

Phase-locking of a 2.7-THz quantum cascade laser to a mode-locked erbium-doped fibre laser
「モード同期エルビウム添加ファイバーレーザーに 2.7THz 量子カスケードレーザーの位相同期」

Stefano Barbieri , Pierre Gellie , Giorgio Santarelli , Lu Ding , Wilfried Maineult , Carlo Sirtori , Raffaele Colombelli , Harvey Beere & David Ritchie
Nature Photonics 4,636-640(2010)

Abstract

In this work, they have achieved phase-locking of a longitudinal mode of a 2.7-THz QCL, yielding an RF beat-note signal with 80 dB of signal-to-noise ratio and a bandwidth of 1 Hz. The technique takes advantage of the linear electro-optic effect to amplitude modulates a mode-locked femtosecond fiber laser. Their demonstration opened up new perspectives for the use of terahertz QCLs not just as stabilized local oscillator sources by using a femtosecond laser for phase-locking.

1. イントロダクション

モード同期フェムト秒レーザーは、光周波数領域と高周波領域間において安定で一貫性を持つ位相リンクとして光計測分野を革新した。本研究では、2.7THzの周波数と位相を持つ量子カスケードレーザー (QCL)[1]、繰り返し周波数90MHzのn次高調波に安定化されたモード同期エルビウム添加ファイバーレーザーを説明するためZnTeの電気光学効果を用いた。安定化量子カスケードレーザーの周波数と繰り返し周波数のビートはバンド幅1Hzで80dBのSN比を与える。その技術は広帯域で、周波数がフェムト秒レーザー (~5THz) のスペクトルバンド幅以内に下がるような量子カスケードレーザー源に適応可能である。さらに、それは超伝導ボロメータミキサよりむしろ軽くコンパクトなファイバー技術を用いた量子カスケードレーザーの異なる位相を制御するための理想ツールである[2][3]。

周波数と位相の安定化、ハイパワー、固体状態のテラヘルツ源は遠赤外光天文学や高精度分子ガス分光法からキャリア波に広範囲ワイヤレスリンクを提供する通信などのいくつかの異なった分野のアプリケーションに利用可能[4]。このTHz帯量子カスケードレーザーは1.2~4.5THzの周波数、10mWのパワー、液体窒素以上の温度で連続波の作動することが有望視されている。

2. 実験原理

安定化電子発振器のための THz-QCL の位相同期は、20GHz の発振器を 1.4993THz にアップコンバートした。そして、超伝導熱電子ボロメータを用いた 1.5005THz の QCL の周波数とミキシングされた。本研究は、類似技術を用いた 2.7THz-QCL の位相同期により従う。

上記で説明された同期技術は、高周波発振器に 100~200 の因数を掛ける必要がある。そのような最先端の乗算の使用には二つ不便な点がある。一つ目は、チェーンの端でスペクトルの同調が中心周波数の 10%に限定される点。二つ目は、ミキサ元素の選択が超伝導受信機に限定される点である。本稿では THz-QCL の位相同期が可能で、放射周波数にかかわらず乗算チェーンの使用なしでビート検出できる室温動作検出器を使用している。本質的に、モード同期レーザーのスペクトルは周波数 THz 間隔で並べられたコムから生成されることを利用する[5]。n 番目の周波数は

$$v_n = n \times f_{rep} + f_0 \quad (1)$$

により与えられる。n は整数、 f_0 は周波数オフセット、 f_{rep} は 100MHz の範囲で位置する。

実験で用いた検出技術は図 1 に示される。一般的な ZnTe, $\lambda/4$ と $\lambda/2$ の偏光子、偏光ビームスプリッターと高速バランスフォトダイオード検出器を用いる。THz-QCL とフェムト秒レーザービームは直線に偏光させ、同時に ZnTe 結晶に集光される。ZnTe 結晶の $\langle 1, -1, 0 \rangle$ 方向については 45° に向けられた。ポッケルス効果により、図 1 の光学装置を用いた ZnTe の組み合わせは THz-QCL の周波数 ($v_{QCL} = 2.7\text{THz}$) でフェムト秒レーザー光線の振幅を変調する。 $\lambda/4$ 板は ZnTe 結晶の残留複屈折性を補償する。この方法は、テラヘルツ放射が消失することによって、ZnTe 後のフェムト秒レーザーの偏光を楕円から直線偏光にする。最終的に $\lambda/2$ 板は PBS の軸 45° で直線偏光にする。PBS の出力の各光学ビームの振幅を示す回転角の近似は $E_{THz}(t) \times E_{opt}(t)$ に比例する。 $E_{THz}(t)$ と $E_{opt}(t)$ はテラヘルツとフェムト秒ビームの電場である。電気光学振幅変調器としてふるまう ZnTe+ $\lambda/4$ + $\lambda/2$ の組み合わせはテラヘルツ a.c. フィールドにより働く。

