

Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers

H25年度 後期雑誌会

M1 林 建太

イントロダクション

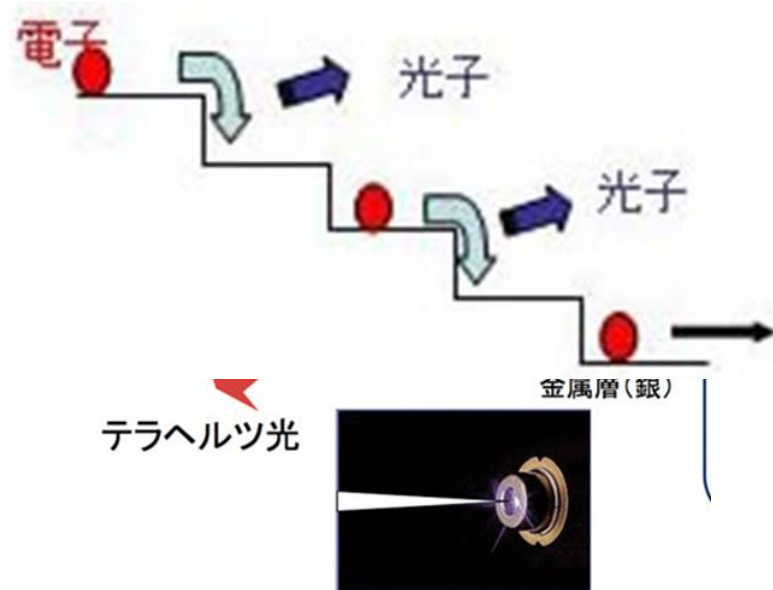
量子カスケードレーザー

→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

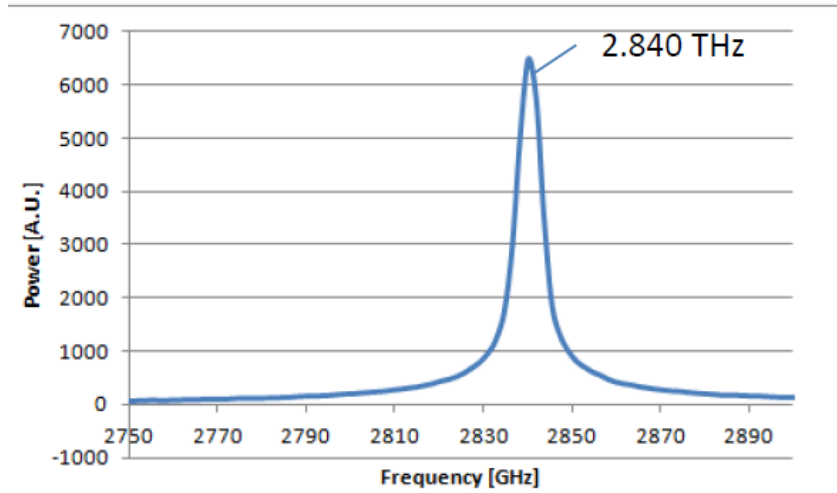
- ガス分光
- イメージング用光源として注目されている



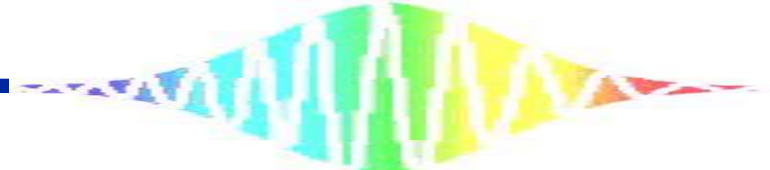
イントロダクション

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



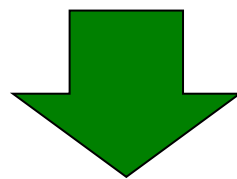
ガス分光などに利用する
場合, もっと狭い発振線
幅が求められる



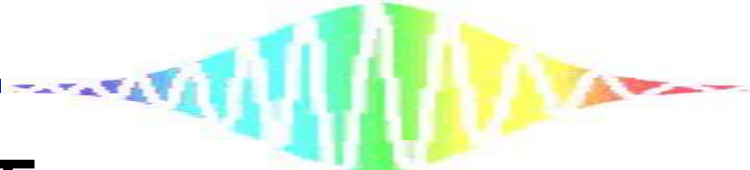
インジェクションロック

非常に安定した信号を注入(インジェクション)し, 同期させる

⇒量子カスケードレーザーの周波数揺らぎが抑えられ, 線幅の狭窄化ができる (注入信号に依存)

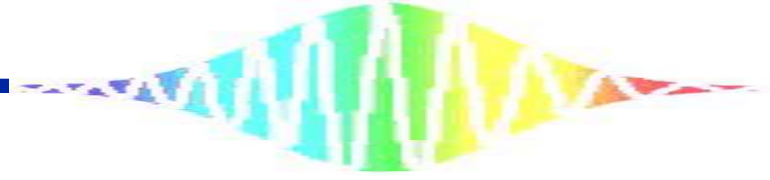


これによりガス分光などのアプリケーションとして利用可能になる



紹介論文

1. M. H. Zadeh and K. J. Vahala, "Observation of injection locking in an optomechanical rf oscillator". *APPLIED PHYSICS LETTERS*, **93**, 191115 (2008)
2. P. Gellie, S. Barbieri, J. Lampin, P. Filloux, C. Manquest, C. Sirtori, I. Sagnes, S. P. Khanna, E. H. Linfield, A. G. Davies, H. Beere and D. Ritchie, " Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers up to 35GHz using RF amplitude modulation". *OPTICS EXPRESS*, **18**, 20799-20816 (2010)
3. C. Wang, F. Grillot, V. Kovanis, J. Bodyfelt and J. Even, " Modulation properties of optically injection-locked quantum cascade lasers". *OPTICS LETTERS*, **38**, 1975-1977 (2013)



M. H. Zadeh and K. J. Vahala,

“Observation of injection locking in
an optomechanical rf oscillator”

APPLIED PHYSICS LETTERS, **93**, 191115
(2008)

イントロダクション

- インジェクションロックの技術をRF-OMOに用いる

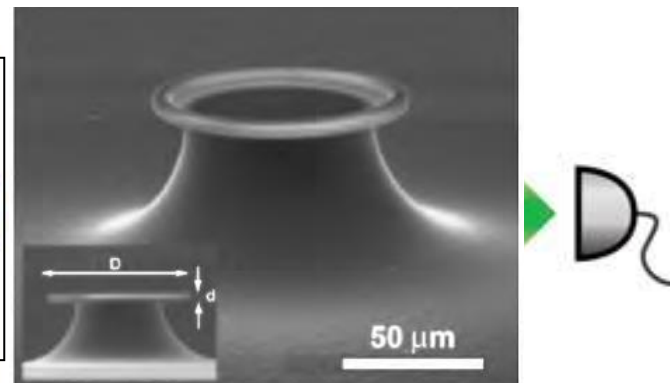
これにより無線通信などの分野に応用が期待

- 本論文では
→インジェクションロックを使用して，OMOの発振周波数と位相をロック

セットアップ

OMO (opto-mechanical oscillator)

