

Injection locking of the THz quantum cascade laser 「テラヘルツ量子カスケードレーザーのインジェクションロック」

1. イントロダクション

近年、量子カスケードレーザー (QCL) の開発が進み、それに対する応用研究が盛んに行われている。QCL の特徴としては、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 (THz) 領域の広い範囲で任意の周波数を発振可能で、小型、高出力、室温動作可能といった利点がある。そのことから、ガス分光用光源やイメージング用光源として注目されている。しかし、QCL をフリーランニングで使用する場合には、発振線幅が広すぎるといった問題があり、その線幅をいかに狭く出来るかが課題となっている。そこで従来、QCL とガスレーザーをヘテロダインミキシングすることで、ガスの吸収線に QCL を周波数ロックしていた[1]。しかしこの手法では、ある特定の周波数でしか発振できない点や、QCL の制御用だけのためにガスレーザーを使うので実用的ではないといった問題があった。

本稿では、インジェクションロックと呼ばれる、変調による発振周波数の安定化技術を紹介している。さらに、THz-QCL をインジェクションロックすることにより、発振線幅を狭窄化した論文も紹介している。

2. Observation of injection locking in an optomechanical rf oscillator [2]

2.1. イントロダクション

インジェクションロックは、電波と光波におけるセルフサステイン型発振器の効果としてよく知られている。周波数が近く、振幅が十分大きい周期信号がセルフサステイン型発振器に注入される時、発振器の位相と周波数が注入信号のものとロックされる。今回この現象は、OMO (opto-mechanical oscillator) によって検証された[3]。

本研究では、位相ノイズと発振周波数の特性評価を行い、OMO が、ある RF フォトニックシステムで重要であることを示した。そして、入力する光パワーの変調を使用することでOMO の周波数と位相の両方をロックできることを示した。

2.2. 実験装置

図2.2に、OMO を用いたインジェクションロックの実験装置を示す。波長可変レーザーからの光学パワーは、マッハツェンダー (MZ) 変調器を通過して、ファイバーテーパーカプラを使用した光共振器の中と外に結合されている。光入力パワー (P_{in}) の振幅は、MZ 変調器で適用された可変の RF シンセサイザーから単一の RF 信号によって部分的に変調される。その結果変調指数は、ポンプ (P_{in} の CW の一部) と比較して、より弱いインジェクションロック信号 (P_{inj} の変調された一部) の強さを制御するのに使用された。そして、マイクロトroidから結合された光学パワーのスペクトルは、RF スペクトラムアナライザーで解析される。また出力信号の位相は、ロックインアンプを使用して電気入力信号 (注入信号) と比較される。注入信号の振幅が十分大きく、OMO の発振周波数 f_{OMO} の近くに注入周波数 f_{inj} があるとき、OMO とインジェクションロックされる。

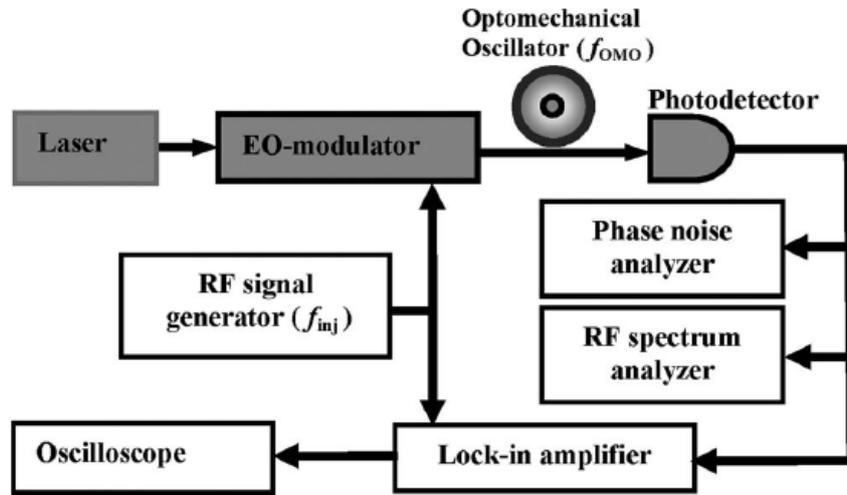


図 2.2 実験装置

2.3. 実験結果

図 2.3.1 (a) は変調（インジェクション）をしていない時（グレー線）としている時（黒線）の光出力パワーの RF スペクトルを示している。この実験で使われた OMO は、周波数が約 84.1MHz であった。この場合、注入信号の周波数は OMO 周波数より 500Hz 低い。外部変調が ON であるとき、破線は光入力パワーの RF スペクトルである。変調によって f_{OMO} は f_{inj} に引き寄せられ、2つの信号がロックされるのは明らかである。図 2.3.1 (b) に示しているのは、 f_{inj} の調節によって、OMO 周波数も調整することが出来るということである。入力信号の振幅変調と光出力に使われた OMO の振幅の間の比率 (A_{inj}/A_{OMO}) において、ロックは f_{OMO} 周辺の限られた帯域幅（ロック範囲）の中で起こる。

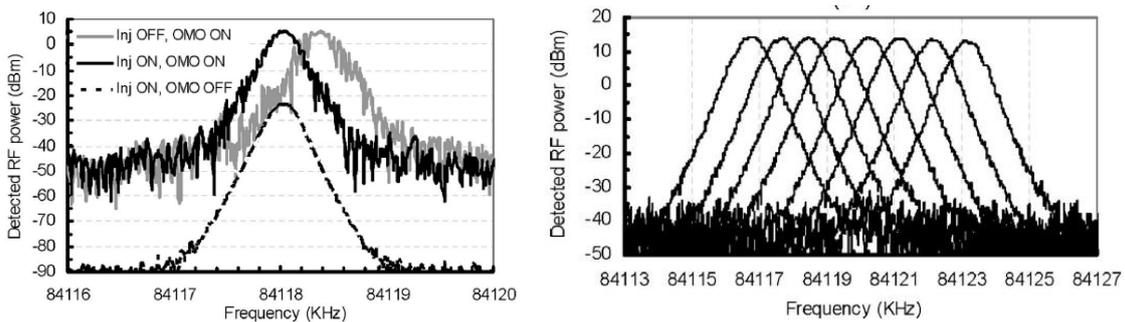


図 2.3.1 実験結果

図 2.3.2 は、2つの異なる OMO で A_{inj}/A_{OMO} の変化と測定されたロック範囲の関係を示している。グレーの点は $f_{OMO}=13.8\text{MHz}$ 、線幅 55kHz であり、黒の点が $f_{OMO}=84.1\text{MHz}$ 、線幅 15kHz である。実線は理論値を表している。