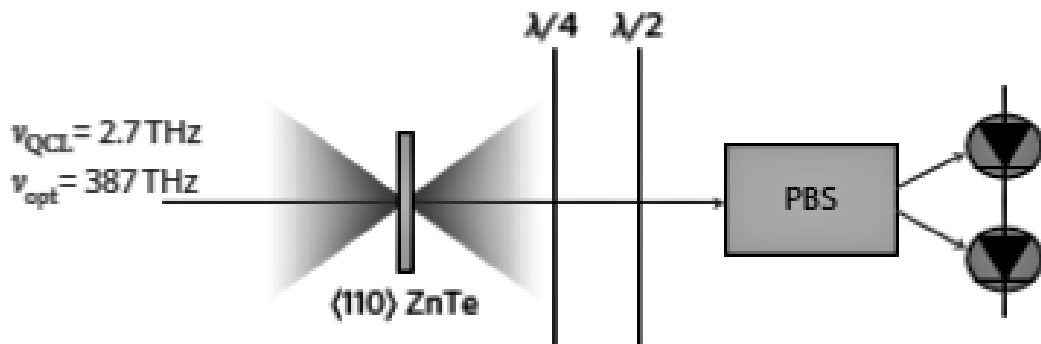


図 1 EO 検出のセットアップ

図 2 に検出技術の模式図を示す。シングルモード QCL 放射を前提とし、周波数範囲にお

いてこれは中心から $\pm v_{QCL}$ でのフェムト秒レーザースペクトルの両側上に二つの変調サイドバンドをもたらす。なぜなら、フェムト秒レーザーバンド幅 $\Delta_{BW} \approx 5\text{THz} > v_{QCL}$ であるため。したがって、フォトダイオードの二次検出の結果からいくつかの低周波数ビート振動は

$$\delta f_- = (v_{QCL} - n \times f_{rep}) \quad \delta f_+ = (n + 1) \times f_{rep} - v_{QCL} = f_{rep} - \delta f_-$$

ここで $f_{rep} = 90\text{MHz}$ で $n \times f_{rep}$ は最短高調波 v_{QCL} 。うなり発生器周波数オフセット f_0 は差し引かれる。 δf_- , δf_+ は v_{QCL} や f_{rep} に依存する。検出過程の効率に影響を与える大事なパラメータは THz とフェムト秒ビームの位相整合である。同様に電気光学係数は大きくなり、ZnTe の選択はフェムト秒レーザーの波長 775nm, 位相整合は 2.4THz で起こり、少なくとも 3THz まででの数ミリメートルのコヒーレント長をもたらすという事実により決定された。

