

Phase-locking the quantum cascade laser to the femtosecond laser

H25.5.15

M1 林 建太

イントロダクション

量子カスケードレーザー

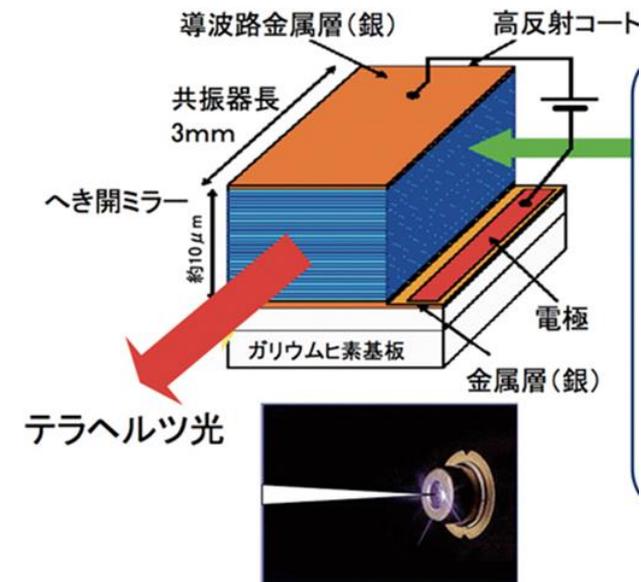
→半導体中のバンド構造の制御によって, 中赤外からテラヘルツ領域の広い範囲で任意の周波数を発振可能

利点

小型, 高出力, 室温動作可能



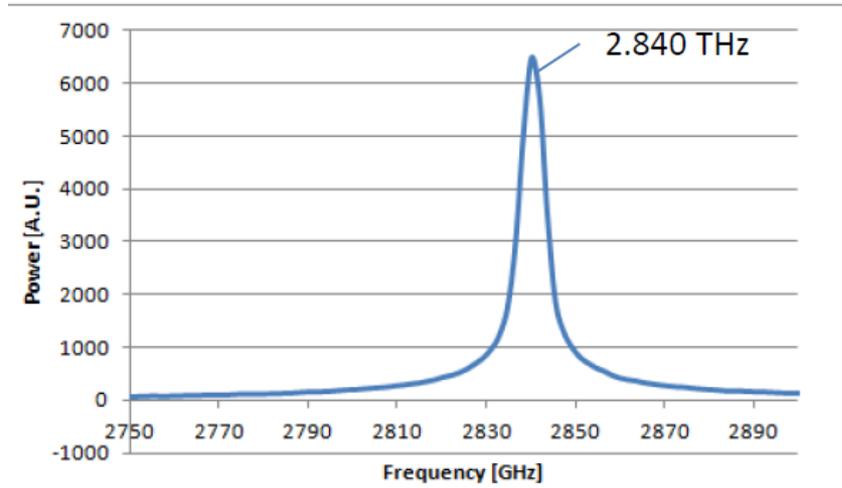
- ガス分光,
- イメージング用光源として注目されている



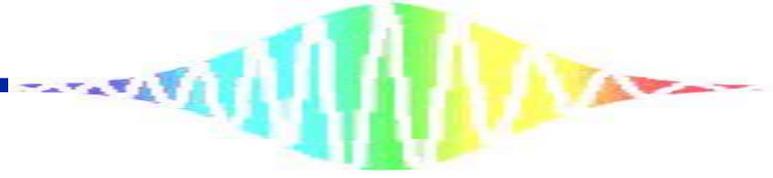
イントロダクション

しかし・・・

フリーランニング量子カスケードレーザーの
線幅は数メガ～数ギガヘルツ



ガス分光などに利用する
場合、もっと狭い発振線
幅が求められる

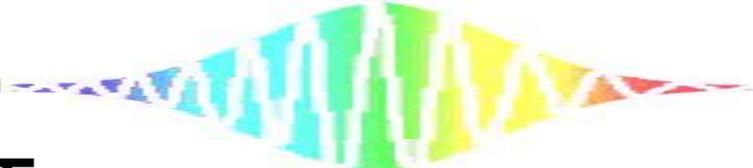


そこで . . .

非常に安定した繰り返し周波数を持つ
レーザーと位相同期

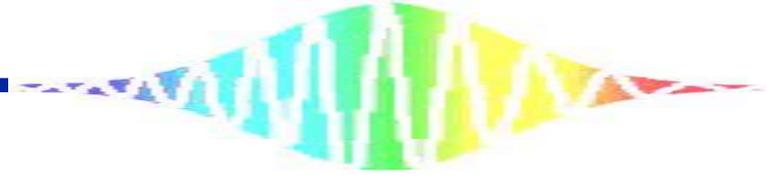
⇒量子カスケードレーザーの周波数揺ら
ぎが抑えられ, 発振線幅の狭窄化ができる

これによりガス分光などのアプリケー
ションとして利用可能になる



紹介論文

1. M. Ravano, V. Jagtap, G. Santarelli, C. Sirtori, L. H. Li, S. P. Khanna, E. H. Linfield, and S. Barbieri. **"Continuous-wave coherent imaging with terahertz quantum cascade lasers using electro-optic harmonic sampling"**. APPLIED PHYSICS LETTERS **102**, 091107 (2013)
2. I. Galli, M. Siciliani de Cumis, F. Cappelli, S. Bartalini, D. Mazzotti, S. Borri, A. Montori, N. Akikusa, M. Yamanishi, G. Giusfredi, P. Cancio, and P. De Natale. **"Comb-assisted subkilohertz linewidth quantum cascade laser for high-precision mid-infrared spectroscopy"**. APPLIED PHYSICS LETTERS **102**, 121117 (2013)
3. S. Barbieri, M. Ravano, P. Gellie, G. Santarelli, C. Manquest, C. Sirtori, S. P. Khanna, E. H. Linfield and A. G. Davies. **"Coherent sampling of active mode-locked terahertz quantum cascade lasers and frequency synthesis"**. NATURE PHOTONICS **5**, 306-313 (2011)



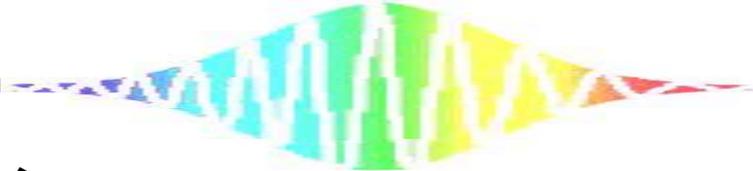
M. Ravaro, V. Jagtap, G. Santarelli, C. Sirtori, L. H. Li,
S. P. Khanna, E. H. Linfield, and S. Barbieri

Continuous-wave coherent imaging with
terahertz quantum cascade lasers

using electro-optic harmonic sampling

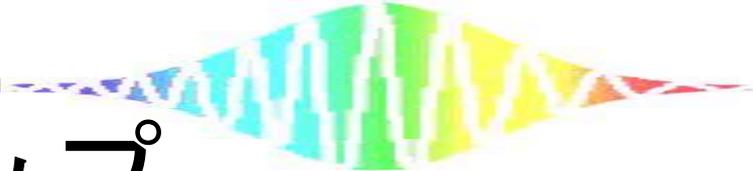
「電気光学高調波サンプリングを使用したテ
ラヘルツ量子カスケードレーザーのCWコヒー
レントイメージ」