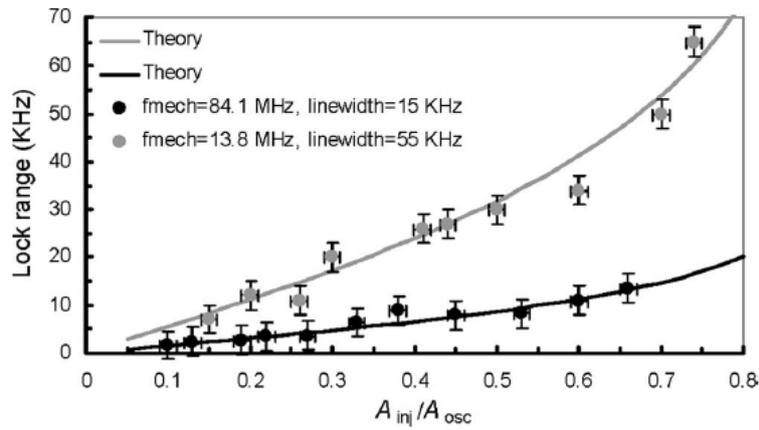


図 2.3.2 実験結果

図 2.3.3 (a) には、インジェクション信号と OMO (ロックインアンプで測定された) 間の測定された位相差が示されている。 f_{OMO} 周辺の帯域幅 3.4kHz 以内の周波数離調 ($f_{OMO}-f_{inj}$) に対してプロットされた。測定条件は、 $f_{OMO}=13.8\text{MHz}$ 、線幅 55kHz、および $A_{inj}/A_{OMO}=0.36$ である。図 2.3.3 (b) は、MZ 変調器の上のインジェクション信号の ON と OFF における $f_{OMO}=f_{inj}$ での位相差の振舞いを示している。位相差は、注入が ON であるときほとんどゼロであり、注入が OFF であるとき無作為になる。その結果、ロック範囲の中の f_{inj} に関して、周波数離調を調整することによって、注入信号と発振器間の位相差を調整できる。

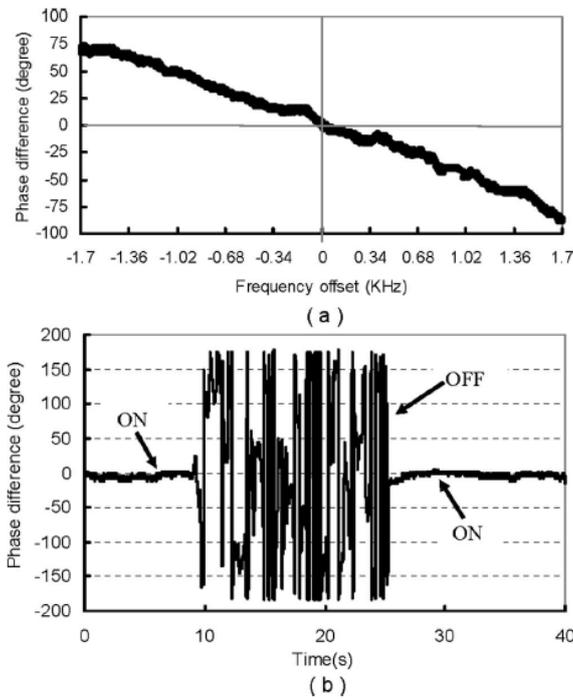


図 2.3.3 実験結果

図 2.3.4 は、2つの周波数範囲 (a) 0.01-10kHz と (b) 10-1000kHz での検出された光パワーの測定された位相雑音スペクトル密度である。位相ノイズは、フリーランニング OMO とインジェクションロックされた OMO において $A_{inj}/A_{OMO}=0.1, 0.4, 0.6$ で測定された (この実験では $f_{OMO}=84.1\text{MHz}$, 線幅 15kHz である)。ノイズスペクトルから分かるように、周波数同期が周波数ジッターを除去するので、位相ノイズの軽減が低い周波数領域 (<10kHz, 図 2.3.4 (a)) で特に著しい。またこれらの測定値は、位相ノイズの軽減の大きさが A_{inj}/A_{OMO} と比例していることも示している。

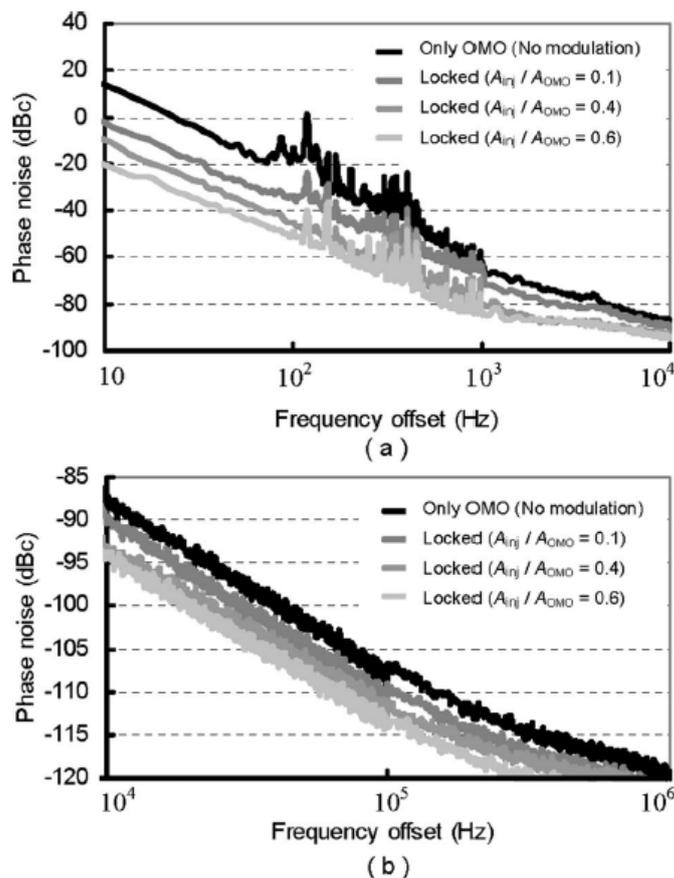


図 2.3.4 実験結果

また OMO は、基本発振周波数 (f_{OMO}) の高調波か低調波付近の周波数の信号にインジェクションロックされたかもしれない。図 2.3.5 (a) に、フリーランニング OMO (黒線) と高調波や低調波にロックされた発振器 (グレー線) の RF スペクトルを示す。この実験では、 $f_{OMO}=36.913\text{MHz}$ となっている。図 2.3.5 (b) と図 2.3.5 (c) には、(a) に示した 2つのロック条件での変調 (注入) RF スペクトルを示す。黒の縦線は、発振周波数の第 2 高調波 ($2f_{OMO}$) と低調波 ($f_{OMO}/2$) の位置を示している。またグラフから、これらの周波数で OMO を注入すると、変調信号に OMO の周波数をロック出来ることがわかる。