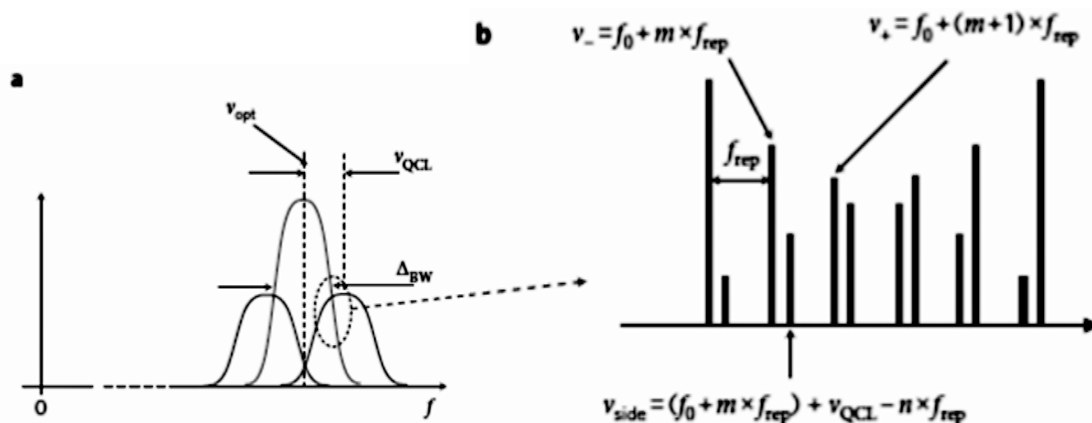


図2 検出技術の原理

線幅と光学フィードバックの効果

異なる FP モードによる RF ピーク間の分離は QCL と ZnTe 結晶間または焦点面内の QCL の移動による距離の変化により数十メガヘルツ移動する。そして、QCL の傾斜やテラヘルツビームの焦点ボケや減衰性といった単純な方法を用いる必要がある光学フィードバック効果によりもたらされる周波数を引く結果である。よって、フィードバックにより影響を受けるレーザーのフリーランニング線幅を除外できない。一方で、1MHz の RBW 限界線幅を 4ms のスイープ時間、約 3MHz/mA の電流同調で測定した。実際に、近赤外領域でファイバーベースのフェムト秒コムは典型的に 100kHz の線幅で、数秒のタイムスケールより上で 1MHz より下の周波数ドリフトを用いる。しかし、固有光学テラヘルツ周波数過程のため $n \times f_{rep} \approx 2.7\text{THz}$ での等価コム線幅は kHz 範囲の周波数ドリフトを用いて 1kHz である。

位相同期上追加縦モードの効果

QCL 縦モードの位相同期のため、縦 FP モードにより生成されたビート信号 (i) 十分に離れた (ii) 低強度は、重大な必要条件位相同期するうえで、つまみの役割として、線の周波

数は位相同期バンド幅 (1.5MHz) より大きな δf からの距離で, 同期された線より下の少なくとも 20dB の強度を用いるべきである.

位相同期パワー

数値的に, 1Hz から 1.5MHz の図 5b の正規化ビートスペクトルの積算中心周波数から同期ピークテラヘルツパワーの割合を予測した. そして, RBW (100kHz) による再スケーリングにより QCL パワーの 90% が効率的に位相同期することが分かった.

図 3b からパワーの 15mW は QCL の縦モードが集中する RBW (1MHz) で SN 比 20dB をもたらず (QCL はフリーランニング). (i) スペアナ上の信号は $(\delta I_{ph})^2 \approx (E_{THz} \times |E_{opt}|^2)^2 = P_{THz} \times (P_{opt})^2$ に比例し, (ii) ショットノイズ限界は P_{opt} に比例すると考え, QCL パワー (P_{THz}) と光学パワー (P_{opt}) を用いた直線的なスケールである RBW に与えられた SN 比を得た. これは, 三つの要因によるフォトダイオードにつき 20mW の光学パワーの増加を意味し, 1mW の QCL パワーは同期バンド幅で 13dB の SN 比を与える容認できるサイクルスリップ比 ($\sim 0.1s^{-1}$) を用いて位相同期を行うのに十分である.

3. 実験装置

本研究で使用された QCL は分子光線により成長した厚さ $12\mu m$ で, AlGaAs 系動作領域のものを用いた. デバイスは銅保持具へインジウムはんだづけされた 3mm シングルプラズモン導波管内に制作され, ヘリウムクライオスタット(凍結切片作成器)の冷却ヘッド上にネジで取り付けられた.

図 3a で本研究で用いられたデバイスの異なる温度下の CW 光学・電気特性を示す. 最大出力パワーは 27mW. 図 3b で 20K, 1.76A の電流において測定された放射スペクトルを示す. それは, 約 13GHz の空洞往復周波数により分離された五つの縦 FP モードで構成される. それぞれのモードの線幅はフーリエ変換赤外光光度計 ($0.25cm^{-1}$; 7.5GHz) の分解能により制限される.