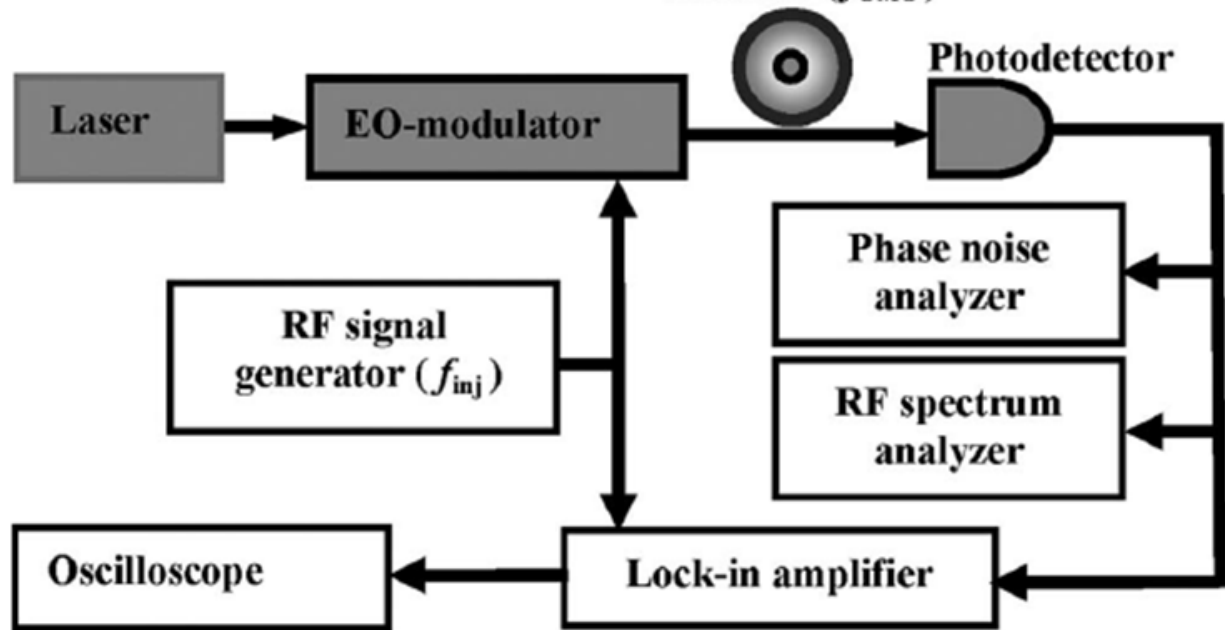
共振器の片側にバネがあり、その機械的振動数によって変調される



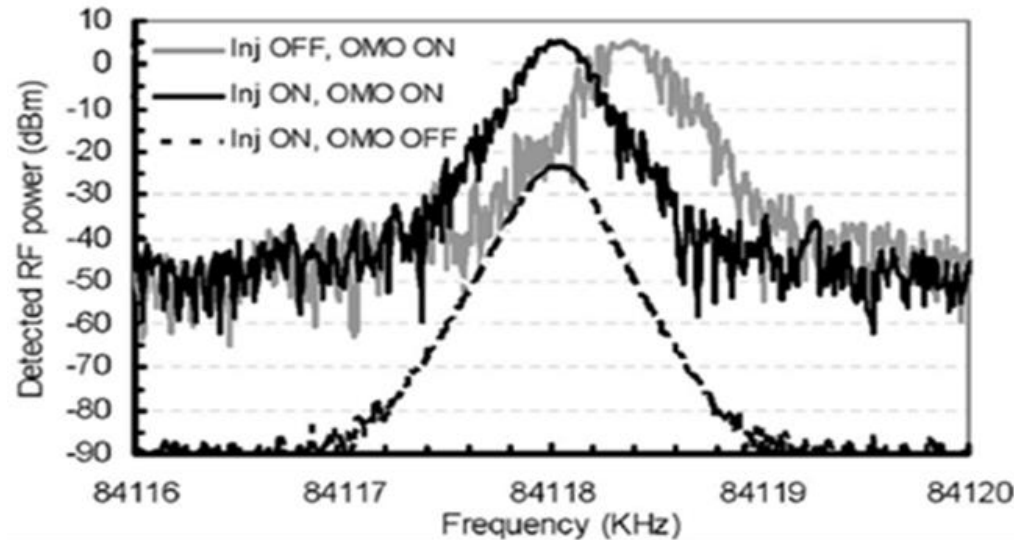
Optomechanical Oscillator (f_{OMO})