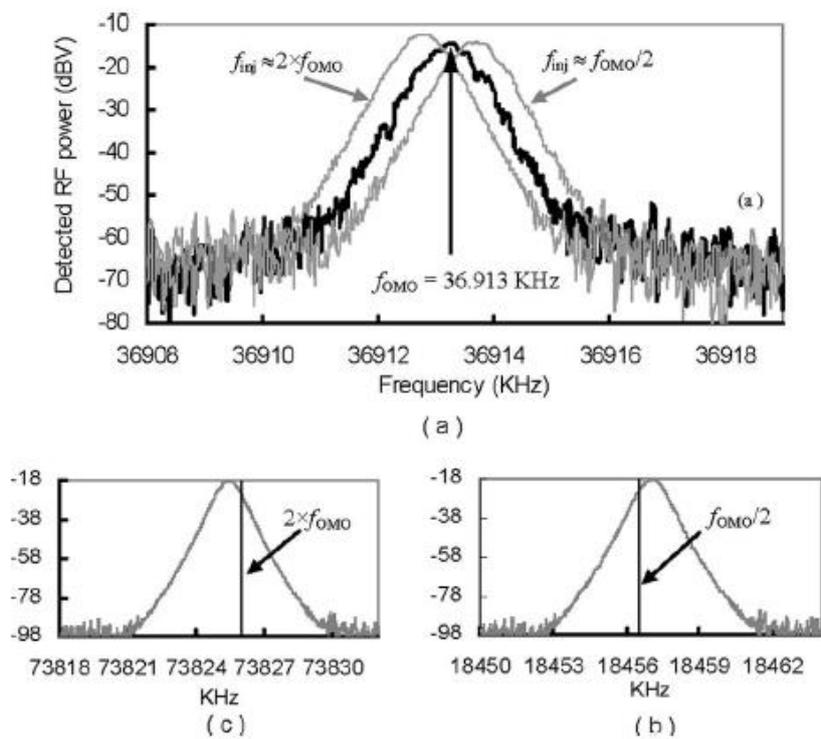


図 2.3.5 実験結果

2.4. まとめ

結論として、入力光波の振幅変調によって OMO の位相と周波数をロックするのにインジェクションロック技術が使用出来ることを示した。電波と光波において広く使用されたこの技術は、RF-OMO やそれらのアプリケーションの未来を切り開くかも知れない。例として近年、OMO に基づく RF 受信機構造が研究されている。この構造では、OM 局部発振器と受信された信号の間のロックが、ロック範囲以内の発振器のための周波数安定性条件を緩和するかもしれない。電子 RF 発振器と OMO のインジェクションロックは、電子機器と OMO の組み合わせを可能にする。インジェクションロックは、2 つの OMO をロックして、スレーブ発振器の周波数安定性とノイズ性能を改善する。最後に、インジェクションロックは複数の OMO を連動させるのに使用でき、原子時計にロックすることによって OMO を制御できる計測学のアプリケーションとしての応用が期待されている。

3. Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers up to 35GHz using RF amplitude modulation [4]

3.1. イントロダクション

モード同期レーザーにおいて、共振器の往復周波数の周波数と位相の安定性は直接放射パルス列のタイミングジッターの安定性に関係する。

量子カスケードレーザーは、多層のヘテロ構造の伝導バンドにおいて、サブバンド間遷移に基づいたレーザーである。QCLの振幅変調は $8\mu\text{m}$ 放射の装置で最初に行われた[5]。この研究では、ファブリペローレーザーの縦モードの数の強めあいがRF変調周波数 $\sim 13\text{GHz}$ 付近で観察された。次に、幅 $\sim 3\text{kHz}$ のピークがモード同期QCLの $6.3\mu\text{m}$ 放射において $\sim 17.8\text{GHz}$ で測定された[6]。

近年、金属導波路に基づくTHz-QCLが中赤外装置と比較して振幅変調に適することが示された。これにより、 2.3THz のQCLを用いた振幅変調が 24GHz まで可能になった。

本研究では、金属導波管のTHz-QCLがRFシンセサイザーにインジェクションロック出来ることを示した。これによって繰り返し周波数がRFシンセサイザーの周波数に同期していることが分かる。さらに、単一プラズモン導波路のTHz-QCLを用いても実験を行っている。

3.2. 金属導波管を用いたTHz-QCLのRFインジェクションロック

本研究で用いた金属導波路のTHz-QCLは、中心周波数 2.2THz においてマルチモードで放射する。また、液体ヘリウムによって 4K まで冷却が可能である。スペクトルの測定はフーリエ変換スペクトロメーターによって取得された。図3.2.1に、THz-QCLの基本特性を示す。左図は、デバイスの電気光学特性を示しており、温度は 10K に調整されている。また右図は電流 150mA の時のスペクトルを示している。ここで、6本のモードは約 34.5GHz で分けられている。