APPLIED PHYSICS LETTERS **102**, 091107 (2013)



イントロダクション

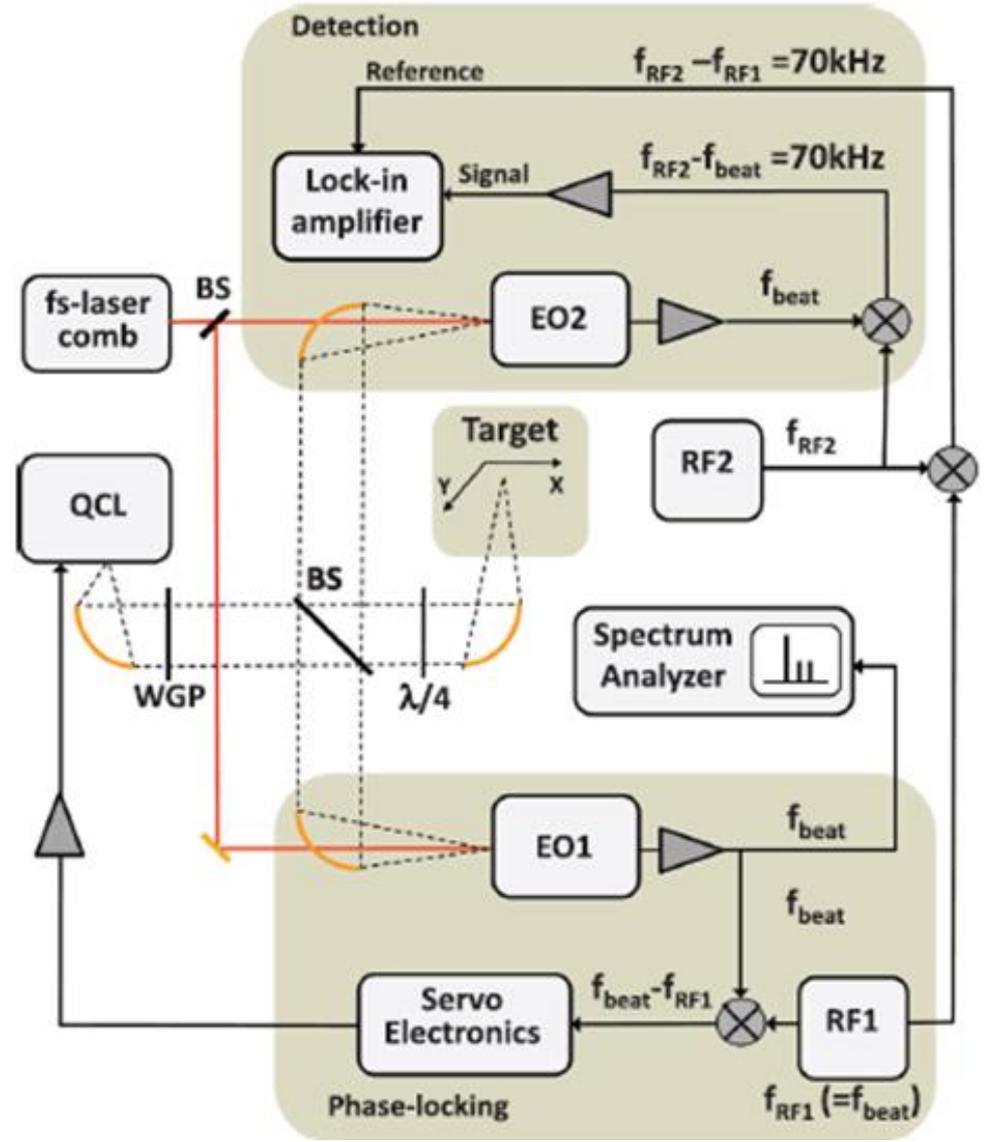
- THz-QCLは数kHzの量子ノイズ限界線幅を持つ
- それにより線拡がりや周波数ドリフトが発生
- フェムト秒レーザーの繰り返し周波数と位相同期することでTHz-QCLを安定化
→本論文ではイメージングを行っている



セットアップ

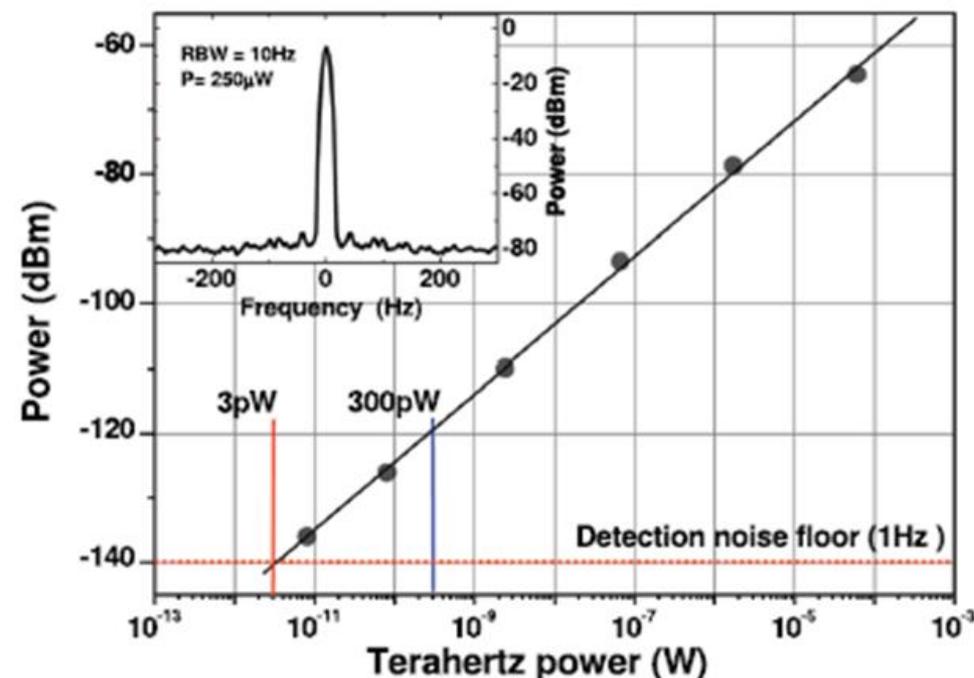
フェムト秒ファイバー
レーザー
中心波長 780nm
繰り返し周波数
~250MHz

THz-QCL
出力 約2mW
(2.5THz)

