

論文の内容の要旨

Title of Thesis: "Study on New Heatsink Structures for Reduction of Temperature Sensitivity in Semiconductor Lasers"

論文題目「半導体レーザーの温度依存性を低減する新しいヒートシンク構造に関する研究」

氏名 井上大介

1-1.背景

半導体レーザーは小型で体積の割に高出力で扱いやすいという特徴をかねそろえたレーザーであり、民生品、計測器、通信機器など幅広い分野に応用されており日常生活に不可欠なものとなっている。特に InGaAsP 系長波長半導体レーザーは石英光ファイバでの損失が少ない波長で発振し高速変調できるため、通信システムの光源として必要不可欠なものとして注目されている。

1-2.これまでの技術の問題点

半導体デバイスは温度によって電気的特性が大きく変化することが欠点であり、InGaAsP 系長波長半導体レーザーは材料の性質上半導体の中でもとりわけ温度特性が悪い。実用化している製品はペルチエ素子を用いて温度を一定に保って特性変化を防いでいるが、半導体レーザーの消費電力が数 mA ないし数十 mA であるのにたいしペルチエ素子の消費電力は数百 mA ないし数 A とペルチエ素子は実に数十倍の「無駄な」電力を消費している。

1-3.目的

本研究の目的は半導体レーザーの発振しきい値や発振波長などの温度特性を改善できるヒートシンクを開発することである。

2. 熱応力による温度特性補償ヒートシンクの提案

半導体には歪みを与えると結晶の周期構造が変化しバンド構造が変化しバンドギャップや屈折率が変化するという性質がある。したがって半導体レーザーに応力を加えると発振波長やしきい値が変化することが知られている。我々は、半導体レーザーに温度に応じた適切

な歪みを与えれば温度による特性の変化を補償させることができると考えて、半導体レーザを載せるヒートシンクが温度によって変形することによって半導体レーザが変形し温度による特性の変化を補償させるような「温度補償ヒートシンク」を考案した。

この方法はこれまで研究されてきた量子井戸構造の最適設計と併用することができるという利点があるほか、半導体レーザ以外の半導体デバイス一般にも広く応用できる可能性を秘めた実用的で有望な研究である。

3. 外的歪みによる半導体レーザの特性変化の理論的考察

3.1 バンド構造の計算

バンド構造の計算の際に歪みの効果と温度変化の効果を取りこむ。歪むの効果を取りこんだ Luttinger-Kohn のハミルトニアンで活性層の量子井戸のバンド構造およびエネルギー準位を計算する。ハミルトニアンを作るとき同時に InGaAsP 系材料のバンドギャップの温度依存性をここで取りこむ。そして、次の波動方程式を解くことで波動関数と固有値が得られる。

コンダクションバンド側

$$\left[H^{el} + U_{el}(z) + V(z) \right] \phi_i^{el}(k, z) = E_i^{el}(k) \phi_i^{el}(k, z)$$

バレンスバンド側

$$\sum_{v'} \left[H_{vv'}^{hl} + (U_{hl}(z) - V(z)) \delta_{vv'} \right] \phi_{m,v'}^{el}(k, z) = E_m^{hl}(k) \phi_{m,v'}^{el}(k, z)$$

ここで $U_{el}(z)$ と $U_{hl}(z)$ はコンダクションバンドおよびバレンスバンドのポテンシャル変化、 $V(z)$ は外的な電界によるポテンシャル変化、 $E_i^{el}(k)$ と $E_i^{hl}(k)$ はコンダクションバンドおよびバレンスバンドのサブバンドエネルギー、 $\phi_i^{el}(k, z)$ と $\phi_{v'}^{hl}(k, z)$ は波動関数の包絡線である。

3-2. 光学遷移確率の計算

エネルギー準位から光学遷移確率をフェルミの黄金率を使って計算する。フェルミの黄金率から近似的に導かれる光学遷移要素は次のようにかかれる。

$$\left| e \cdot P_{ml}^\sigma \right|^2 = \left| \langle \phi_c | e \cdot p | \phi_v \rangle \right|^2$$