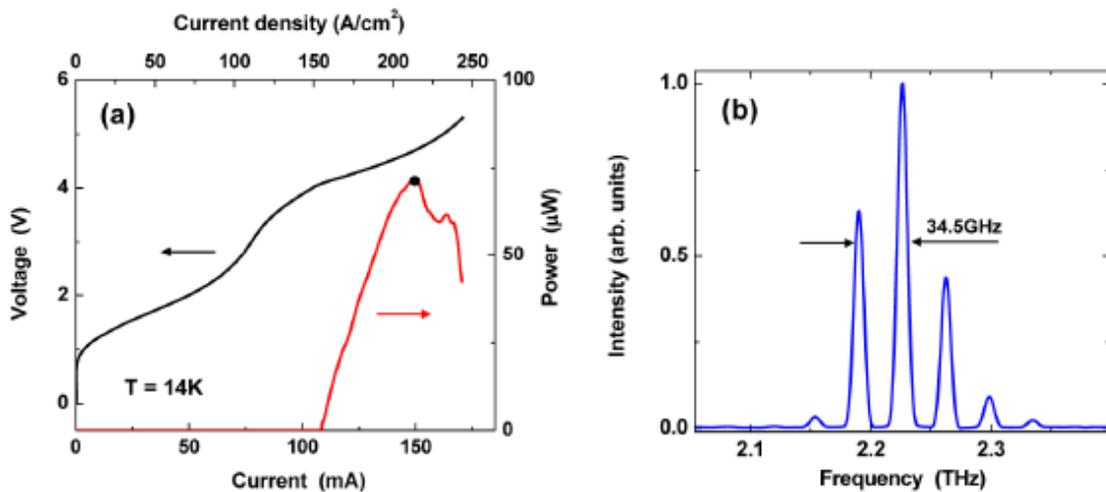


図 3.2.1 金属導波管型 THz-QCL の基本特性

図3.2.2 (a) には金属導波管を用いたTHz-QCLのRFインジェクションロックの概略図を示す。RFシンセサイザーは、QCLを振幅変調させるためにバイアステーに直接カップリングされている。ま

た図 3.2.2 (b) には, RBW100kHz, スweep時間 1s のスペクトラムアナライザーで計測されたスペクトルを示す。

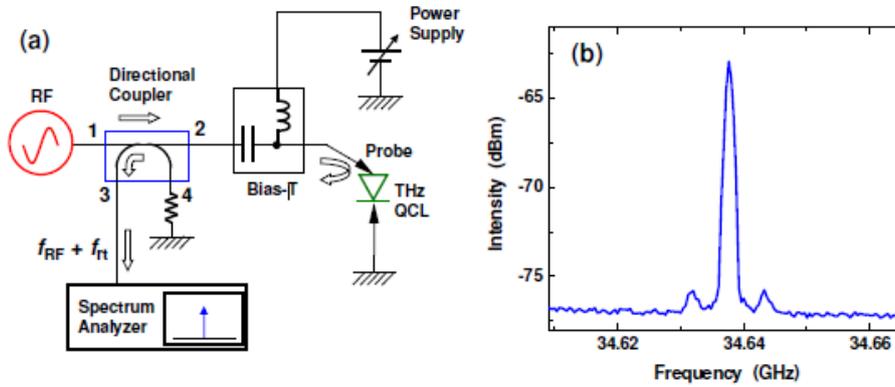


図 3.2.2 RF インジェクションロックの実験装置

図 3.2.3 には, f_{rt} の RF インジェクションロックの様子を示す。(a) では RF 信号を OFF にしているため, 図 3.2.2 (b) と同じ信号となっている。そこに RF 信号 ($f_{RF}=34.706\text{GHz}$, パワー -20dBm) を与えると (b) のように 2 つの信号がスペアナで観測される。ここから RF 信号のパワーを上昇させていくと, (c) の時 f_{rt} の信号が f_{RF} に引き寄せられていることが分かる。この時のパワーは, -4dBm であった。さらに, パワーを -1dBm まで上昇させると, (d) のように完全に f_{rt} と f_{RF} が一致した。このことから, インジェクションロック出来ていることが分かる。

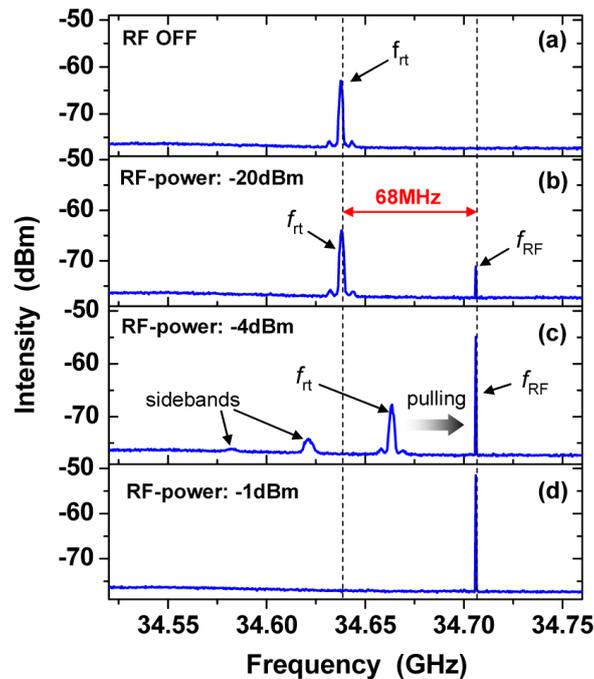


図 3.2.3 実験結果

図 3.2.4 に RF 信号のパワーを-2dBm とした時にスペアナで測定された QCL のスペクトルを示す。RBW を変化させた時の比較が (a)~(d) で示されており、(d) において f_{rt} と f_{RF} が一致しているためインジェクションロックが証明された。

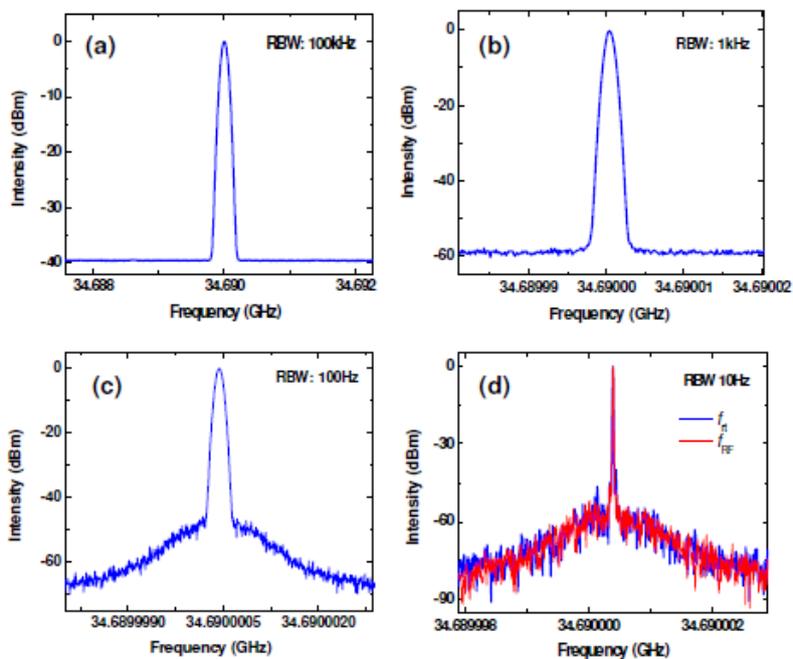


図 3.2.4 RBW を変化させた時の THz-QCL スペクトル

図 3.2.5 に RF パワーとロック範囲の関係を示す。RF パワーが増加するとロック範囲もその約 2 乗で増加していることが分かり、これはインジェクションロックの理論式と一致している。