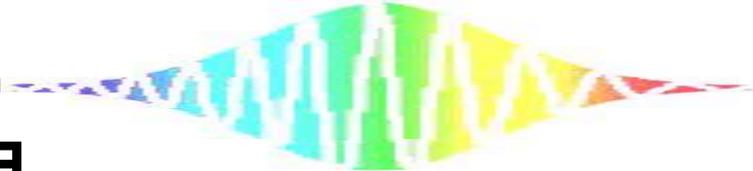


実験結果

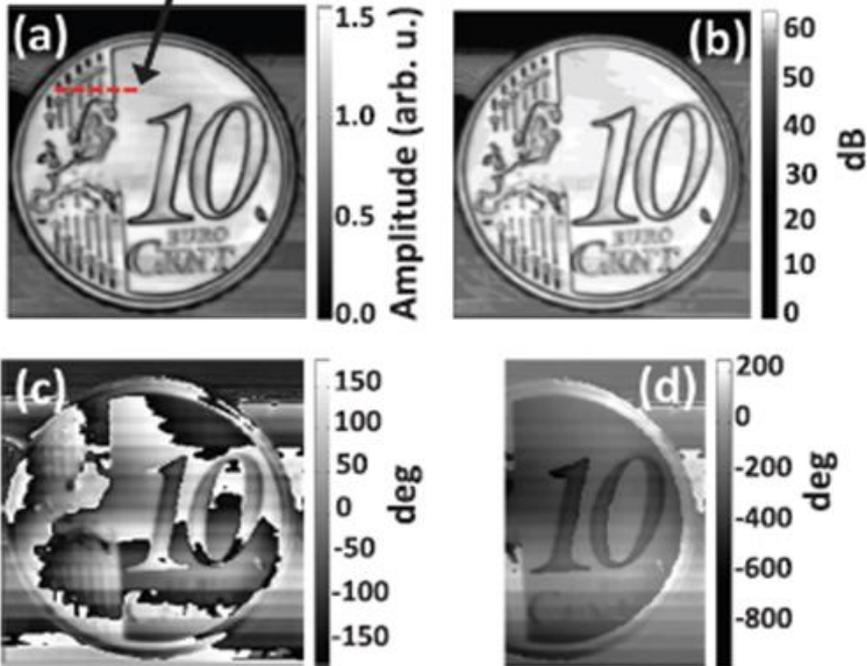
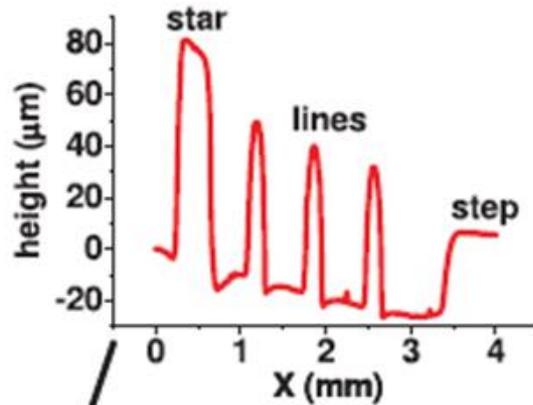
- スペアナ (RBW10Hz)
THzパワー250 μ Wでの
EO1における位相同期
ビート信号



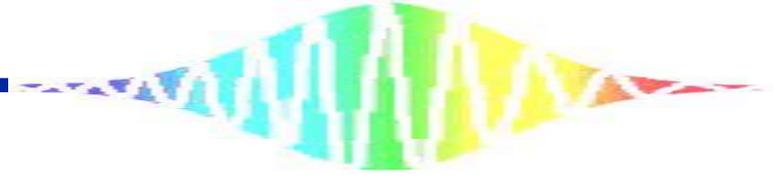
- スペアナ (RBW1Hz) で
EO2の出力
(パワーはA4の紙を重ね
60 μ W~10pWとする)
→検出限界THzパワーは
3pW



実験結果

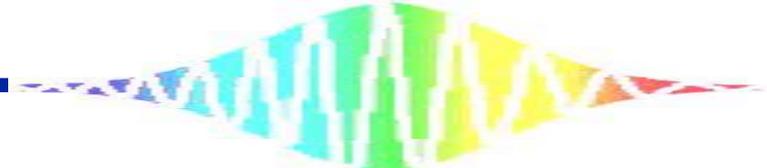


- 10セントユーロコインのイメージ
- スキャン速度2.2mm/s, 送り100 μ m,
- ロックイン時間30ms, ダイナミックレンジ60dB



まとめ

- フェムト秒レーザーコムとTHz-QCLの位相同期, コヒーレントイメージングを行った
- 3pW/Hz のノイズ検出限界を得た



I. Galli, M. Siciliani de Cumis, F. Cappelli, S. Bartalini, D. Mazzotti,
S. Borri, A. Montori, N. Akikusa, M. Yamanishi, G. Giusfredi,
P. Cancio, and P. De Natale

Comb-assisted subkilohertz linewidth quantum cascade laser

for high-precision mid-infrared spectroscopy

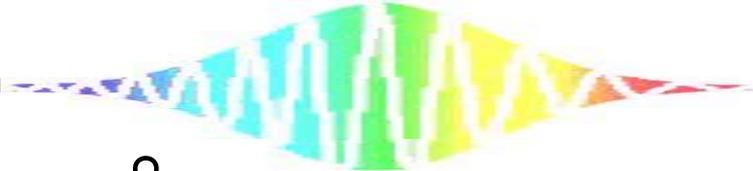
「高精度中赤外分光法のためのコムアシスト型サブkHz線幅の量子カスケードレーザー」

APPLIED PHYSICS LETTERS **102**, 121117 (2013)

イントロダクション

フリーランニング中赤外QCLでは数MHzの線幅

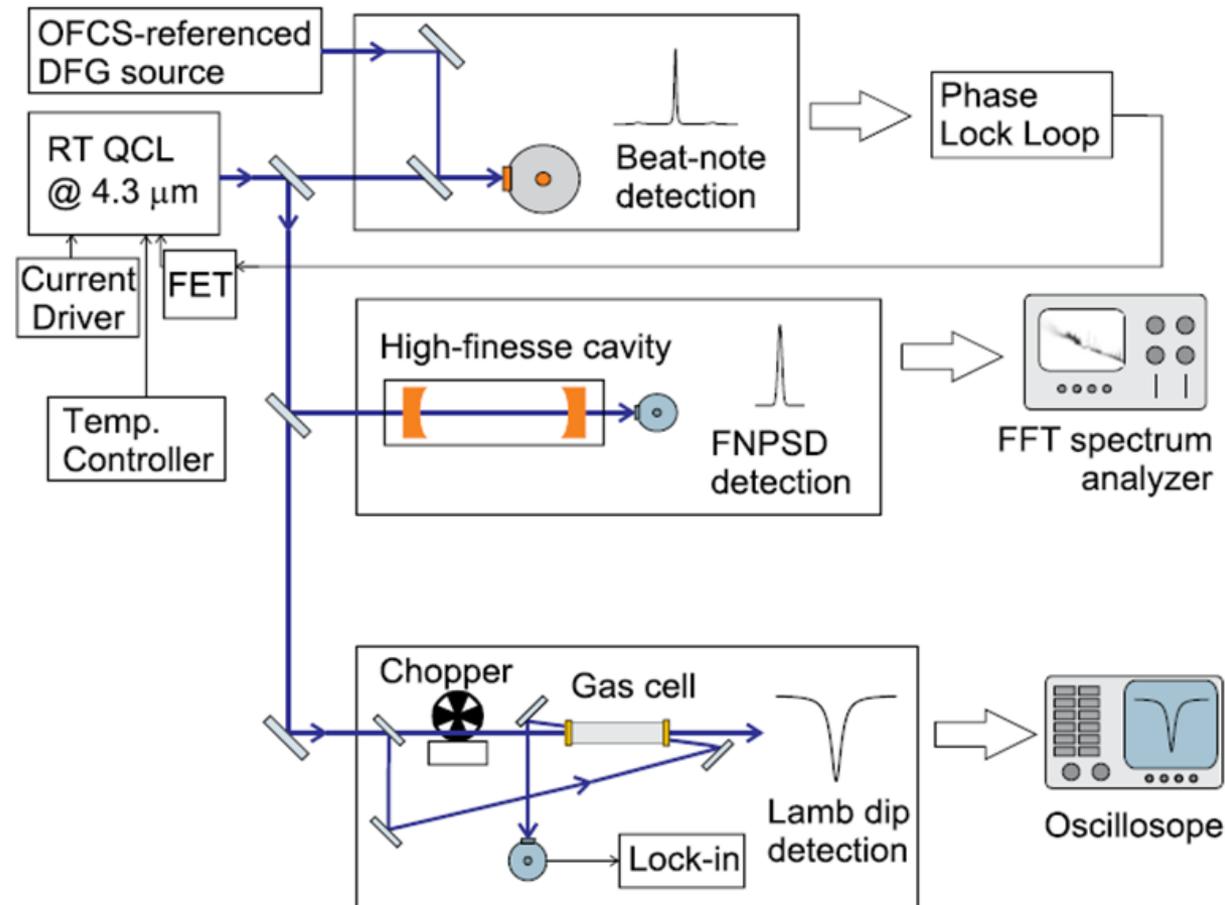
- 分子の吸収線に中赤外QCLを周波数同期
 - QCLの絶対周波数が決まる
 - 線幅の狭窄化