- 注入信号 f_{inj} の振幅が十分大きい
- 発振周波数 f_{OMO} に近い

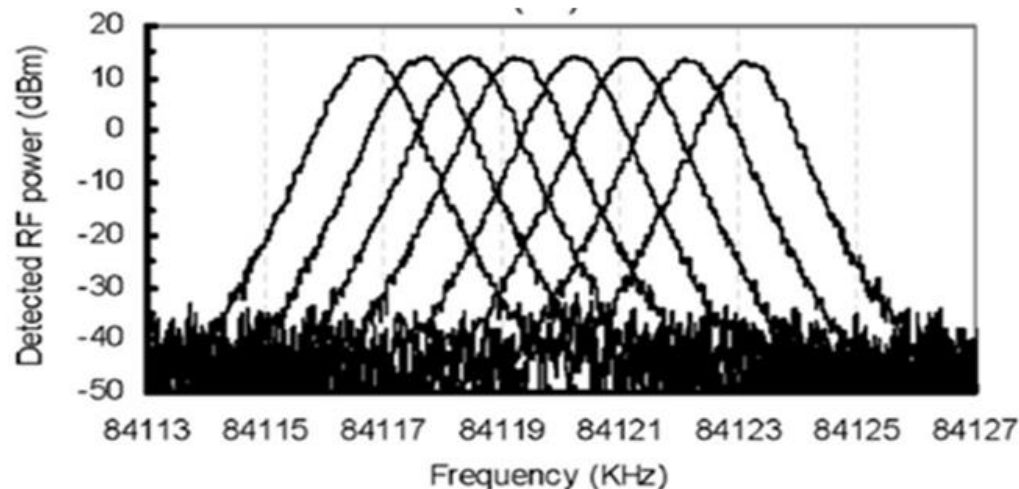
→ インジェクションロックされる



実験結果

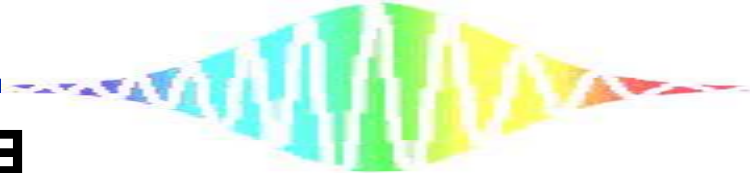


(a) 注入している時としていない時のRFスペクトル



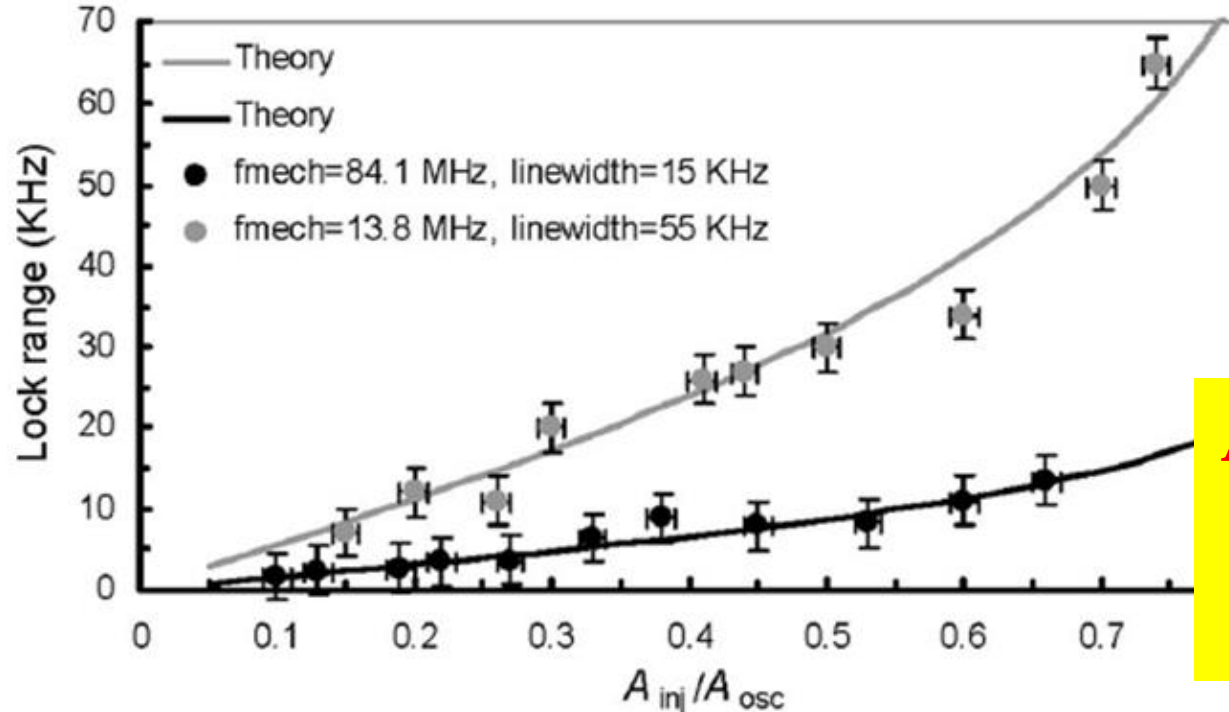
(b) f_{inj} のスイープによって f_{OMO} を調節可能

OMO信号とRF信号のインジェクションロックを確認



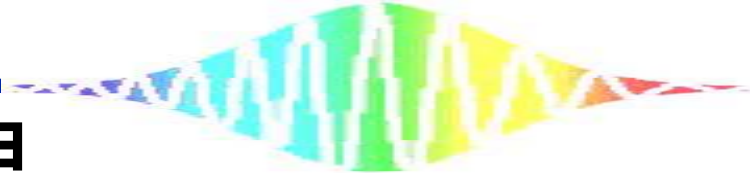
実験結果

- 異なる2つのOMOにおいて, A_{inj}/A_{OMO} とロック範囲の関係
- 実線は計算によって求められた理論値

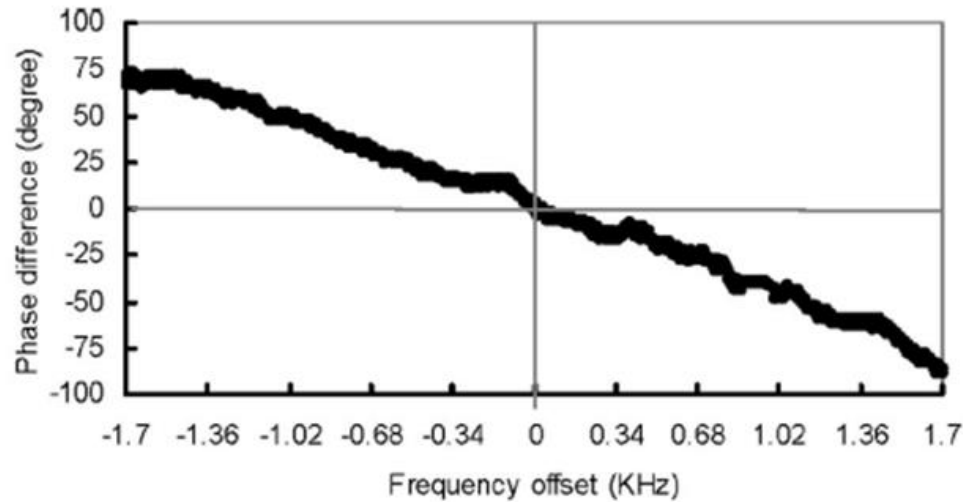


計算によって求めた理論値と実験値が一致

A_{OMO} に対して A_{inj} を大きくしていくとロック範囲が拡大



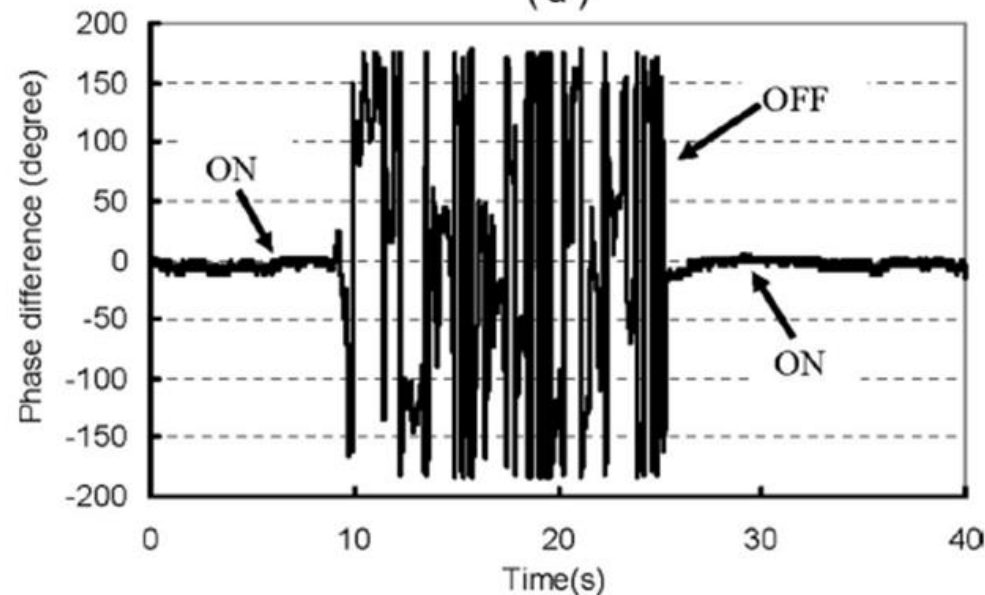
実験結果



(a)

(a) $f_{\text{OMO}} - f_{\text{inj}}$ と位相差の関係

($f_{\text{OMO}} = 13.8\text{MHz}$, 線幅
55kHz, $A_{\text{inj}}/A_{\text{OMO}} = 0.36$)

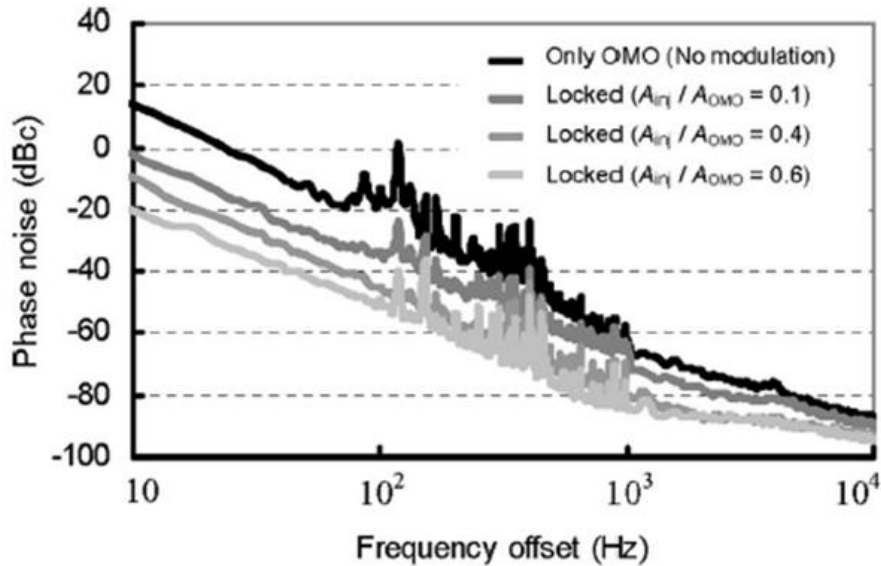


(b)

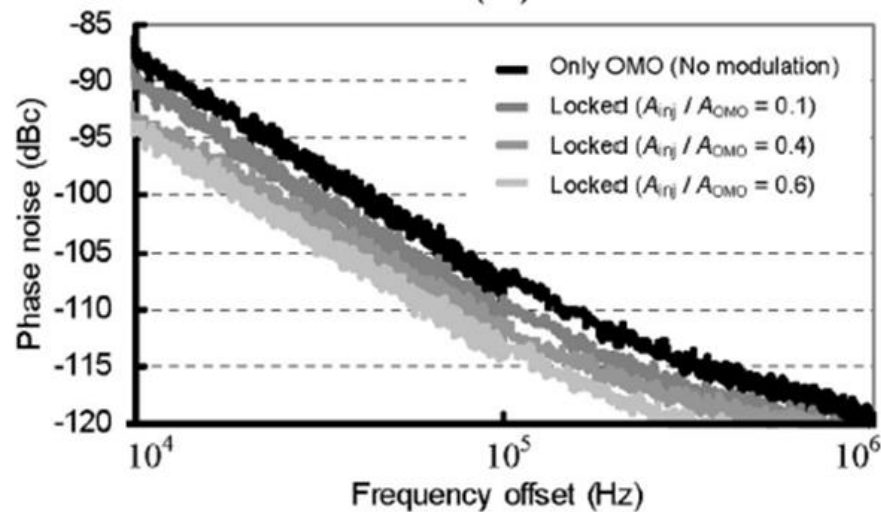
(b) インジェクション
ロックした時として
いない時の位相差

$f_{\text{OMO}} - f_{\text{inj}}$ を調節することにより位相差も調節可能

実験結果



(a)

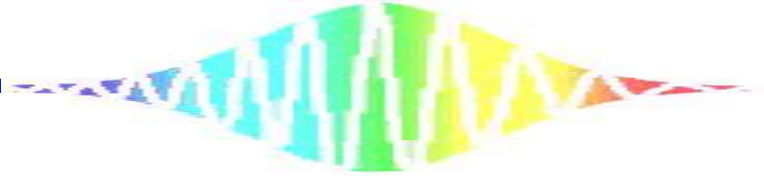


(b)

(a) 0.01-10kHzにおいて
検出された位相ノイズ

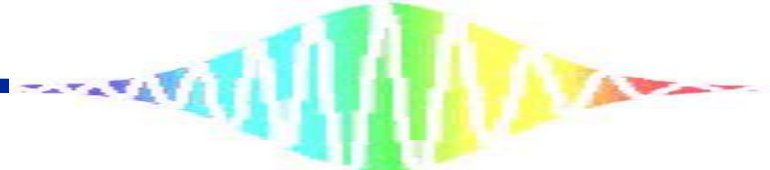
(b) 10-1000kHzにおいて
検出された位相ノイズ

→位相ノイズの大きさが
 A_{inj}/A_{OMO} に比例している



まとめ

- 本稿では, OMOの位相と周波数をロックする手法としてインジェクションロック技術を紹介した
- インジェクションロック範囲や位相差, 位相ノイズを測定条件を変化させながら取得した



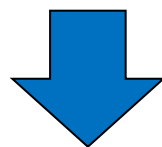
P. Gellie, S. Barbieri, J. Lampin, P. Filloux, C. Manquest, C. Sirtori, I. Sagnes, S. P. Khanna, E. H. Linfield, A. G. Davies, H. Beere and D. Ritchie,

”Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers up to 35GHz using RF amplitude modulation”

OPTICS EXPRESS, **18**, 20799-20816 (2010)

イントロダクション

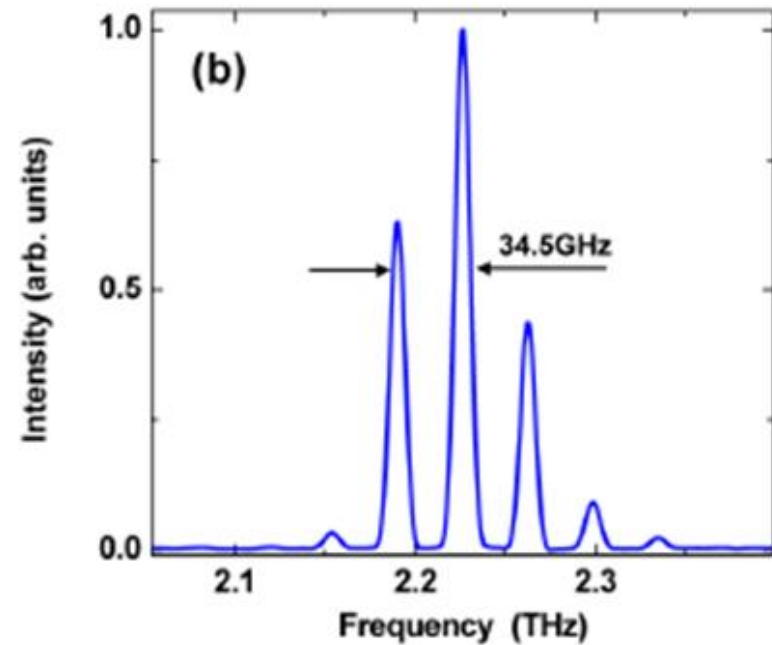
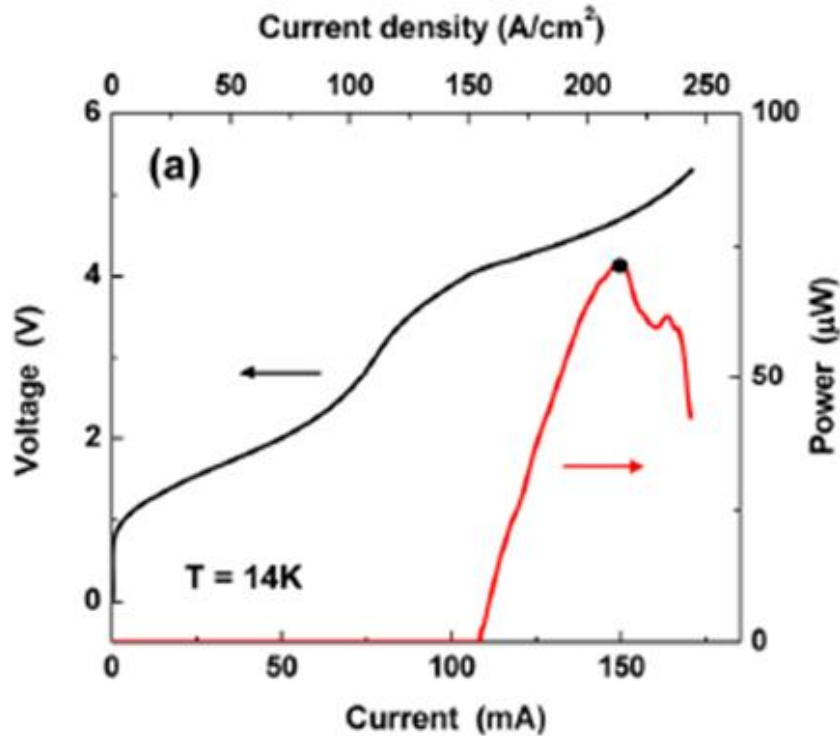
- THz-QCLの開発が進み, 比較的安価で性能の良い市販品や自作のQCLが数多く登場