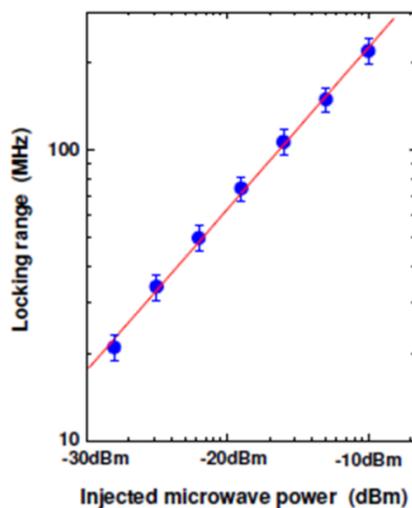


図 3.2.5 実験結果

3.3. 単一プラズモン導波管を用いた THz-QCL の RF インジェクションロック

図 3.3.1 に、単一プラズモン導波管を用いた THz-QCL の基本特性を示す. (a) には電流電圧特性と電流出力特性を示しており、この時の温度は 20K となっている. さらに (b) では THz-QCL の放射スペクトルが示されており、上側は電流値が 1.46A, 下側は 1.15A となっている.

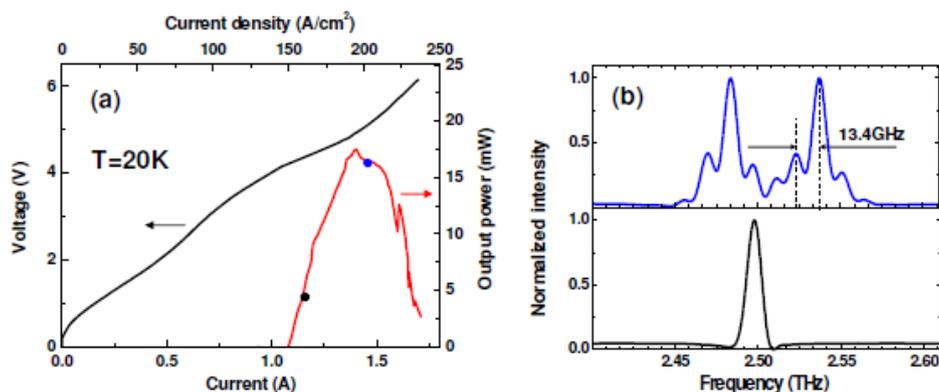


図 3.3.1 単一プラズモン導波管型 THz-QCL の基本特性

図 3.3.2 には、RF インジェクションロックのセットアップとスペアナでの測定結果を示す. (b) では電流値を 1.46A, スペアナの RBW100kHz, スイープ時間 4ms とした時の RF スペクトルを示す. (c) には (b) と同じ条件で、スペアナのピークホールド機能を使って 10s 間取得したスペクトルを示す. この原因は、 f_r のランダムドリフトによると考えられる. (d) には、RBW1Hz, スイープ時間 2.3s とした時の THz-QCL の RF スペクトル (青線) と RF 信号 (赤線) の比較を示す. それぞれが精度よく一致していることから、インジェクションロックが出来ていると考えられる.

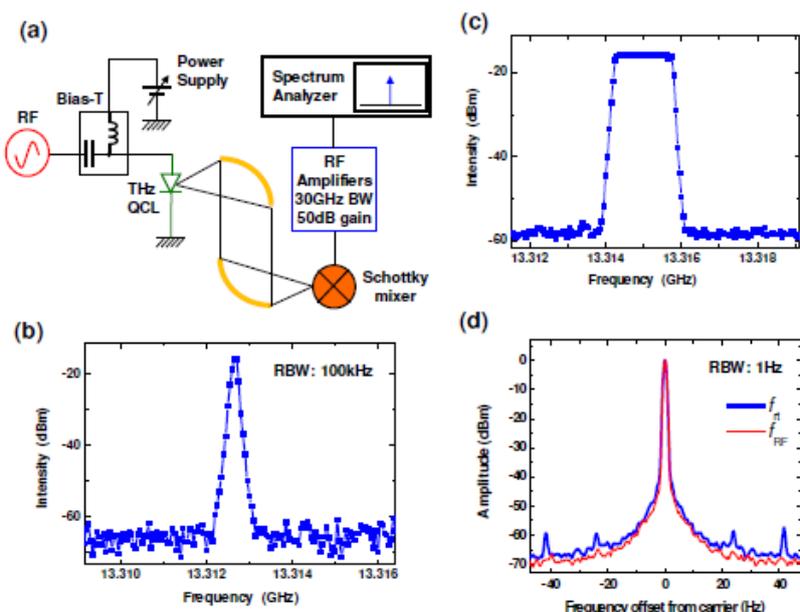


図 3.3.2 RF インジェクションロックの実験結果

図 3.3.3 は、RF 信号をスイープして得られたインジェクションロック範囲を示している。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。

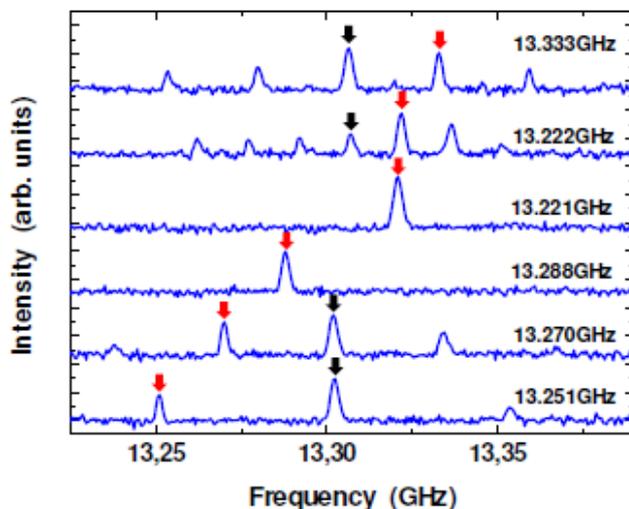


図 3.3.3 実験結果

図 3.3.4 に、それぞれの電流値におけるインジェクションパワーとロック範囲の比較を示す。インジェクションパワーを増やすとロック範囲が拡大していることがわかる。