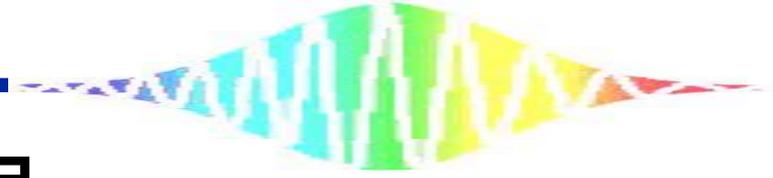


セットアップ

DFG(差周波発生)
Nd:YAGレーザー
(1064nm),
ECDL(854nm)

QCL(中赤外)
出力 5mW (4.3 μ m)
温度 283K
電流 710mA

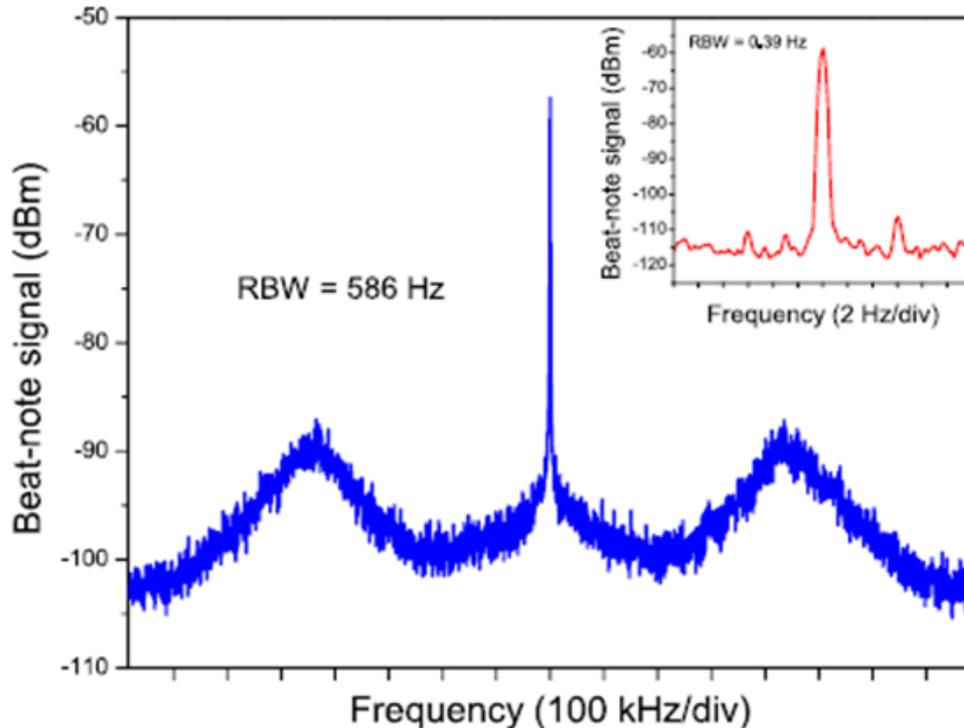




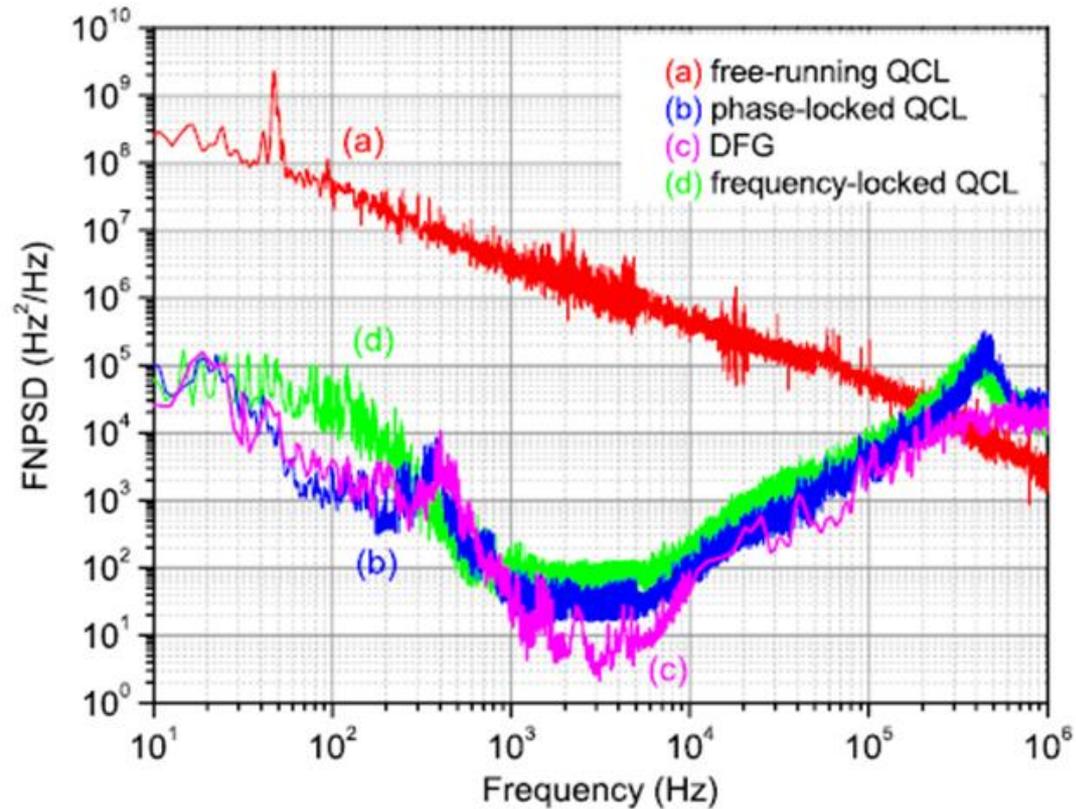
実験結果

FFTスペアナで得られたビート信号

→位相同期がかかっている

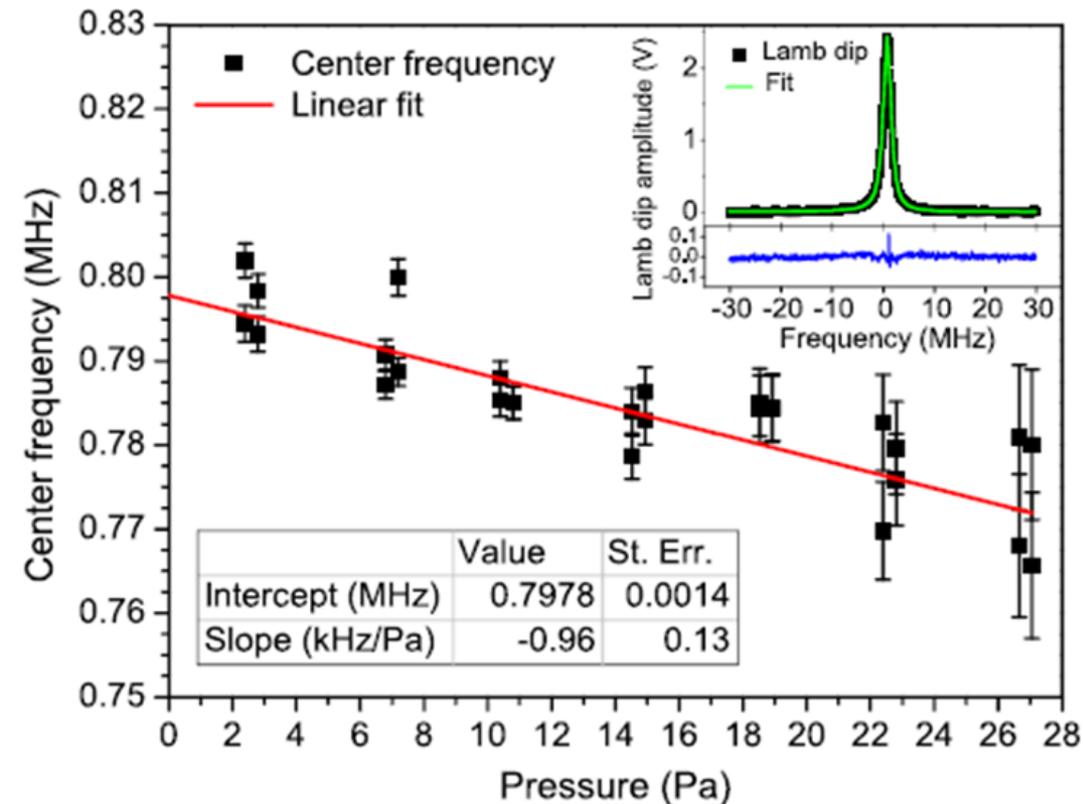


実験結果

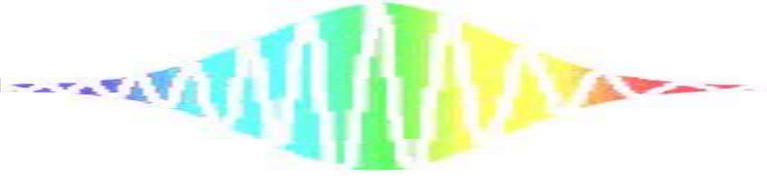


- 周波数ノイズの
パワースペクトル
密度
- 250kHzの同期バ
ンド幅

実験結果

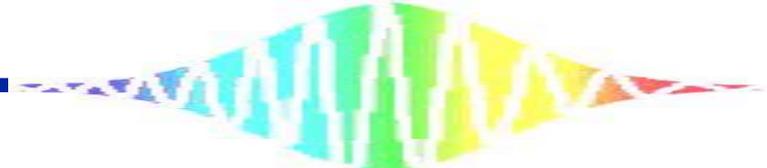


- ロックイン時間
10ms, チョッパー
周波数616Hz,
50kHzステップで
60MHzスキャン
- CO₂ガス圧力
2~27Pa



まとめ

- 本稿では, 中赤外QCLとOFCSでリファレンスしたDFGの位相同期を行った
- 0.56radの位相雑音での250kHzのバンド幅は, サブkHz線幅のQCL放射をもたらす



S. Barbieri, M. Ravarolo, P. Gellie, G. Santarelli,
C. Manquest, C. Sirtori, S. P. Khanna, E. H. Linfield
and A. G. Davies

Coherent sampling of active mode-locked
terahertz quantum cascade lasers and
frequency synthesis

「アクティブモード同期THz-QCLのコヒーレン
トサンプリングと周波数合成」

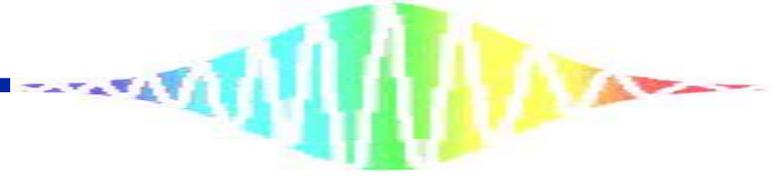
NATURE PHOTONICS **5**, 306-313 (2011)