3-3. 利得と屈折率の計算

光学遷移確率と擬フェルミ準位からゲインピークと屈折率を計算できる。

$$\alpha = \frac{\pi e^2 \hbar}{n_r c \epsilon_0 m_0^2 L_w} \left(\frac{1}{\hbar \omega} \right) \sum_{\sigma=L,U} \int \left| e \cdot \mathbf{P}_{m,l}^\sigma(\mathbf{k}t) \right|^2 L(E_m^\sigma(\mathbf{k}t) - E_l^\sigma(\mathbf{k}t) + \hbar \omega) (f_v(\mathbf{k}t) - f_c(\mathbf{k}t))$$

n_r は屈折率、 f_v, f_c は擬フェルミ準位、 L_w は井戸幅、 $L(E) = \frac{\Gamma}{\pi E^2 + \Gamma^2}$ は半値幅 Γ の

ローレンツ関数である。

屈折率変化 $\frac{\Delta n_r}{n_r}$ は次のようにして見積もられる。

$$\varepsilon_0 \chi(\omega) = \frac{1}{V} \sum_{\sigma, \eta} \sum_{l, m} \sum_{\mathbf{k}l} |\mathbf{e} \cdot \mathbf{P}_{m,l}^{\sigma}(\mathbf{k}l)|^2 \cdot \frac{f_c^l - f_{h,\sigma}^l}{E_i^c(\mathbf{k}l) - E_m^{h,\sigma}(\mathbf{k}l) + E_G - \hbar\omega - j\hbar/\tau_{in}}$$
$$\frac{\Delta n_r}{n_r} = \frac{1}{2n_r^2 \varepsilon_0} \text{Re}(\varepsilon_0 \chi(\omega))$$

ファブリペロレーザはゲインピーク変化から発振波長変化を予測でき、DFBレーザの場合屈折率変化から発振波長変化を見積もれる。

4. 半導体レーザの温度特性を保証するヒートシンク

4-1. 半導体レーザの温度特性を補償するヒートシンク

ヒートシンクの構造

Fig.1(a)のようなシリコン製のサブマウントにAu(80wt.%)Snはんだによっていったん半導体レーザを実装した。サブマウント材料にシリコンを選んだ理由は、

- シリコンの熱膨張係数(4.2 ppm/°C)が InP の熱膨張係数(4.5 ppm/°C)に近い。
- シリコンの熱伝導率が比較的よい。(151 W/m·K)
- 安価で入手しやすい。

等の理由による。

サブマウント上には電子銃蒸着装置によってTi(100nm)/Ni(100nm)/Au(100nm)の薄膜を蒸着しておき、その上に抵抗加熱蒸着装置によってAu-Snはんだを6-8 μm蒸着した。

ヒートシンクの構造を Fig.1(b)に示す。インバーの熱膨張係数は1.1ppm/°Cであり、亜鉛の熱膨張係数は30.5ppm/°Cである。亜鉛とインバーとの熱膨張係数の差のため半導体レーザがサブマウントごと曲げられる。亜鉛の長さは20mmである。

4-2. 半導体レーザの温度特性を補償するヒートシンクの作成

作成した半導体レーザの構造は Fig.2 のようになっている。半導体レーザは9つの半導体レーザが並んだ長さ4.5mmのバーの状態で使用した。

- 1.半導体レーザのバーをサブマウントの上にマウントした。このとき顕微鏡で観察しながらレーザのリッジがサブマウント上の溝にくるように半導体レーザを位置あわせした。
- 2.ここで一度測定を行った。
- 3.シアノアクリレート系接着剤(CC35)によってヒートシンクにサブマウントを接着した。
- 4.電極をヒートシンク上につけ金のワイアを超音波でボンディングした。
- 5.100°Cで2時間加熱しエージングを行った。
- 6.温度補償ヒートシンク付きでの測定を行った。

4-3. 半導体レーザの温度特性を補償するヒートシンクの性能測定

実験方法

■ 発振波長の測定

テーパファイバによって半導体レーザの出力を取り出し、スペクトラムアナライザ AQ6315B（安藤）によって半導体レーザの発振波長を測定した。

■ しきい値の測定

電流源は ILX3811(ILX Light Wave)を用いた。光出力の測定は MA93（安藤）を用いて行った。

実験結果

■ 発振波長の温度特性

半導体レーザを Si サブマウント上に実装したときの CW 発振の条件での発振波長の温度依存性と同一レーザをサブマウントごと温度補償ヒートシンクに実装した時の発振波長の温度依存性を比較したものを Fig.3(b)に示す。Si サブマウント上では 20℃から 60℃の+40℃の温度変化で、+26.0nm 発振波長がシフトしている。温度補償ヒートシンクを使った場合は 20℃から 60℃の+40℃の温度変化で、+11.8nm 発振波長がシフトしている。温度補償をかけた半導体レーザの発振波長に不連続点があるのは、利得変化と屈折率変化がかみ合わなかったために起こるモードホップとよばれる現象である。CW 発振の条件で半導体レーザを Si サブマウント上に実装したときの発振スペクトルを Fig4.(a)に、同一レーザをサブマウントごと温度補償ヒートシンクに実装した時の発振スペクトルを Fig4.(b)に示す。