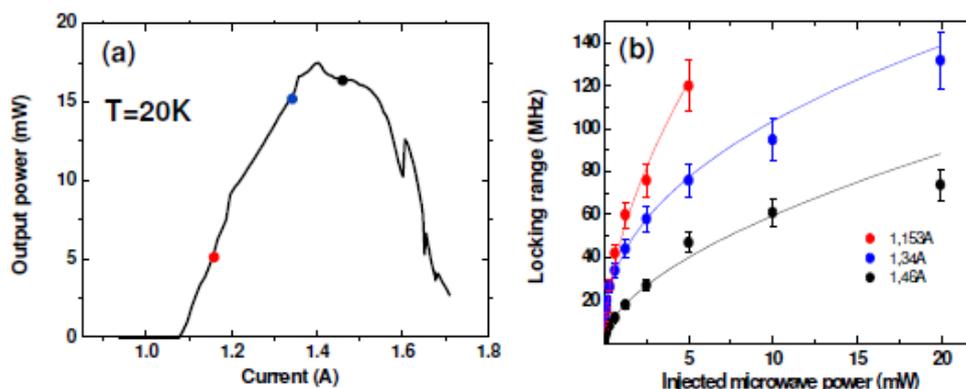


図 3.3.4 実験結果

図 3.3.5 に、RF 信号を 100MHz から 26GHz まで 5dBm のパワーでスイープした時の光変調応答を示す。(b) には QCL の放射スペクトルを示す。ドライブカレントは 1.34A で、RF 信号なし (青線) と 20dBm の RF パワーの時で実験を行っている。また赤線で示されているのはロック範囲の中で、緑線で示されているのはロック範囲外の時である。インジェクションロックがかかるとモードの数が急激に増加している。

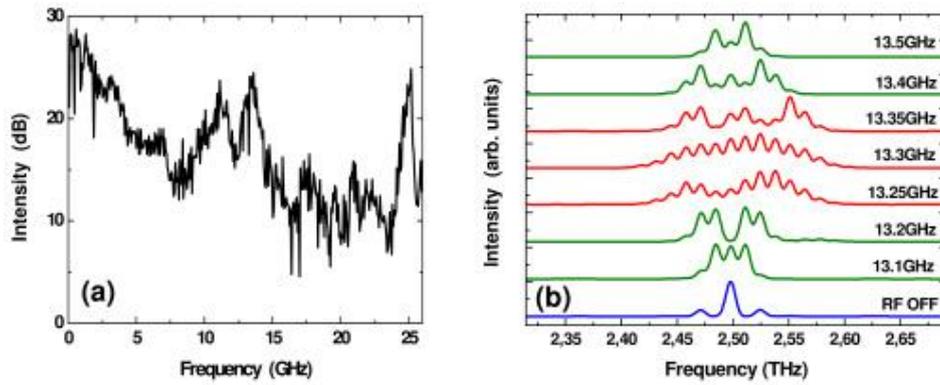


図 3.3.5 実験結果

図 3.3.6 は、RF 信号 10.042GHz と 10.098GHz でインジェクションロックした時の時間波形とスペクトルを比較している。それぞれの RF パワーは 6dBm, 14dBm で、右列に示した方はインジェクションロック範囲ギリギリになっている。

左図では、時間波形が一定でスペクトル編幅も細くなっていることが分かるが、右図では時間波形が乱れていてスペクトル線幅も広がっていることが分かる。

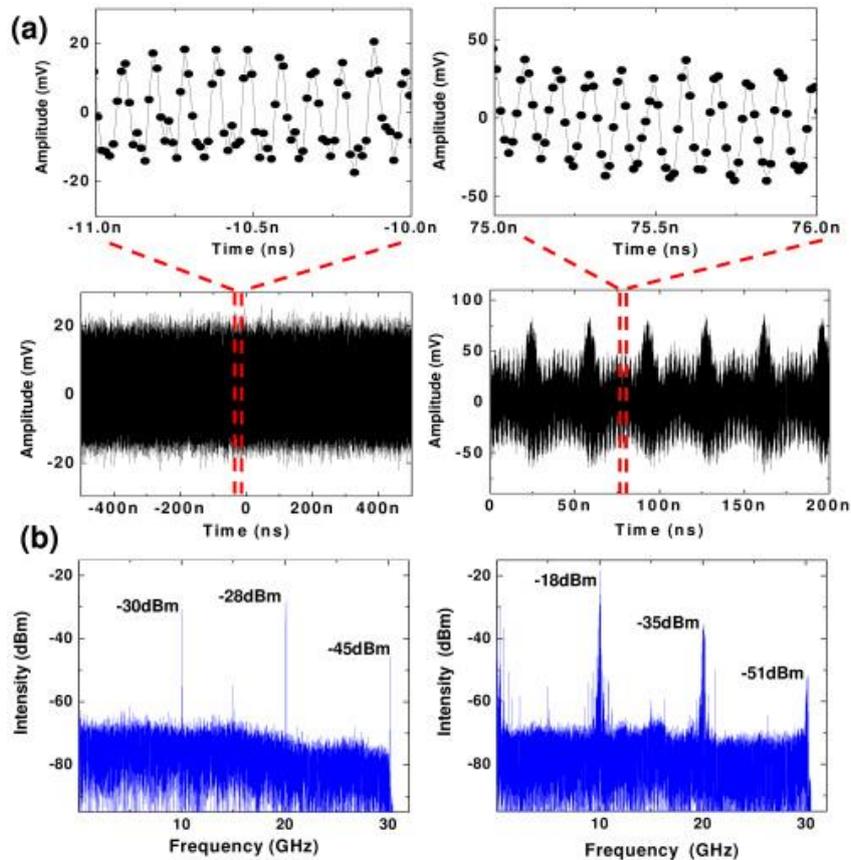


図 3.3.6 実験結果

3.4. まとめ

本稿では、振幅変調 (AM) を用いた RF インジェクションロックが、RF シンセサイザーと THz-QCL の繰り返し周波数を位相同期させるための有効なテクニックであることを示した。さらに、金属導波管と単一プラズモン導波管を用いた装置を使用して、低い RF 信号パワーで数百 MHz の範囲までロックできることを示すために、THz-QCL の高い変調帯域幅を利用した。ロック範囲の中では、繰り返し周波数の位相ノイズは RF シンセサイザーのものと同様である。