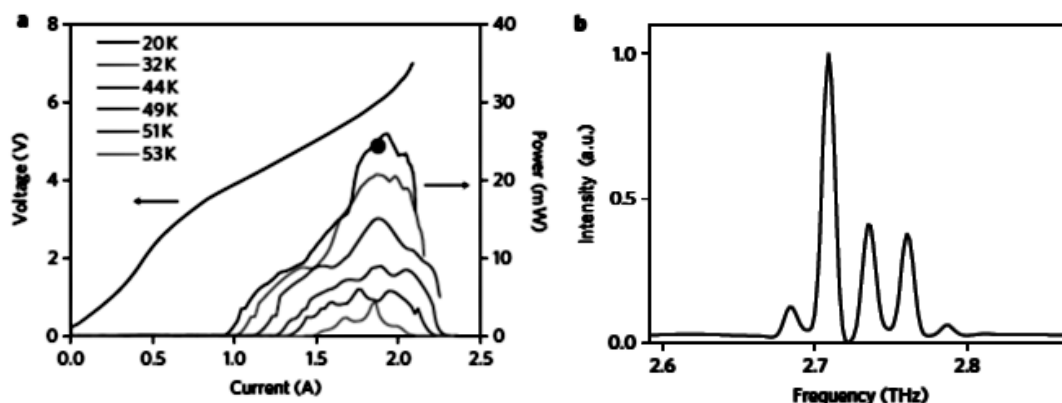


図 3 QCL の電気光学特性

位相同期の実験セットアップを図4に示す. THz-QCL 放射は二つの放物面鏡により厚さ1mm, $\langle 110 \rangle$ ZnTe 結晶に集光される. 150fs モード同期エルビウムファイバーレーザー (Toptica FFS) からの光線はまず β ホウ酸バリウム (BBO) 結晶を使用して周波数を二倍にして, テラヘルツ焦点上に重ね合わせた. PBS 後, 平均パワー6mW の二つの光学ビームはバランス検出器に集光された. そして, 光電流スペクトルはマイクロ波スペアナを用いてモニタリングした. 図4cで13msのスweep時間, 100kHzのRBWを用いた0-93MHz間隔で表示された高速RFスペクトルの図を示す. ここで, QCLは1.766Aの電流モードで動作し, 温度は 20 ± 0.01 Kで安定化された. 三つのピークの二つのグループははっきり可視化され, $f_{rep}/2$ (=44.6MHz) に関しては対照的に配置された. 図3bのTHz-QCLスペクトルから, それらはQCLのそれぞれ三つの縦FPモードからの δf_+ と $\delta f_- = f_{rep} - \delta f_+$ においてのうなりとして証明された. ピーク間の相対位置は保持されない. なぜなら THz モード間隔 (~13GHz) は90MHzよりとても広く, それぞれのモードは f_{rep} の最も近くの高調波と拍動しているからである. QCLの位相同期のため, バンド幅10MHz, 30MHzで中心を持つバンドパスフィルターは主信号についての低強度で偽のビート信号を抑えるため使用された. このQCLがシングルモードであることを免れたステップは効率的なクリーンビート信号を得るため重要である. フィルタリングの後, ビート信号は増幅され, RF ミキサを用いて周波数シンセサイザにより生成された $f_{RF} \approx 30$ MHzの参照信号と比較された. エラー信号 $f_{error} = f_{RF} - \delta f_-$ は高速位相同期電子装置に送り込まれ, THz-QCLバイアス電流の少ない比率を制御する.

バランス検出器

バランス検出機構は二つの広域シリコンフォトダイオード (Hamamatsu S3399) とトランスインピーダンスアンプから成る. バンド幅は300MHz. バランス検出は効率的にd.c.近くから $f_{rep}/2$ の過剰ノイズを抑制する.