イントロダクション

インジェクションロック・・・もともと
CWの技術

⇒パルスのTHz-QCLに用いて位相同期を
行う

線幅の狭窄化を確認する

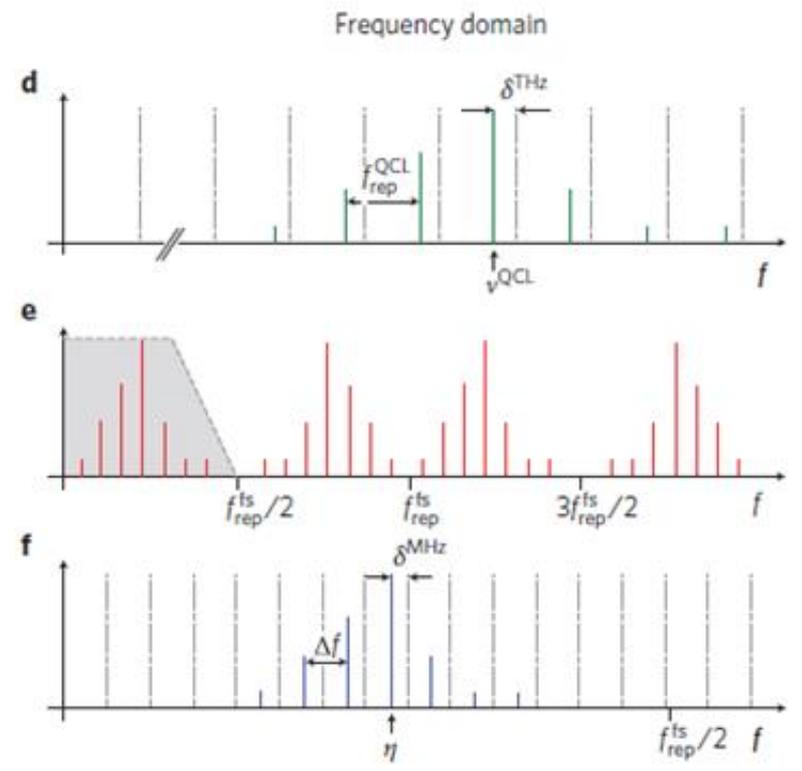
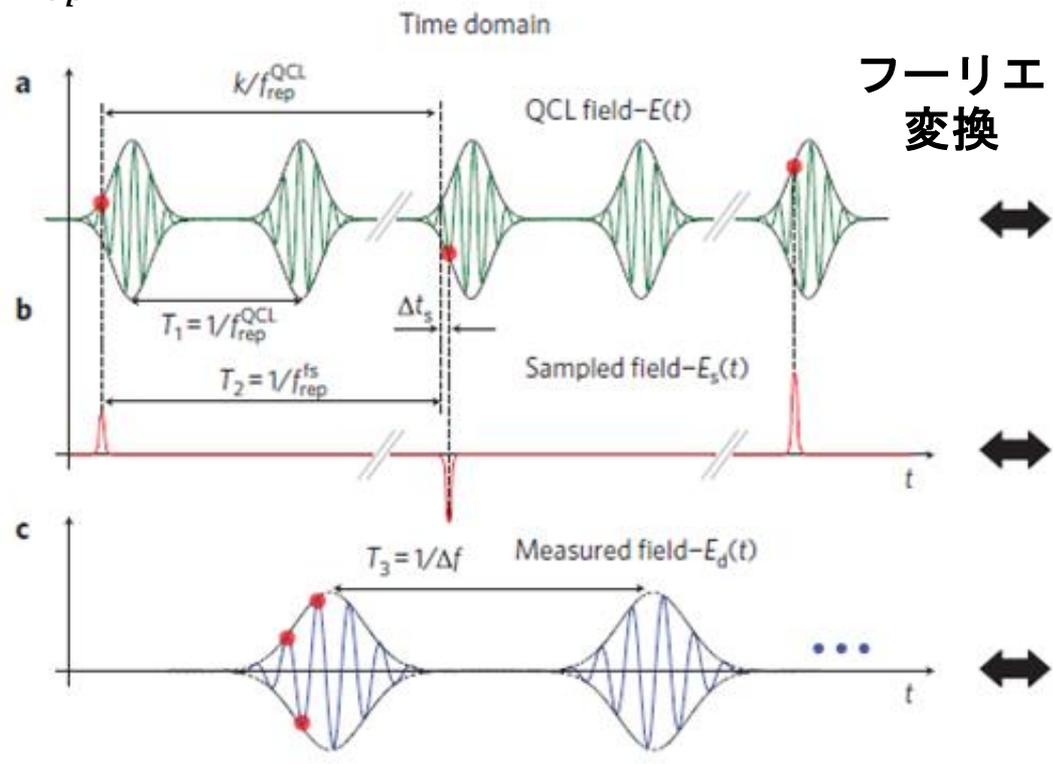


$$f_{rep}^{QCL} = 13.3\text{GHz}$$

$$\nu_{QCL} = 2.5\text{THz}$$

$$f_{rep}^{fs} = 96.5\text{MHz}$$

原理

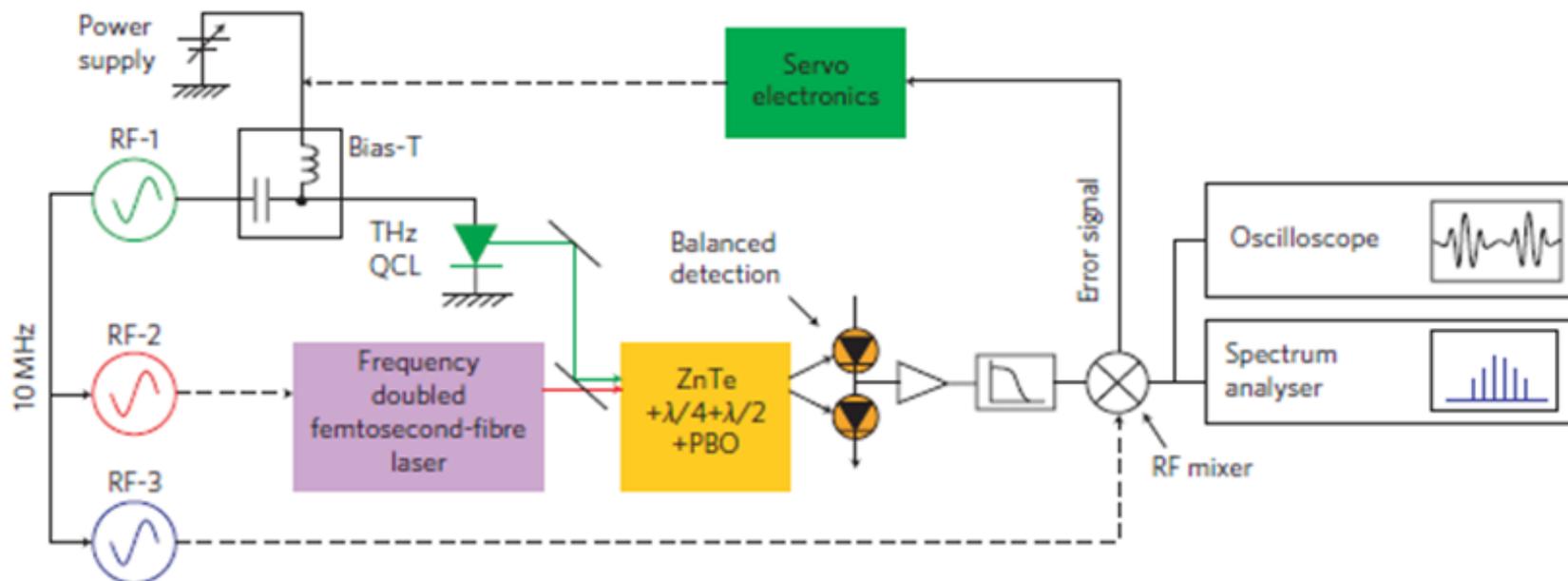


C. ダウンコンバートTHzパルス列

$$\eta = \nu_{QCL} - r \times f_{rep}^{fs} \quad r = \text{int}(\nu_{QCL} / f_{rep}^{fs})$$

$$\Delta f = f_{rep}^{QCL} - k \times f_{rep}^{fs} \quad k = \text{int}(f_{rep}^{QCL} / f_{rep}^{fs})$$