4. Modulation properties of optically injection-locked quantum cascade lasers [7]

4.1. イントロダクション

光インジェクションロックは、近年、可変の光学発振器と高帯域な無線周波数通信手段を確立するための手法として現れた。サブバンド間 QCL 幾何学によって、パワースケーリング、線幅の狭窄化、周波数コムの周波数ノイズ軽減と同様に振幅変調の軽減が観測された[8]。また変調帯域幅の拡大は、滝状の利得段を考慮に入れていない単純なモデルで理論的に示された。

本研究では、理論的にインジェクションロックされたシングルモード QCL の強度変調 (IM) 特性と同様の分岐ダイアグラムを調査することを目指している。

4.2. 実験原理

本実験ではレート方程式に基づいて計算を行っている。レート方程式とは、レーザー発振解析のための基本式で、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、レート方程式における QCL のインジェクションロックモデルを使用し、各パラメーター (キャリア数、緩和時間、利得段数、利得係数など) を代入することで、シミュレーションを行っている。

$$\frac{dN_3}{dt} = \eta \frac{I}{q} - \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_3}{\tau_{31}} - G_0 \Delta NS \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} + G_0 \Delta NS \quad (2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{out}} \quad (3)$$

4.3. 実験結果

本実験では、"Matcont" というソフトウェアを用いてサドルノード (SN) 分岐とホップ分岐を調査する。計算結果を図 4.3.1 に示す。同期状態から、LEF (linewidth enhancement factor) を 0~2.5 まで増加させることによって、拡大された。中間帯レーザーと比較して、ゼロ離調の QCL は低いインジェクションレベルでいつも安定していない。LEF を大きくすると、BT1 は注入率の負軸へ動く (BT2 は反対に動く)。LEF0 に関しては、分岐は左右対称であるが、LEF がゼロでない時は非対称分岐となる。双安定性領域は LEF1.0 におけるマイナスの離調側の尖頭ポイントの近くに現れる。LEF2.5 に関しては、小さい不安定なロックされた領域はプラスの離調側に現れている。中間帯レーザーと比べると、

直接分岐ダイアグラムの違いを超えたすべては、QCL ($\tau_p/\tau_{32}=1.85$) における光子寿命とキャリア寿命の高い比の結果と考えることができる。さらにシミュレーションは、大きいLEFが変調応答におけるピーク振幅を増加させるのを示している。

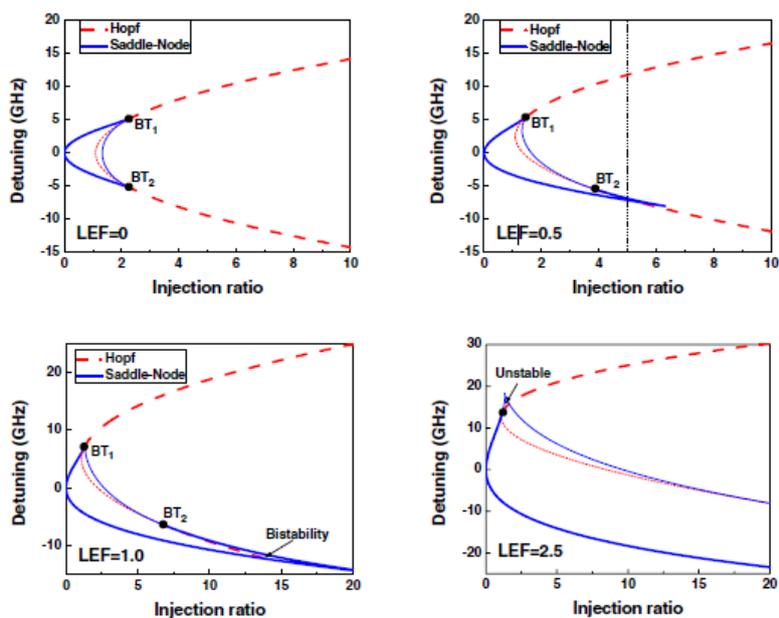


図 4.3.1 実験結果

フリーランニングのQCLは、キャリア寿命が超高速であるため共振ピークなしで平坦なIM応答を示すことが知られている。さらに、バイアス電流を増加させることによって、変調帯域幅を高めることができる。しかしながら、これは余分な熱上昇とスペクトル特性の悪化により制限される。図4.3.2の挿入図は、ゼロ離調のインジェクションロックされたレーザーは、共振ピークが出ないことを示している。また図4.3.2は、光注入の強さによって3dBの変調帯域幅が増加するのを示している。しかしながら帯域幅は、強いパワーを注入することによって飽和状態になる傾向がある。

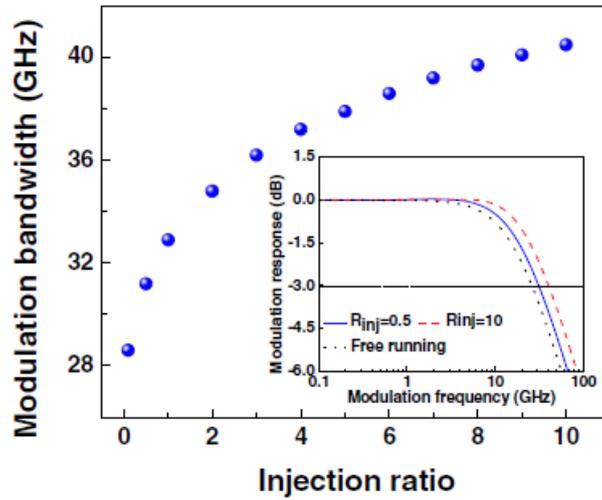


図 4.3.2 実験結果

図 4.3.3 には、変調応答への離調効果を示す。離調範囲は分岐ダイアグラムに関しては安定した同期状態に制御される。3dB の帯域幅が正と負の離調で広がっているのがわかる。挿入図から、両方の離調によってピークが出ていることがわかる。しかしボード線図解析から、根本的な仕組みは異なっていることが分かった。