インジェクションロックによってさらに性能を向上させたい (周波数安定性, 線幅)

- 本論文では
→2種類のTHz-QCLとRFシンセサイザーをインジェクションロックして性能評価

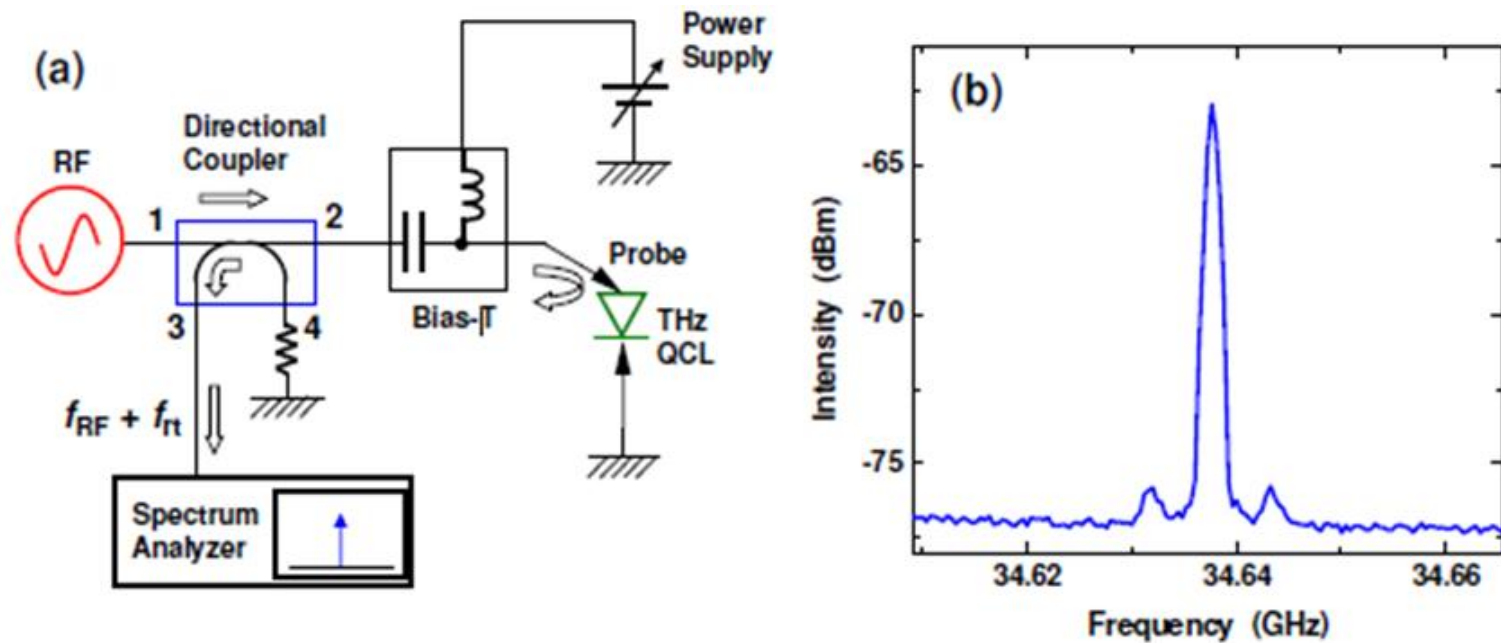
基本特性 (金属導波管型)



電流-電圧特性と
電流-出力特性

電流150mAの時の
スペクトル波形
→フーリエ変換分光計を
用いて測定

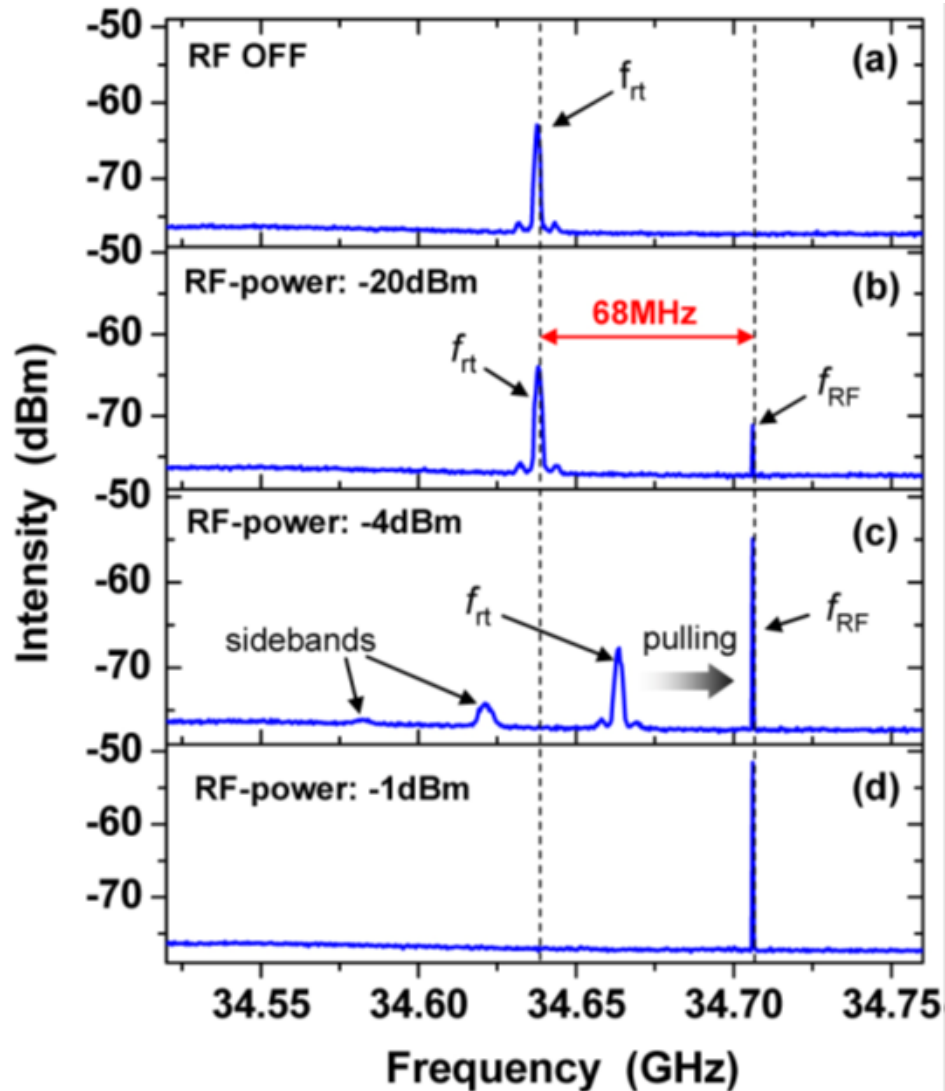
実験装置 (金属導波管型)



