

光注入量子カスケード半導体レーザ変調特性のキャリア緩和時間依存性 Effects of Carrier Relaxation for Modulation Characteristics in Injection-locked Quantum Cascade Lasers

静大院工 ○伊藤 惇, 生源寺 類, 大坪 順次
Shizuoka Univ. ○Jun Ito, Rui Shogenji, Junji Ohtsubo
E-mail : tajohts@ipc.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

量子カスケード半導体レーザ(QCL)は活性層内部に量子井戸を多数持ち、そのレーザ発振は伝導帯におけるサブバンドの準位間遷移によって実現される。QCLはテラヘルツ波領域での発振が可能であるため、薬物の検出や無線通信などに応用が期待されている。通信においてQCLの変調帯域を拡大させるために、従来のレーザと同様に光注入による変調帯域拡大の方法が考えられる。しかし、注入率と周波数離調を大きくするだけでは変調応答に緩和振動ピークが現れ、良特性とは言いがたいものになる。このため、サブバンドにおけるキャリアの緩和時間等を調整することにより、デバイス側から変調特性の改善を図る必要がある。

本研究では、外部光注入されたQCLにおける小信号変調特性を数値計算によって調査した。特に、キャリアの緩和時間を変化させた場合に、変調特性がどのように変化するかを調べた。

2. 数値計算モデル

QCLは、通常量子井戸におけるサブバンドの3つのエネルギー準位で考えられる。Fig.1にそのエネルギーバンドの模式図を示す。

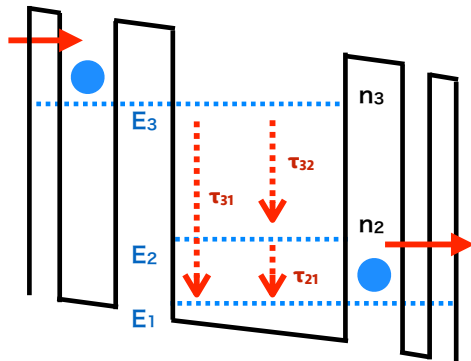


Fig.1 Energy Band Diagram.

光注入されたQCLの電場とキャリア数のレート方程式を以下に示す。

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 - i\alpha)[N_p G\{n_3(t) - n_2(t)\} - \frac{1}{\tau_{ph}}]E(t) + f_d E_{inj}(t) \exp(-i\Delta\omega t) \quad (1)$$

$$\frac{dn_3(t)}{dt} = \frac{I}{e d} - \frac{n_3(t)}{\tau_3} - G\{n_3(t) - n_2(t)\}|E(t)|^2 \quad (2)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = \frac{n_3(t)}{\tau_{32}} - \frac{n_2(t)}{\tau_{21}} + G\{n_3(t) - n_2(t)\}|E(t)|^2 \quad (3)$$

式(1)の右辺第二項は、光注入率 f_d と周波数離調 $\Delta\omega$ を含む外部光注入の影響項である。式(2)と式(3)のキャリア数の式にはキャリアの緩和時間 τ が含まれており、今回はエネルギー準位 E_2 から E_1 の緩和時間 τ_{21} に着目する。

3. 数値計算結果

Fig.2に、周波数離調に対する小信号変調応答の変化を示す。一般的にQCLにおいて負離調時には帯域幅の拡大がほとんど見られないので、ここでは正離調時のみを考える。注入率は全て10dBとし、赤線は周波数離調0GHz、緑線は10GHz、紫線は20GHzのときの変調応答を示している。キャリアの緩和時間 τ_{21} は、Fig.2(a)、(b)それぞれ1.0[ps]と0.2[ps]である。Fig.2(a)、(b)ともに、周波数離調が大きくなるにつれて変調帯域の拡大が見られるが、変調周波数10GHz辺りから緩和振動ピークが立っている。図から、キャリア寿命を小さくすることにより、緩和振動ピークを抑えることができることが分かる。

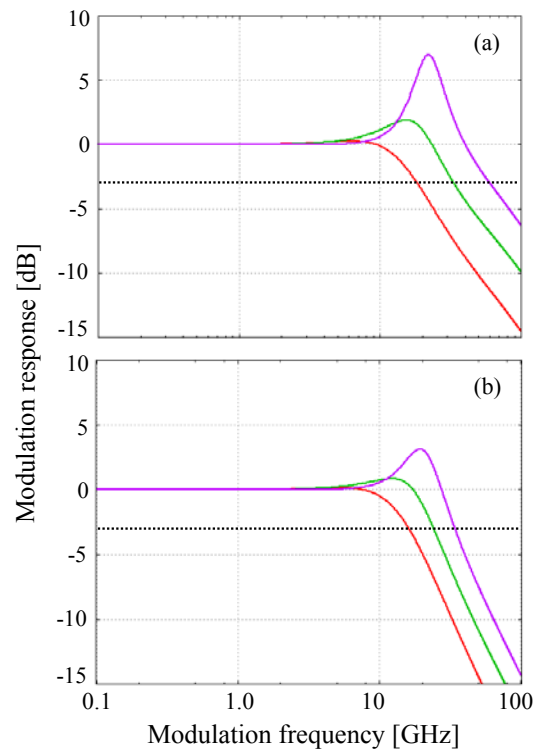


Fig.2 Modulation Response : carrier lifetime τ_{21} at (a) 1.0ps and (b) 0.2ps.

4. まとめ

今回、キャリアの緩和時間を変化させた場合、光注入されたQCLの変調帯域がどのように変化するかを調査した。注入率と周波数離調の増加によって変調帯域が拡大され、さらにキャリアの緩和時間を早くすることによって変調応答のピークを制限することができることを示した。QCLの材料構造、デバイス構造を変えることによりキャリア寿命を変化させ、変調応答を改善させることができたことが分かった。