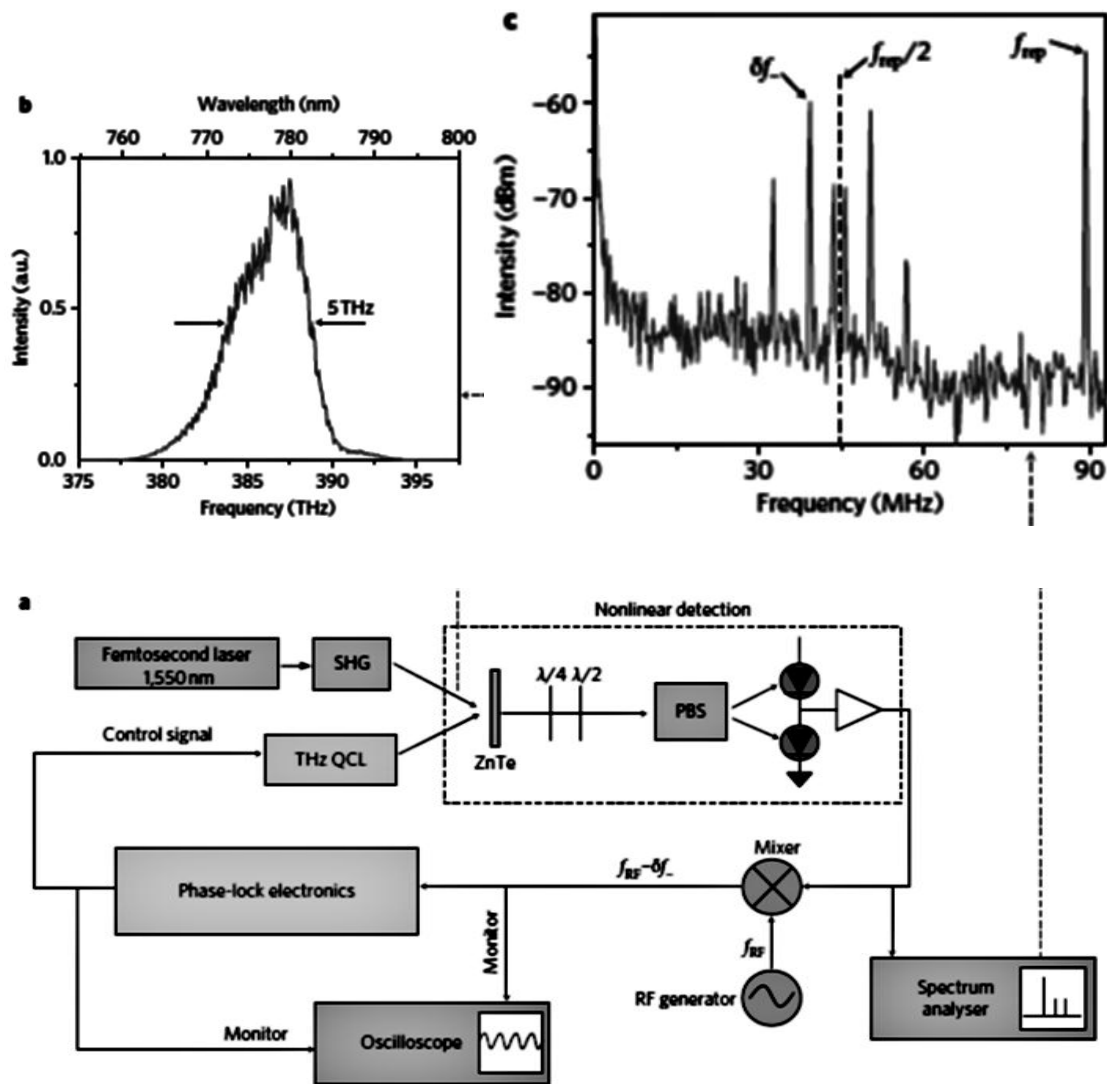


図4 実験セットアップ

4. 実験結果

図5で、1MHz から 1Hz に減少するスペクトラムアナライザのスペクトル分解能 RBW を用いて非同期 (図5 a) と同期 (図5 b-d) ビート信号の RF スペクトルを報告する. 図5 b から位相同期の制御バンド幅は 1.5MHz とわかる. すべてのスペクトルのためのビートの最大強度は 25dBm, RBW を用いたノイズフロアスケール, 1MHzRBW を用いた 45dBm から 1HzRBW を用いた 104dBm. 図5 b から QCL 縦モードパワーの 90% 近くは f_{rep} の第 n 高調波へ位相同期されている.