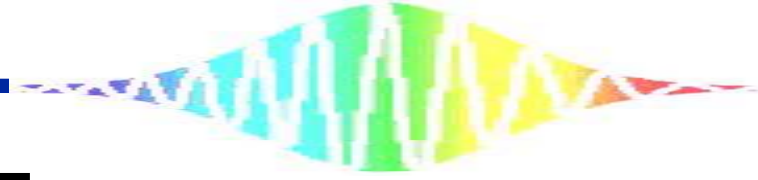
金属導波路を用いたTHz-QCL

中心周波数2.2THzにおいてマルチモードで放射する

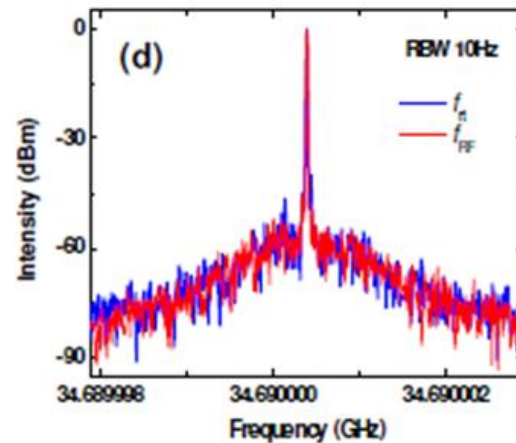
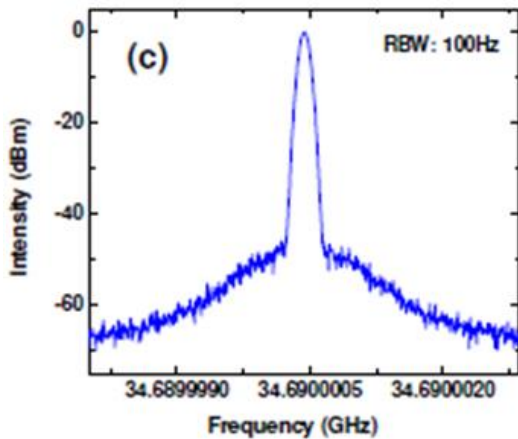
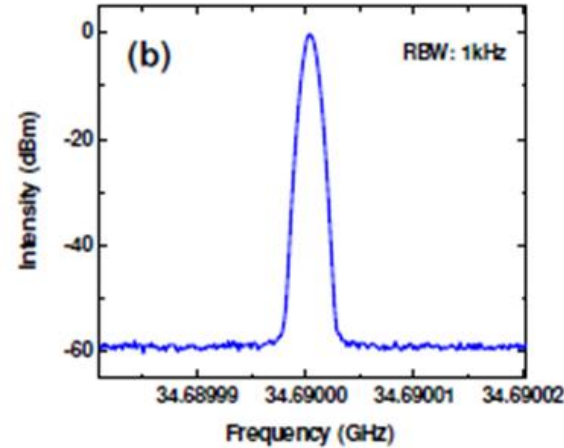
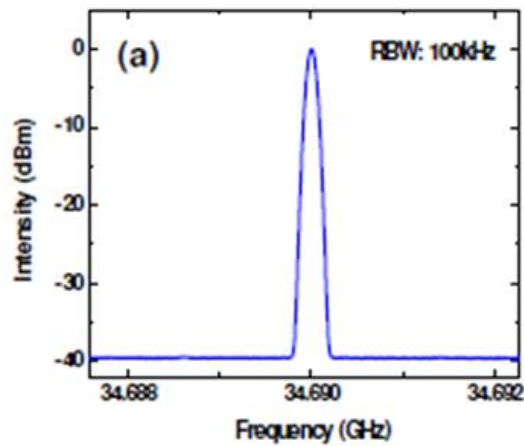
実験結果



- RF信号は34.706GHz
- RFパワーを上昇
→ f_{rt} 信号がRF信号に
引き寄せられ、
-1dBmでロックが確認



実験結果



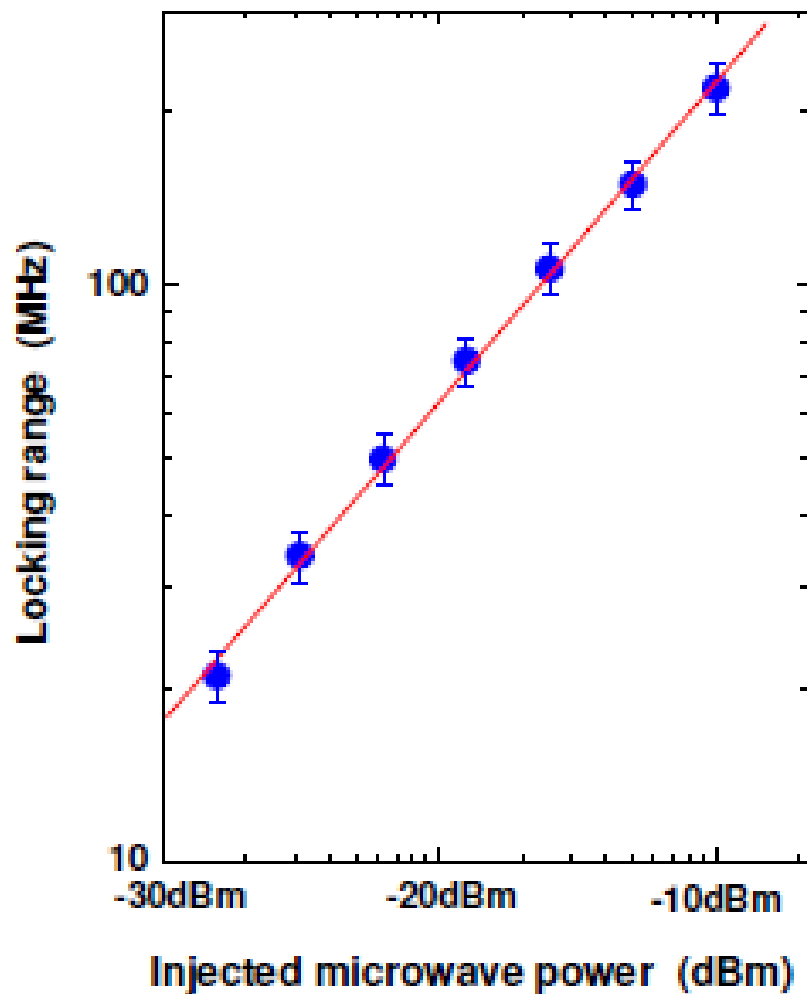
- RFパワーが -2dBm
- スペアナのRBWを变化

赤線と青線が一致
→インジェクション
ロックを確認

動画(インジェクションロック)



実験結果

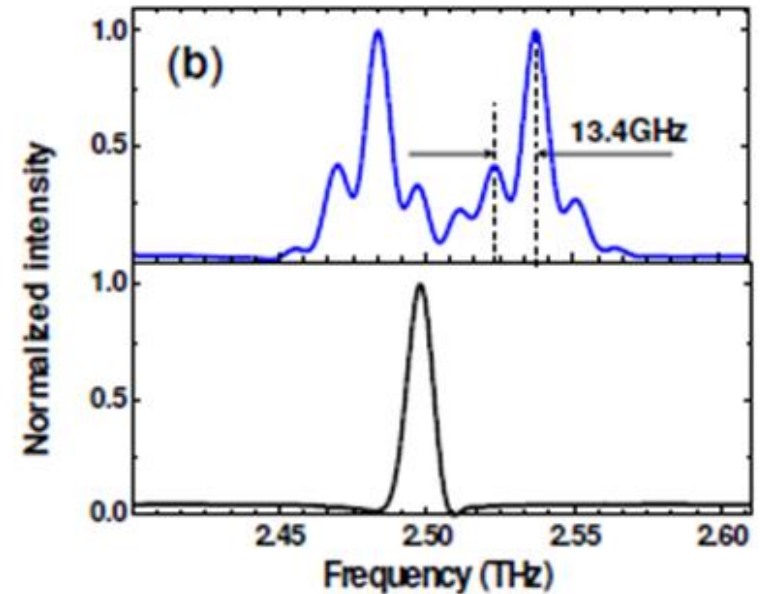
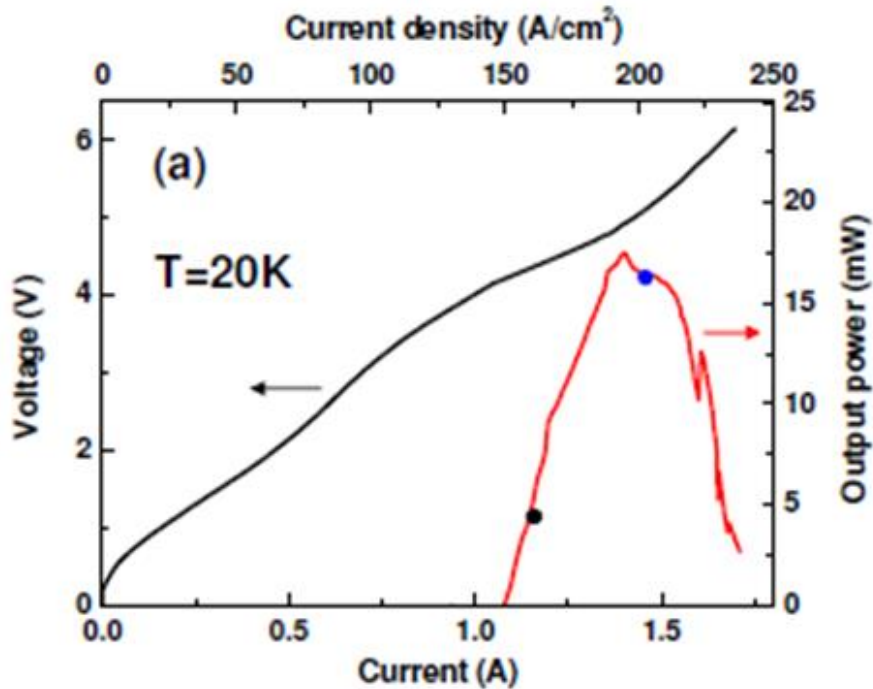


