shown in Figure 2b. Results from this analysis indicate the great performance of this new kind of sources regarding spectral purity. In fact, with an analysis time of 1 ms, an emission width of about 400 kHz is measured.

The results obtained from this study confirm that these instruments can also be used as sources for high-resolution molecular spectrometers or as local oscillators in heterodyne systems. Thanks to the possibility of operating at room temperature (in other words, without using a cryogenic system), these new lasers, furthermore, can be transported and can therefore be

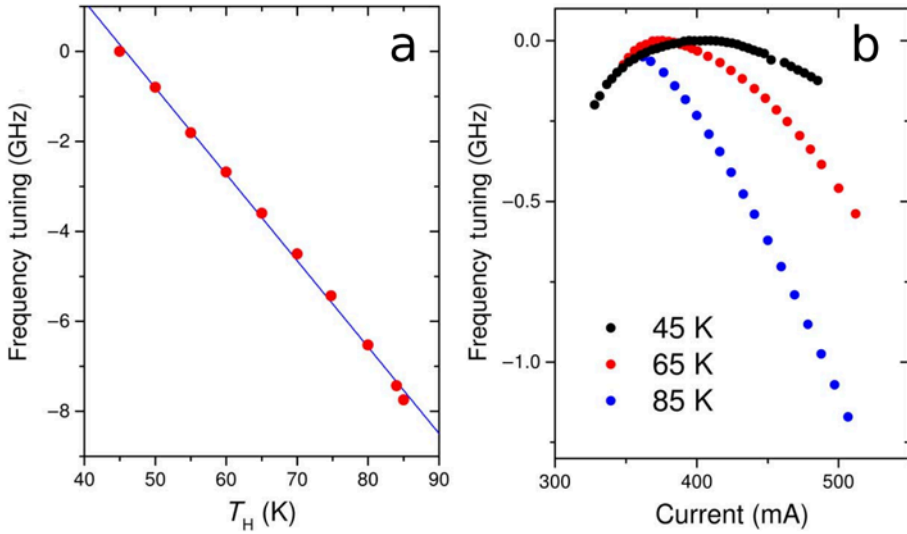


Figura 1. (a) Misura della accordabilità di emissione del dispositivo rispetto alla temperatura di operazione, si ricava un coefficiente di -193 MHz/K. (b) Accordabilità dell'emissione in funzione della corrente di iniezione. Il comportamento non è lineare, e le tre misure si riferiscono a diverse temperature di utilizzo.

Figure 1. (a) Frequency tuning measurements of the device vs operational temperature give a coefficient of -193 MHz/K. (b) Frequency tuning measurements vs input current. The retrieved trends are non linear, the three datasets were taken at three different operational temperatures.

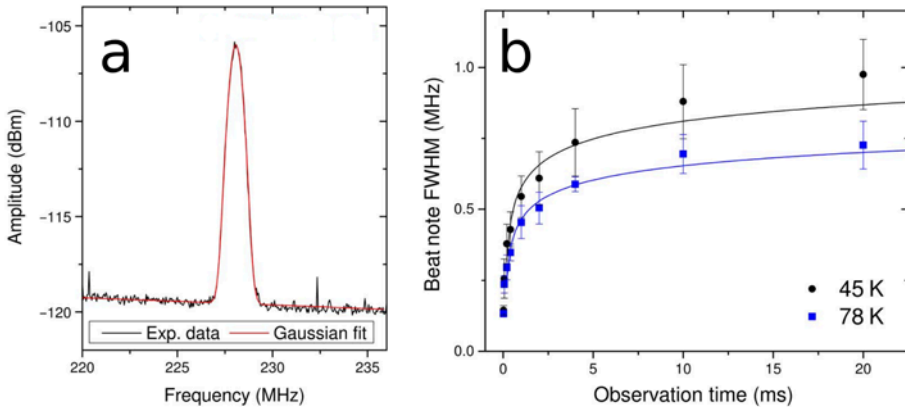


Figura 2. (a) Tipico profilo Gaussiano della nota di battimento rivelata tra la sorgente QCL e uno dei modi del THz FCS. (b) Misura della larghezza di emissione in funzione del tempo di osservazione e per due diverse temperature di utilizzo. Gli andamenti misurati sono logaritmici.

Figure 2. (a) Typical Gaussian profile of the beat note recorded between the QCL source and one of THz FCS modes (b) Measurements of emission width as a function of observation time and at two different operational temperatures. The retrieved trends are logarithmic.

laser, grazie alla possibilità di lavorare a temperatura ambiente (ovvero senza l'utilizzo di un sistema criogenico) hanno la possibilità di essere resi trasportabili e potranno dunque essere sfruttati per applicazioni 'sul campo', abilitando un gran numero di applicazioni tecnologiche e scientifiche fino ad oggi precluse.

Luigi Consolino. Ricercatore presso l'INO-CNR dal 2009. Dal 2011 si dedica alla ricerca fondamentale su dispositivi fotonici THz, sviluppando tecniche di spettroscopia THz e di rivelazione di singole specie molecolari, basate su laser a cascata quantica nel THz e sorgenti comb.

Saverio Bartalini. Ricercatore presso l'INO-CNR dal 2006. La sua attività recente ha riguardato principalmente lo studio e la caratterizzazione di laser a cascata quantica nel medio e lontano infrarosso, e lo sviluppo di tecniche di spettroscopia molecolare basate su tali sorgenti.

Paolo De Natale. Ricercatore presso l'INO-CNR dal 1996, direttore dello stesso Istituto dal 2007. Principali aree tematiche di interesse sono ottica non-lineare, fisica dei laser, spettroscopia di precisione di atomi e molecole, sensori ottici, sviluppo di sorgenti infrarosse innovative.

used for "field" applications, thereby making possible a number of technological and scientific applications that until now could not be carried out.

Luigi Consolino has been a researcher at INO-CNR since 2009. Since 2011 he has been conducting research on THz photonic instruments, developing techniques for THz spectroscopy and for detecting single-molecule species, based on Terahertz quantum cascade lasers and comb sources.

Saverio Bartalini has been a researcher at INO-CNR since 2006. His recent work mainly concerns research and characterization of quantum-cascade lasers in the mid and far infrared regions, as well as the development of techniques of molecular spectroscopy based on these sources.

Paolo De Natale has been a researcher at INO-CNR since 1996 and director of the Institute since 2007. His main areas of interest are nonlinear optics, laser physics, precision spectroscopy of atoms and molecules, optic sensors and development of innovative infrared sources.