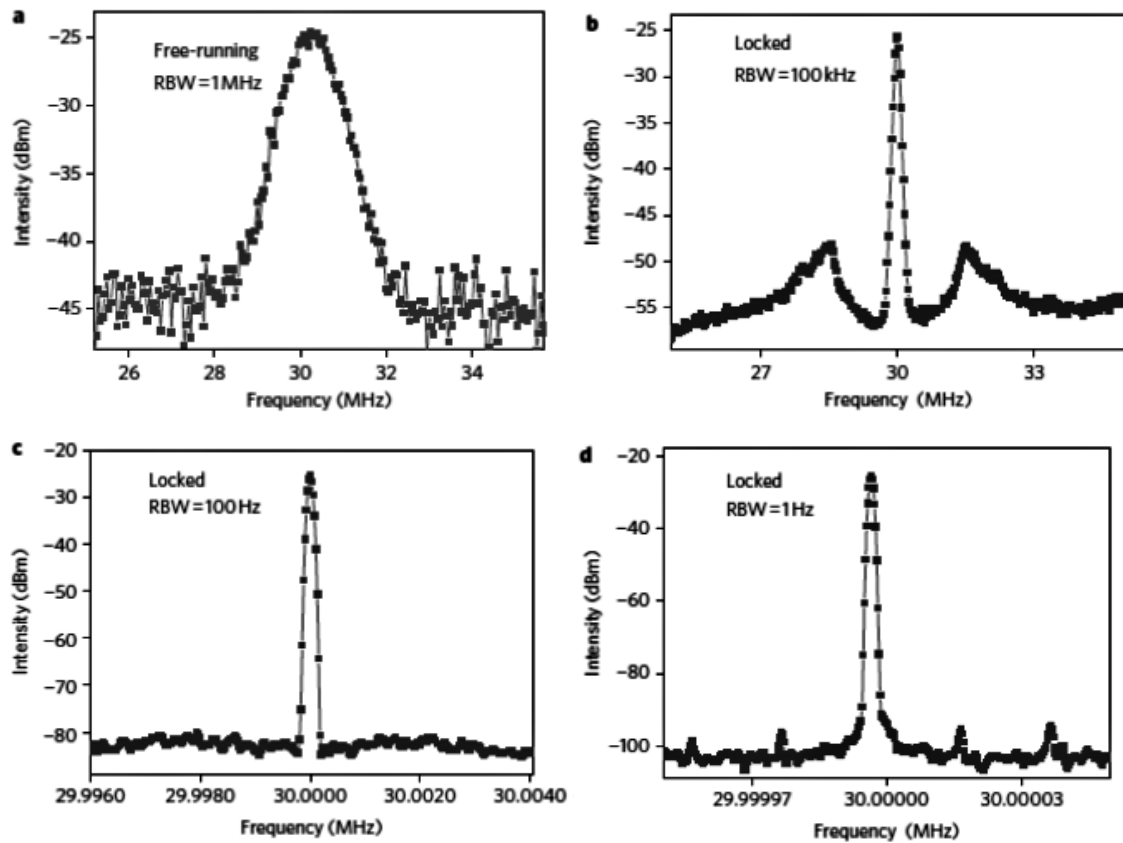


図5 実験結果

5. 結論

結論として、2.7THz-QCLの縦モードの位相同期、SN比80dBのRFビート信号と1Hzのバンド幅を達成した。その技術はモード同期フェムト秒ファイバーレーザーを増幅変調するため線形電気光学効果を利用している。また利用図のポイントから、非安定化局部発振器源であるTHz-QCLの利用の新しい展望が開拓された。さらに、位相同期フェムト秒レーザーを使うことの二つの利点がある。一つは、二つかそれ以上のQCLの位相同期を同時に同じフェムト秒レーザーで出来る点。二つ目は、光ファイバーを用いてフェムト秒レーザー信号を送れる点である。

6. コメント

本研究ではTHz-QCLをファイバーレーザーを用いて位相同期させることで周波数と位相を安定化させている。またEO結晶を用いてビート信号を検出しており、SN比80dB・バンド幅1Hzを達成している。EO検出を用いたTHzスペアナはやっていないので自分でも構築してPCA検出の場合と比較したいと考える。また、THz-QCLを使用した周波数計測にもチャレンジしたい。

7. 参考文献

- [1] Barbieri, S. et al. 2.9 THz quantum cascade lasers operating up to 70 K in continuous wave. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1674–1676 (2004).
- [2] Rabanus, D. et al. Phase locking of a 1.5 THz quantum cascade laser and use as a local oscillator in a heterodyne HEB receiver. *Opt. Express* **17**, 1159–1168 (2009).
- [3] Khosropanah, P. et al. Phase locking of a 2.7 THz quantum cascade laser to a microwave reference. *Opt. Lett.* **34**, 2958–2960 (2009).
- [4] Köhler, R. et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser. *Nature* **417**, 156–159 (2002).
- [5] Yasui, T. et al. Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based, terahertz-comb-referenced spectrum analyzer. *Opt. Express* **17**, 17034–17043 (2009).