- RFパワーとロック範囲の関係

→RFパワーが増加すると
ロック範囲も増加している

インジェクションロック
の理論式と一致している

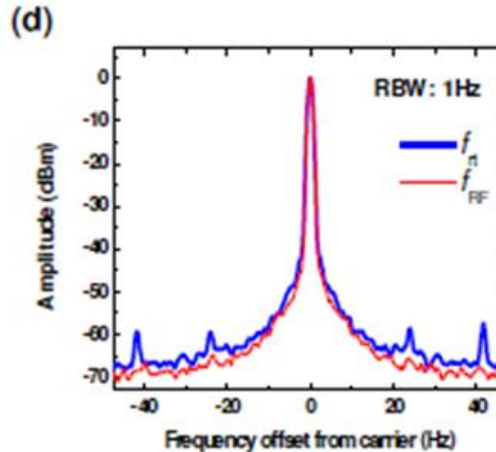
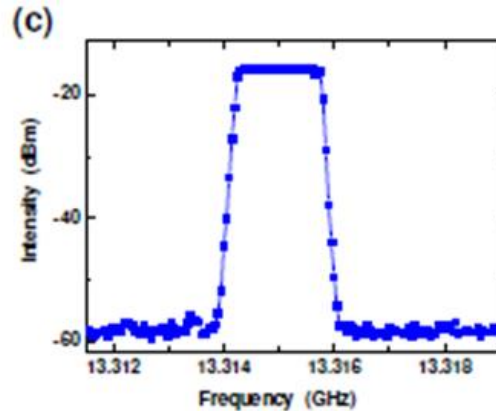
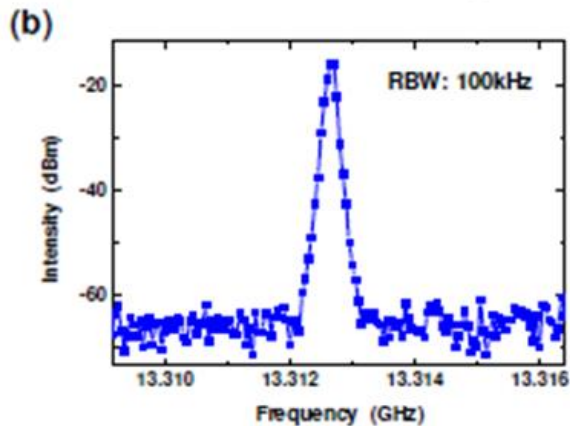
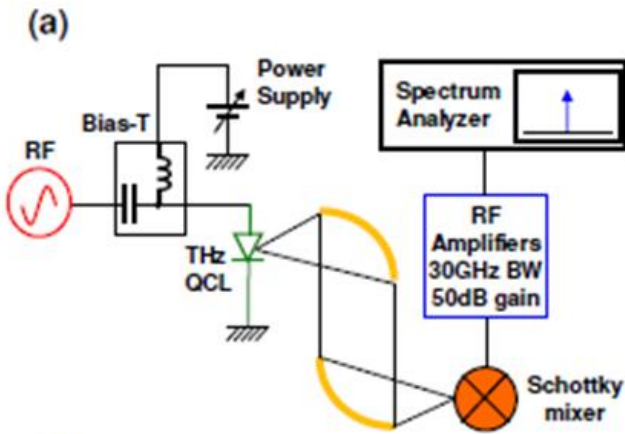
基本特性 (単一プラズモン導波管型)



電流-電圧特性と
電流-出力特性

THz-QCLの
放射スペクトル
上:1.46A 下:1.15A

実験装置 (単一プラズモン導波管型)



(b) RFパワーを
0dBm

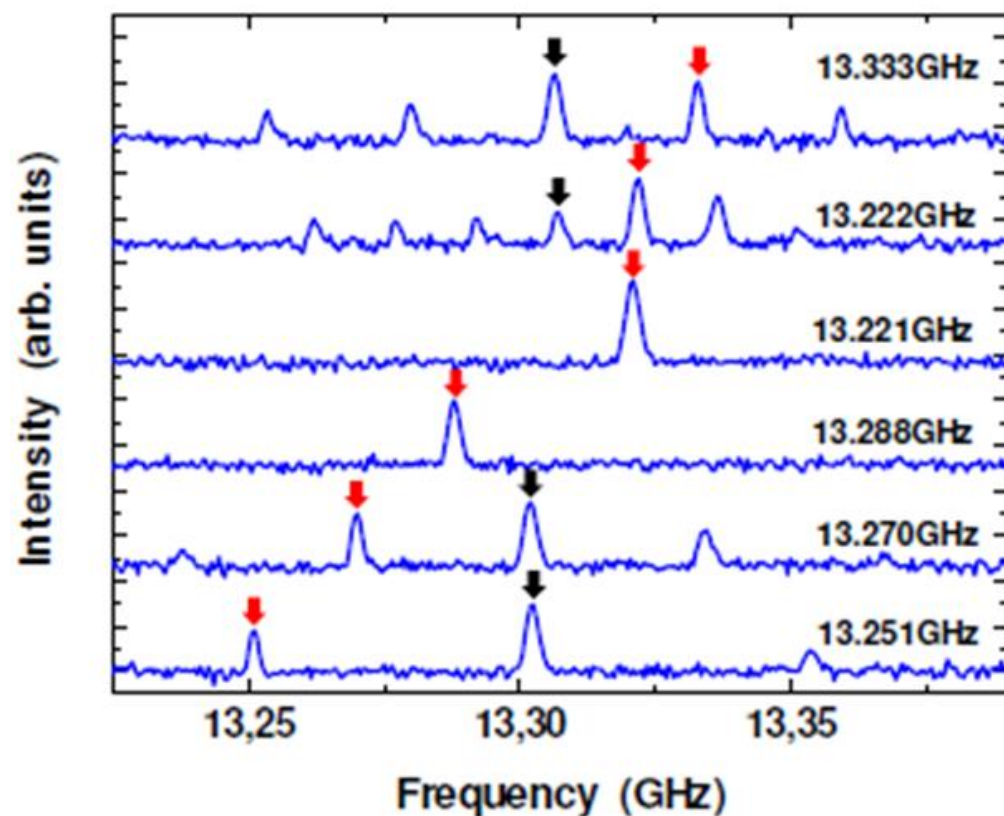
(c) ホールド機
能を使用, 10s

→ランダムドリ
フトの影響

赤線と青線の一致により, インジェクション
ロックが確認

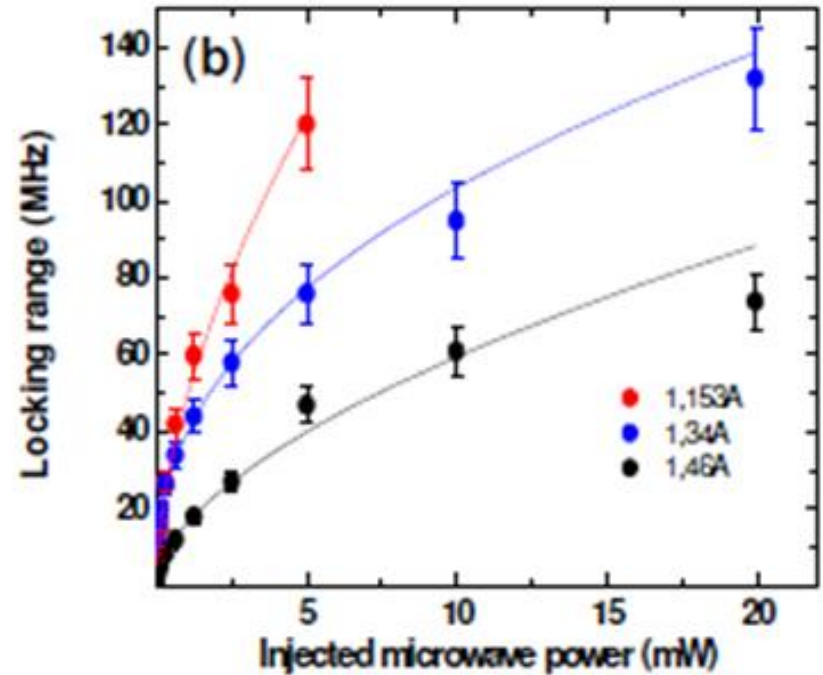
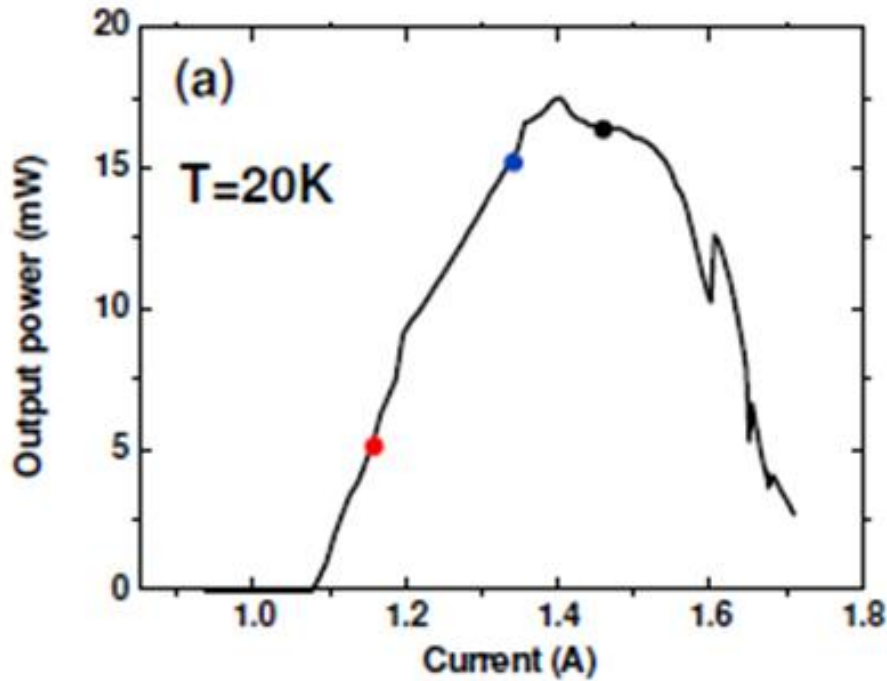
実験結果