セットアップ



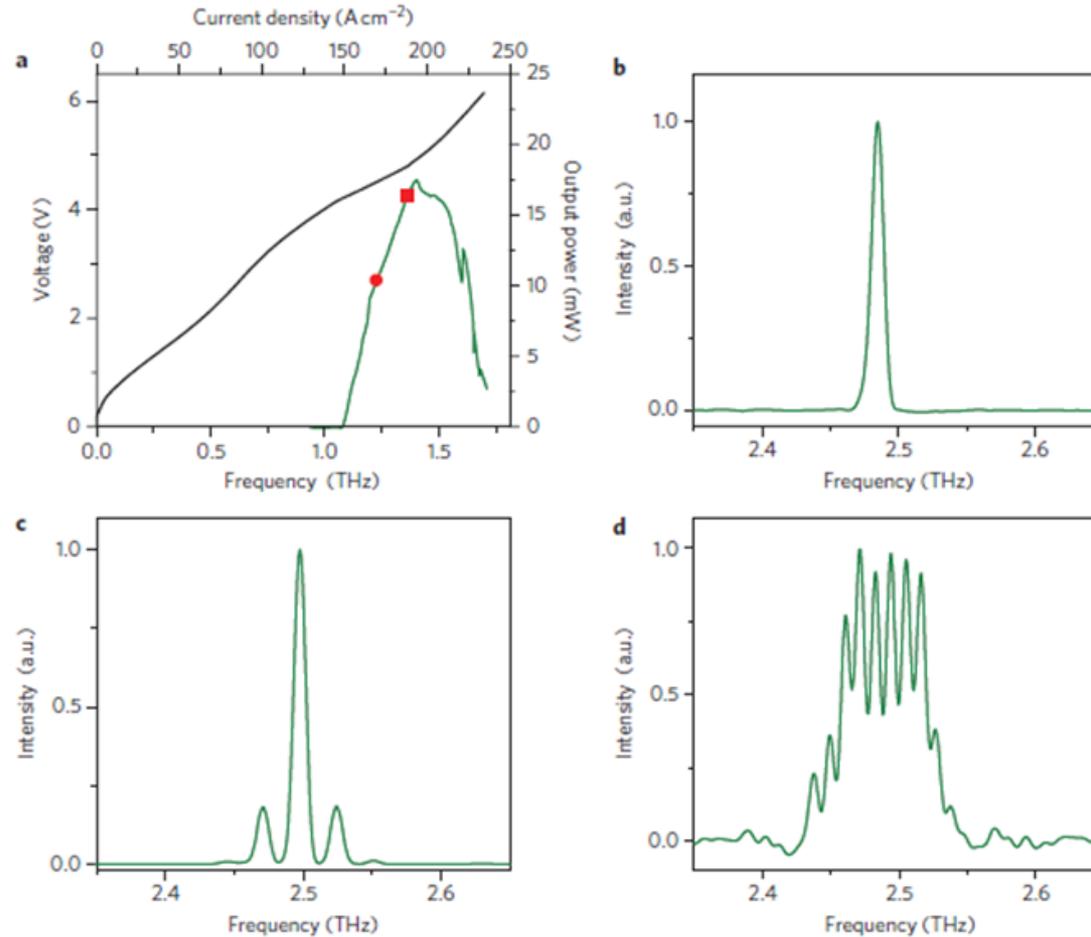
- フェムト秒ファイバーレーザー

波長775nm, パルス幅100fs, 繰り返し周波数96.513MHz, 平均出力50mW

- THz-QCL

パルスの繰り返し周波数13.3GHz, キャリア周波数2.5THz

THz-QCL 電気-光学特性



(a) 電圧-電流特性(黒線)と出力-電流特性(緑線)

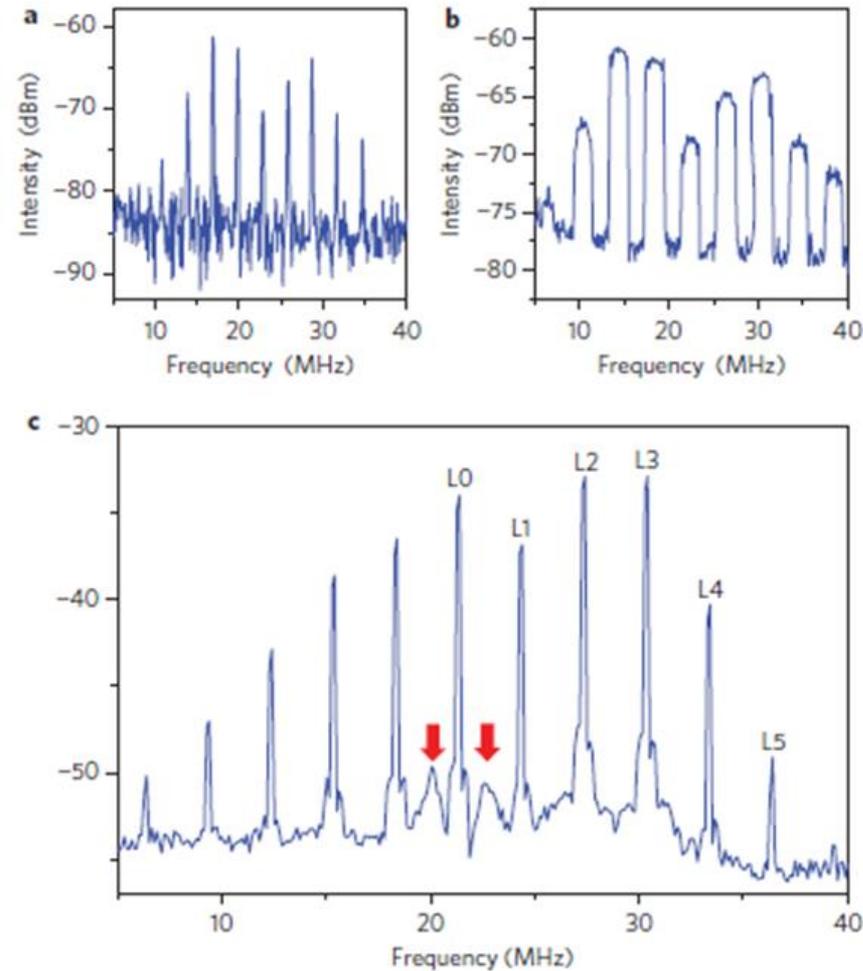
(b) 1.24Aの時のスペクトル

(c) 1.35Aの時のスペクトル

(d) RF-1のパワーを +10dBm

図b~d. FT-IRスペクトルメーターによって測定(スペクトル分解能7.5GHz)

実験結果



(a) スペアナ (RBW100kHz, スイープ時間5.5ms)