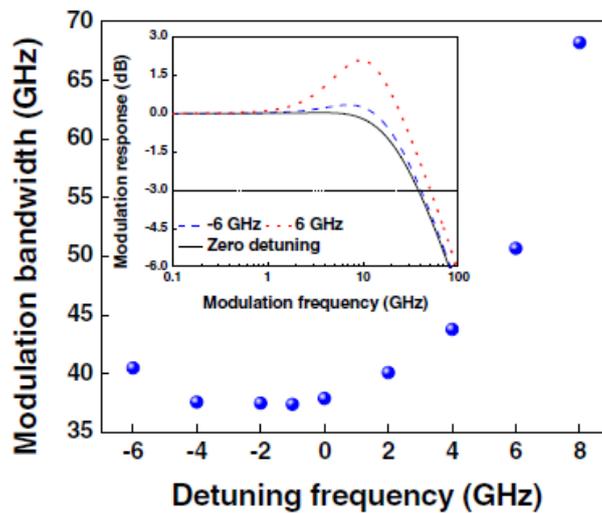


図 4.3.3 実験結果

QCLの1つの基本的な特徴は、多段の滝構造である。電子がそれぞれの段階で利得と光子放出する。段階の番号に比例した量子効率につながる。したがって、滝の利得段番号の IM 応答への影響を研究する。同じバイアス閾値電流比 ($I_{bias}=1.5I_{th}$) でフリーランとインジェクションロックのレーザーで、応答が段数によってわずかに影響を与えられることが示されている。しかしながら、すべての応答が $N_{pt}=30$ であるとき、図 4.3.4 に示されているように、応答の振幅がより大きい段数によって増加する

のがわかる。これは、応答形は同様のままで、より多くのパワーが変調で得られていることを意味している。対照的に図4.3.4の挿入図は、定常段階特性が段数によって強い影響を受けることを示す。より多くの利得段が QCL にある状態で、上下の「サブバンド」の両方のキャリアは光子数がほとんど一定のままで残っているが減少する。さらに、フリーランニングのレーザーの閾値電流はかなり減少する。フリーランニングレーザーと比べると、下側の「サブバンド」(N2) のものはわずかに増加するが、固定レーザーの上側の「サブバンド」(N3)のキャリア番号が減少する。基底状態の集合は $N_1 = \tau_{out} \eta I / q$ で一定のままで残っている。そのうえ、レーザーパワーは増大される。

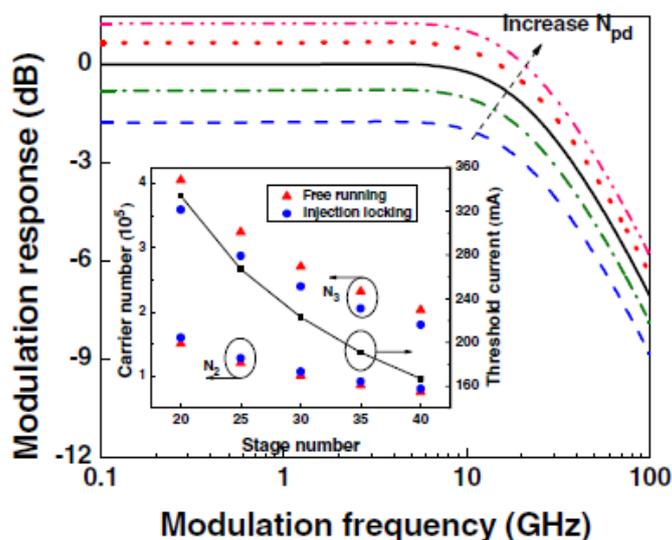


図 4.3.4 実験結果

4.4. まとめ

結論として、光インジェクションロックしたTHz-QCLにおいて分岐マップと変調応答の理論解析を行った。これにより、LEF値が増加するのに従って安定したロック状態が広がることが示された。一方、双安定と不安定にロックされた状態の両方がこの力学的システムでわかる。さらに、LEF値を大きくするとIM応答におけるピーク振幅を増加させる。注入率がマスタースレーブ周波数差のどちらかを増加させると、3dBの変調帯域幅が広がる。QCLの利得段番号は、より多くの利得段がある電流閾値やキャリア数の減少などの定常状態特性に主に影響を及ぼす。これらの結果は、光インジェクションロックのさらなる実験が現在必要であることを示唆し、QCLの性能向上のために最も重要である。

5. 結言

今回の雑誌会では、インジェクションロックに関する論文を紹介した。1つ目の論文では、OMOをRF信号とインジェクションロックすることによって、周波数と位相を同期した。これにより、OMOを用いたアプリケーションの応用が期待されている。2つ目の論文では、2種類のTHz-QCLとRFシンセサイザーのインジェクションロックを行っており、RFシンセサイザーの持つ高い周波数安定性と細い線幅をTHz-QCLにも反映させることができた。さらに3つ目の論文では、QCLの光インジェクションロックをレート方程式モデルによってシミュレーションした。これによってQCLの特性評

価を行うことができ、更なる QCL の性能向上につながると考えられる。

全体を通して QCL のインジェクションロックを行うことで、スペクトル幅の狭窄化が達成できている。QCL の制御方法などの基礎知識を得ることが出来たので、早く THz-QCL を使いこなしてファイバーレーザーとのビート信号の検出を行いたいと考える。また自分でも THz-QCL のインジェクションロックの実験を行いたいと考える。

参考文献

- [1] A. A. Danylov, T. M. Goyette, J. Waldman, M. J. Coulombe, A. J. Gatesman, R. H. Giles, X. Qian, N. Chandrayan, S. Vangala, K. Termkoa, W. D. Goodhue and W. E. Nixon, OPTICS EXPRESS, **18**, 16264-16272 (2010).
- [2] M. H. Zadeh and K. J. Vahala, APPLIED PHYSICS LETTERS, **93**, 191115 (2008).
- [3] H. Rokhsari, T. J. Kippenberg, T. Carmon and K. J. Vahala, OPTICS EXPRESS, **13**, 5293 (2005).
- [4] 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, OPTICS EXPRESS, **18**, 20799-20816 (2010).
- [5] R. Paiella, F. Capasso, C. Gmachl, H. Y. Hwang, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho and H. C. Liu, APPLIED PHYSICS LETTERS **77**, 169-171 (2000).
- [6] C. Y. Wang, L. Kuznetsova, V. M. Gkortsas, L. Diehl, F. X. Kärtner, M. A. Belkin, A. Belyanin, X. Li, D. Ham, H. Schneider, P. Grant, C. Y. Song, S. Haffouz, Z. R. Wasilewski, H. C. Liu and F. Capasso, OPTICS EXPRESS **17**, 12929-12943 (2009).
- [7] C. Wang, F. Grillot, V. Kovanis, J. Bodyfelt and J. Even, OPTICS LETTERS **38**, 1975-1977 (2013).
- [8] S. Borri, I. Galli, F. Cappelli, A. Bismuto, S. Bartalini, P. Cancio, G. Giusfredi, D. Mazzotti, J. Faist and P. De Natale, OPTICS LETTERS **37**, 1011 (2012).