- RF信号 (6dBm) をスイープして得られた結果
- 赤がRF信号, 黒が f_{rt} の信号

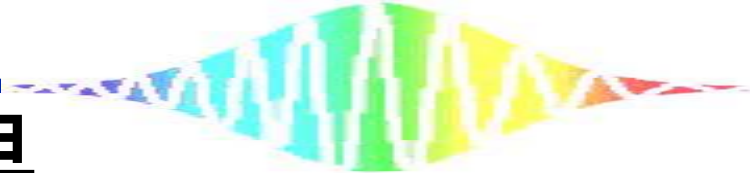


結果より, インジェクションロックの範囲は
13.288GHz~13.322GHzと分かる

実験結果

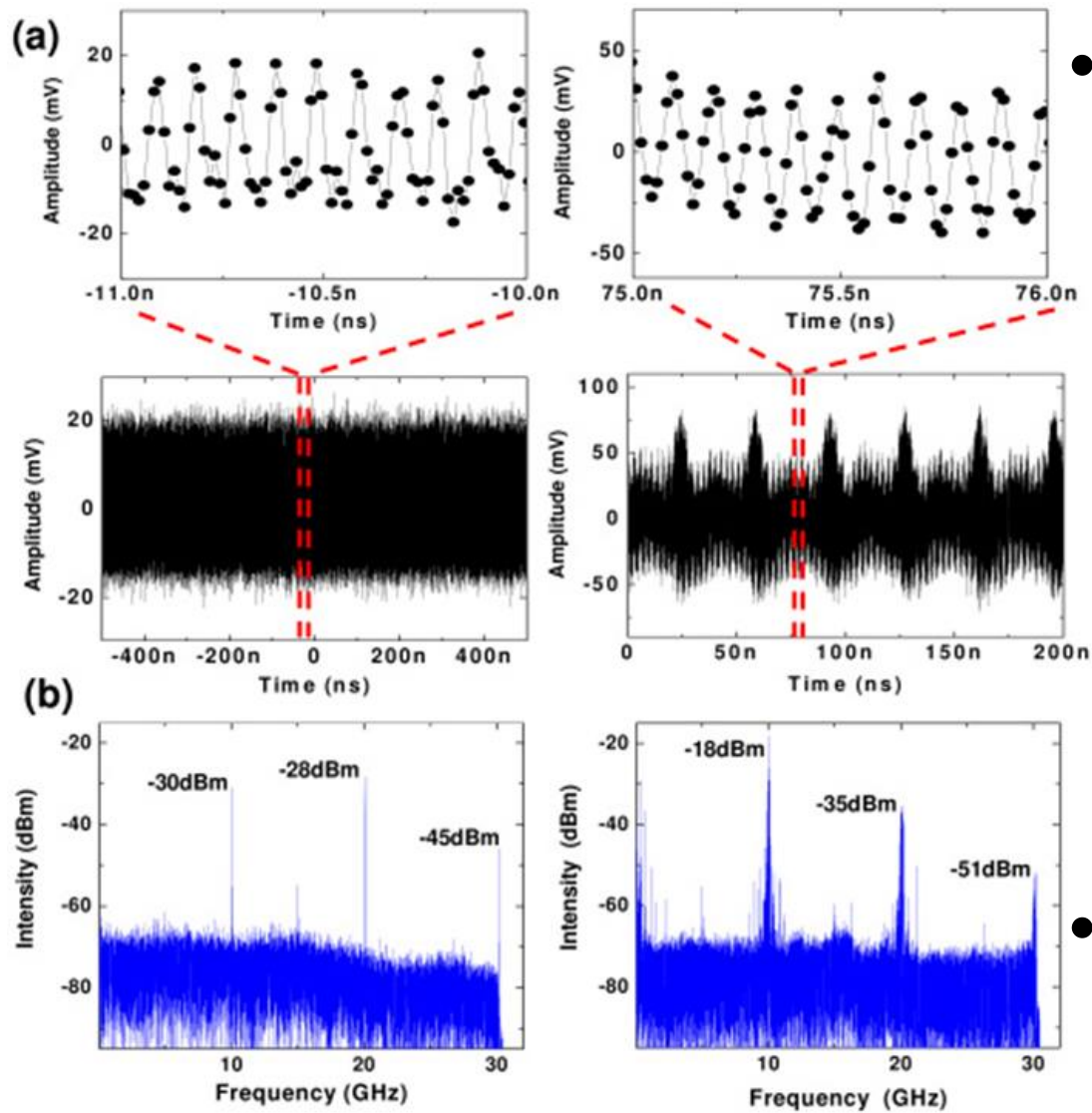


それぞれの電流値におけるRF信号パワーとインジェクションロック範囲の関係

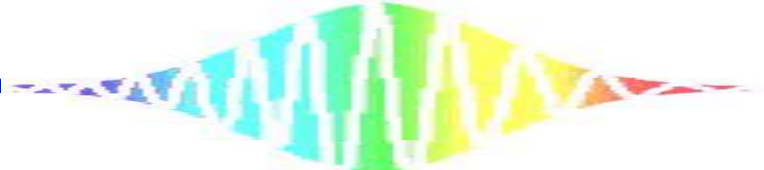


実験結果

- RF信号
10.042GHz(6dBm)と
10.098GHz(14dBm)
でインジェクシヨ
ンロックした時の
時間波形とスペク
トル波形

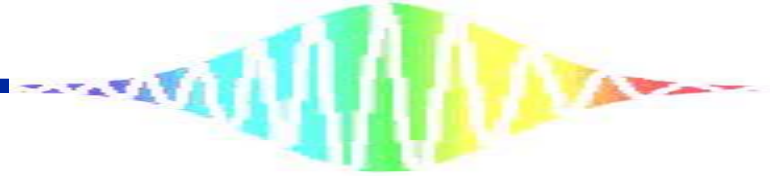


右側(ロック範囲の端)
→スペクトル線幅が
太くなっている



まとめ

- 金属導波管型と単一プラズモン導波管型のTHz-QCLを用いて，RF信号とのインジェクションロックを行った
- ロック範囲において，位相ノイズや線幅はRFシンセサイザーに依存する



C. Wang, F. Grillot, V. Kovanis, J. Bodyfelt, and J. Even,

”Modulation properties of optically injection-locked quantum cascade lasers”

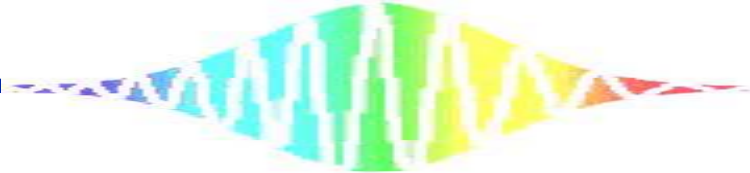
OPTICS LETTERS, **38**, 1975-1977 (2013)

イントロダクション

光インジェクションロック

レーザー発振器の性能向上のための技術
(周波数安定性の向上, 線幅の狭窄化)

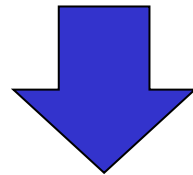
- 本論文では
→インジェクションロックされたTHz-QCLの
特性評価をシミュレーションによって行う