$$\Delta f = f_{RF1} - 138 \times f_{rep}^{fs} = 3\text{MHz}$$

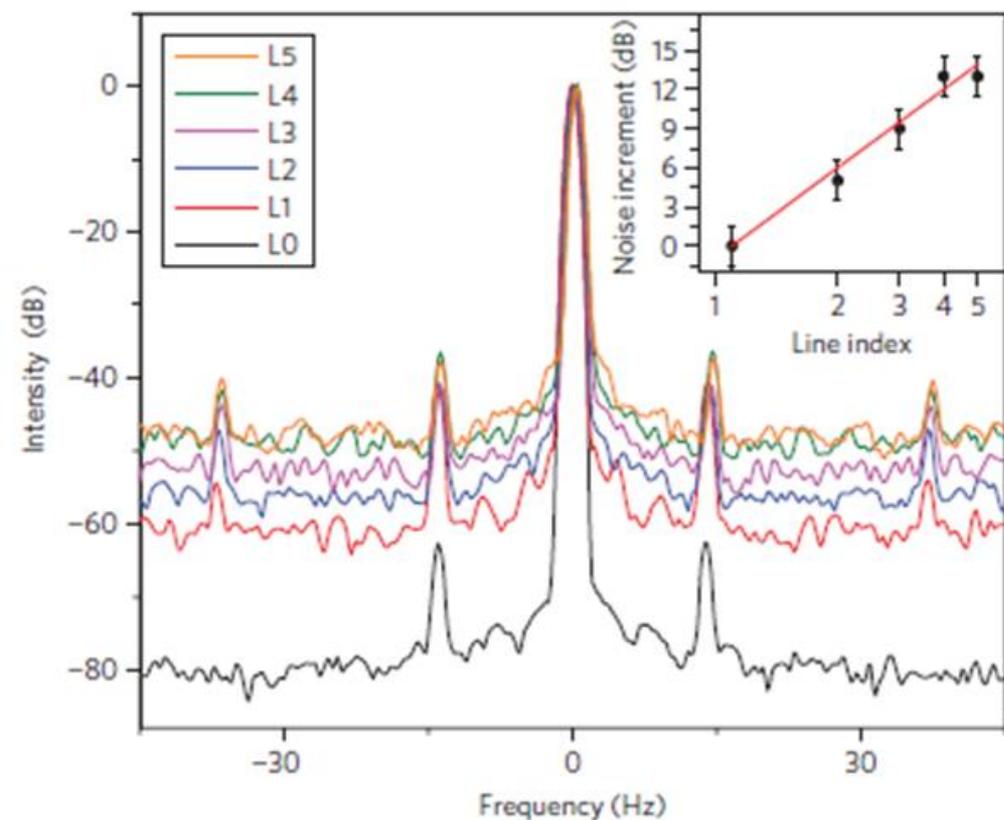
(b) Max-Hold ON

→位相同期がかかっていない

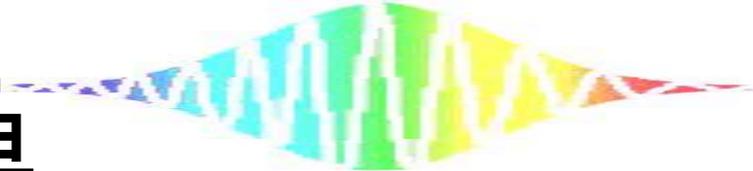
(c) f_{rep}^{fs} と ν_{QCL} の位相同期もする

→完全な位相同期

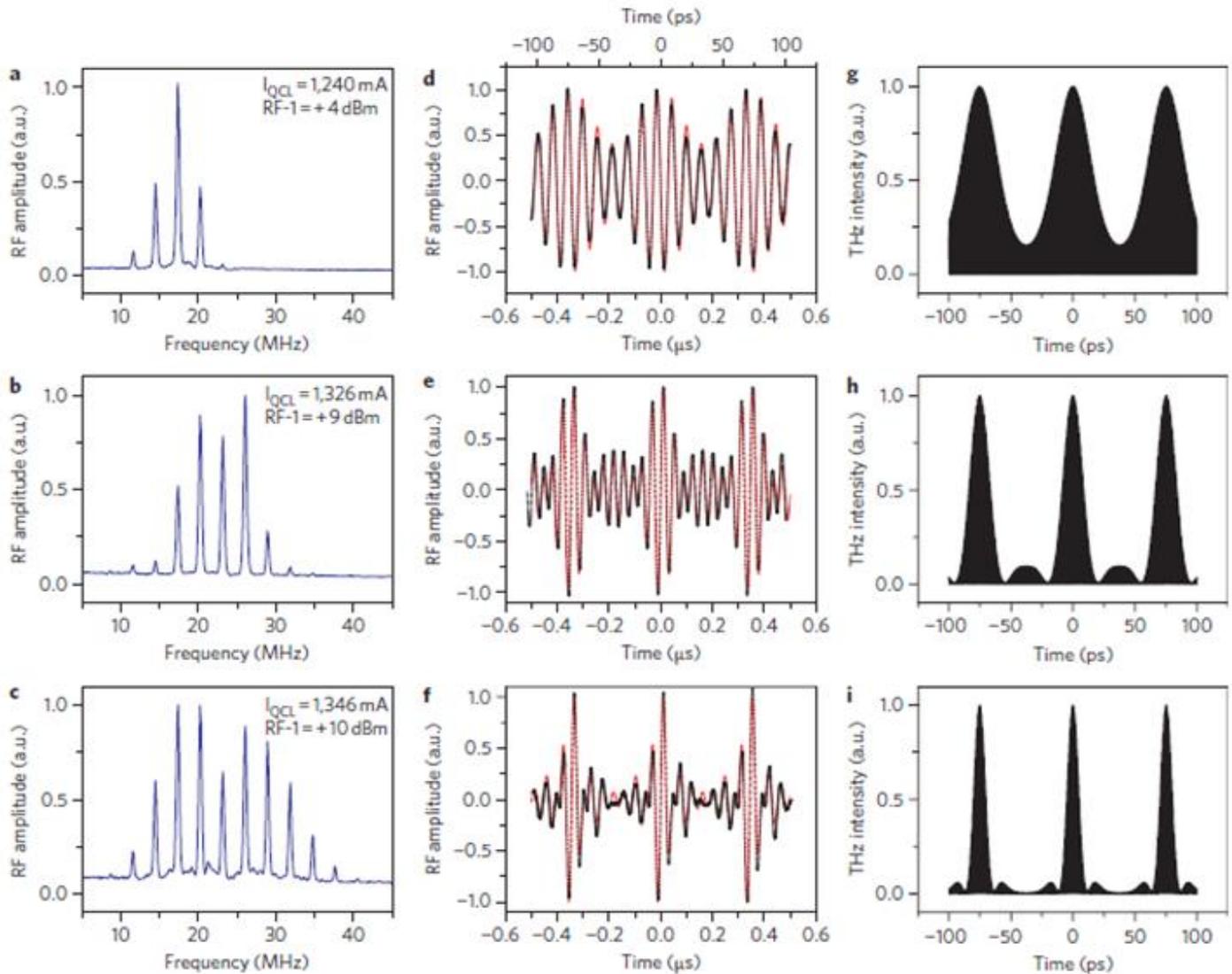
実験結果



- L0~L5の正規化スペクトル(RBW1Hz)を示す
 - L0から離れると位相ノイズが増加
 - その増加が赤線の理論直線と一致
- OCLとRF-1のインジェクションロックが証明



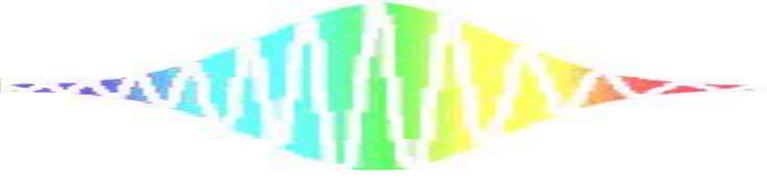
実験結果



周波数スペクトル

時間スペクトル

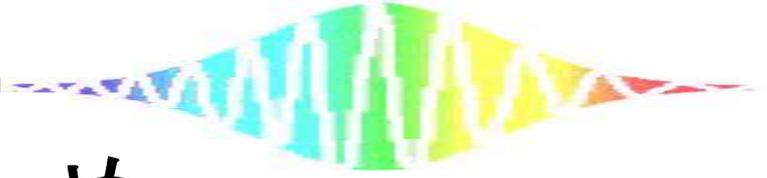
強度スペクトル



まとめ

- RF-1とTHz-QCLをインジェクションロック
- THz-QCL, RF-3とフェムト秒ファイバーレーザーの繰り返し周波数の位相同期

このシステムは分光や, イメージングのアプリケーションとして期待される



全体のまとめ

- フェムト秒レーザーの繰り返し周波数とQCLの位相同期だけではなく、インジェクションロックという概念を紹介した
- これによりQCLの安定化, 線幅の狭窄化を達成した