原理

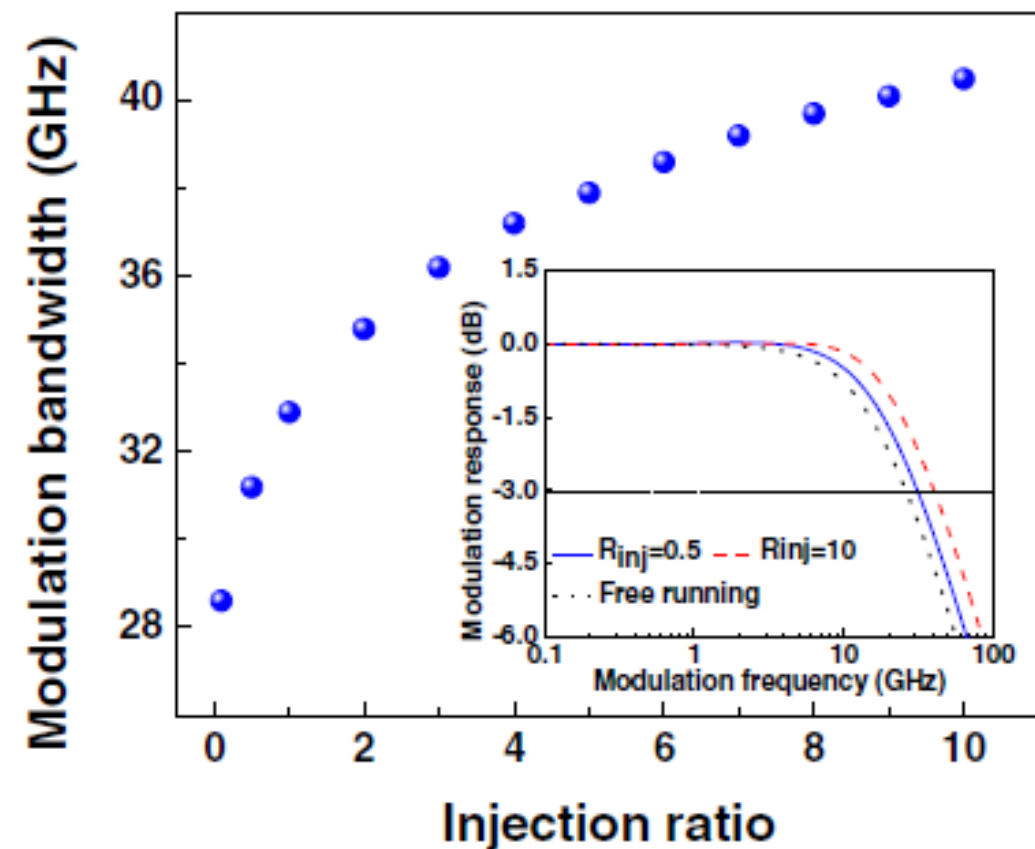
レート方程式

レーザー発振解析の基本式で、各エネルギー準位にあるキャリアの数の時間変化を表す



本実験では、各パラメーター (キャリア数, 緩和時間, 利得段数など) をレート方程式モデルに当てはめてデータを算出する

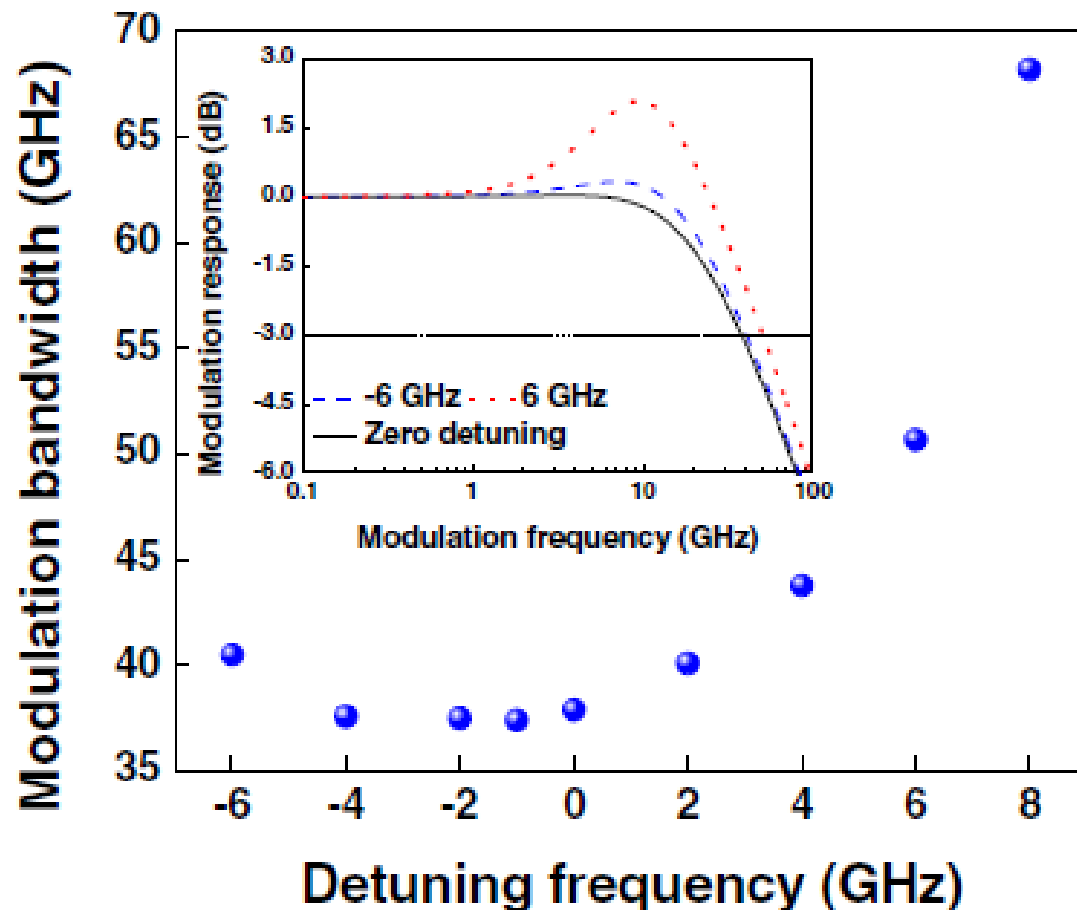
実験結果



- インジェクション比と変調バンド幅の関係 (LEF=0.5)
- インジェクション比を大きくすると, 変調帯域幅が広がっている

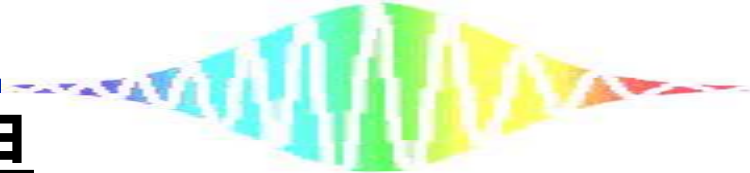
インジェクション比を大きくしすぎると
変調帯域幅が飽和

実験結果

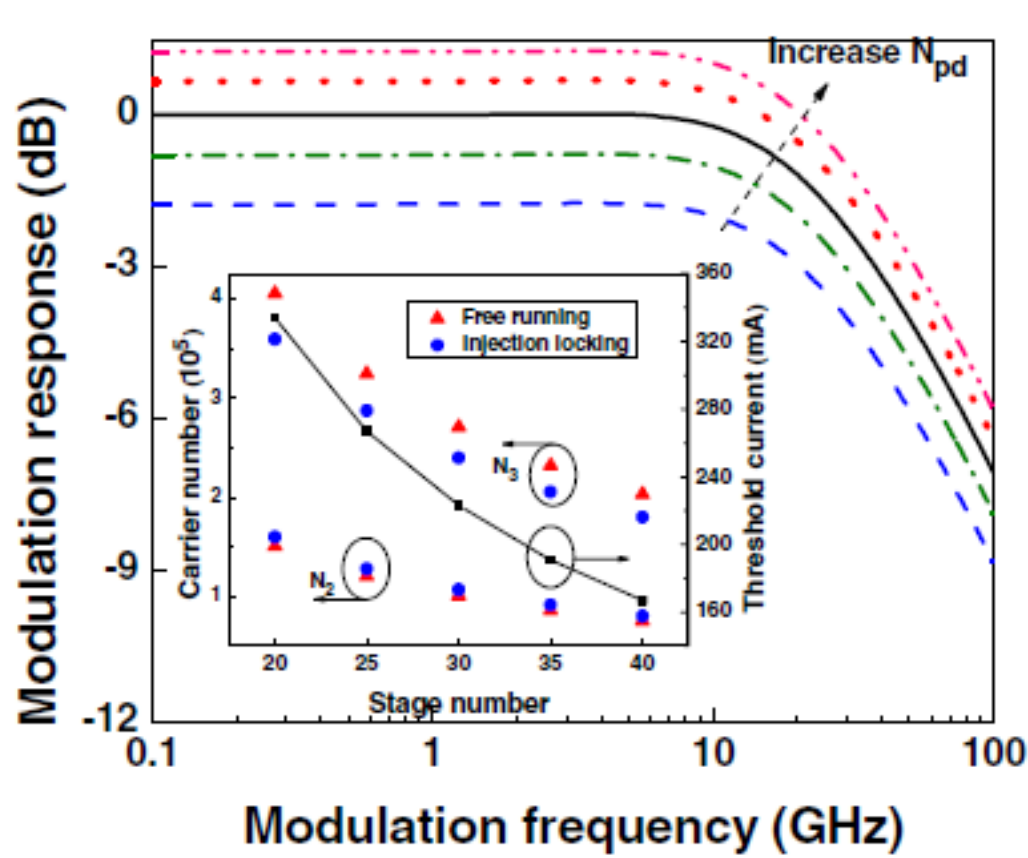


- 離調周波数と変調バンド幅の関係 (LEF=0.5)
- 離調がゼロでない
とIM応答にピーク
が見られる

離調周波数を大きくすると変調帯域幅が拡大

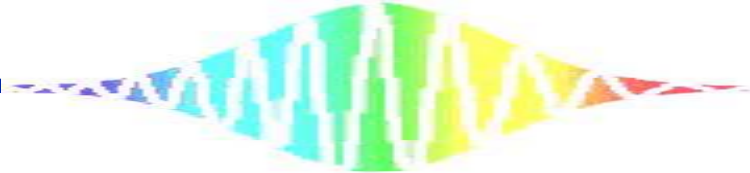


実験結果



- THz-QCLの利得段の数を変化(20~40)
- 利得段数の増加でキャリア数, 電流閾値の減少

利得段数の変化はQCLの定常状態特性に影響

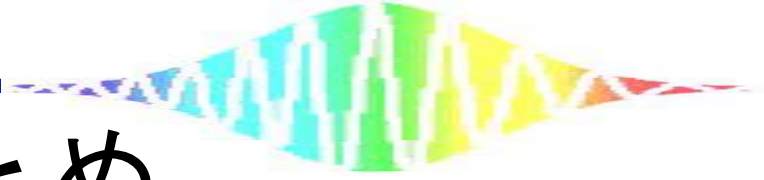


まとめ

- 光インジェクションロックしたQCLにおいて分岐マップと変調応答の理論解析を行った

→様々な条件からロック範囲が変化することが分かった

光インジェクションロックの実験によって
QCLの更なる性能向上が可能であると考えられる



全体のまとめ

- インジェクションロックという手法を紹介した
- これによりTHz-QCLなどの周波数安定化, 線幅の狭窄化を達成した