CW 発振では自己発熱による発振波長の長波化と発振しきい値の上昇による発振波長の短波長化が起り、純粋な歪みによる温度補償効果が観測できない。われわれはパルス発振での発振波長の温度依存性も測定した。その結果を Fig.3(a)に示す。Si サブマウント上では 20℃から 60℃の+40℃の温度変化で、+20.9nm 発振波長がシフトしている。温度補償ヒートシンクを使った場合は 20℃から 60℃の+40℃の温度変化で、+14.5nm 発振波長がシフトしている。

■ 発振しきい値の温度特性

半導体レーザをサブマウント上に実装したときの CW 発振の条件での電流-光出力の温度依存性を Fig.5(a)に、同一レーザをサブマウントごと温度補償ヒートシンクに実装した時の電流-光出力の温度依存性を Fig.5(b)に示す。そして、発振しきい値の温度依存性を対数グラフにしたものを Fig.6(b)に示す。サブマウント上での半導体レーザの発振しきい値の特性温度は 44.9 であり、温度補償ヒートシンクを使用した場合の特性温度は 80.5 である。CW 発振しきい値の特性温度が 80%向上している。

自己発熱の影響を除くためパルス発振で計測した発振しきい値の温度依存性を Fig.6(a)に示す。サブマウント上での半導体レーザの発振しきい値の特性温度は 60.8 であり、温度補償をかけた後では特性温度は 99.8 となっている。パルス発振しきい値の特性温度が 64%向上している。

5.本研究の結論

本研究ではヒートシンクの熱歪みによって半導体レーザの発振しきい値および発振波長の

温度特性を改善する研究を行った。

亜鉛とインバーの熱膨張係数差を利用した単一軸熱応力温度補償ヒートシンクを半導体レーザーに用いることによって、20℃から60℃の温度範囲内において次のような結果を得た。

- 発振波長の温度ドリフトをCW発振では26.0nmから11.8nmへ55%抑えることに成功し、パルス発振では20.9nmから14.5nmへ31%抑えることができた。
- CW発振しきい値の特性温度が44.9から80.5へと80%改善し、パルス発振しきい値の特性温度が60.8から99.8へと64%改善した。
- この温度範囲ではレーザーの破損は見られなかった。
- SiサブマウントとAu-Snはんだにより、これまで考案されたヒートシンク構造より信頼性が高く、かつ放熱特性に優れた温度補償ヒートシンクになった。

参考文献

- [1] Shunji Seki, Kiyoyuki Yokoyama, Paul Sotirelis, IEEE, J. of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 1, NO. 2 Jun. 1995
- [2] Shunji Seki, Hiromi Oohashi, Hideo Sugiura, Takuo Hirono, and Kiyoyuki Yokoyama, IEEE J. of Quantum Electronics, Vol. 32, No. 8, August 1996
- [3] Shunji Seki, Kiyoyuki Yokoyama, Appl. Phys. Lett. 71 (18) 3 November 1997
- Doyeol Ahn and Shun-Lien-Lien Chuang, IEEE J. of Quantum electronics, Vol. 24, No. 12, December 1988
- [4] Chung-En Zah, Rajaram Bhat, Bhadrash N. Pathak, F. Favire, Wei Lin, M. C. Wang, Nicholas C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, Tien-Pei Lee, Zheng Wang, David Darby, Dale Flanders, and J. James Hsieh, IEEE, J. of Quantum Electronics, vol.20, NO. 2, Feb. 1994
- [5] A. Katz, C.H. Lee, K.L. Tai, Materials Chemistry and Physics, 37(1994) 303
- [6] A. Katz, K.-W. Wang, F. A. Baiocchi, W. C. Dautremont-Smith, E. Lane, H. S. Luftman, R. R. Varma, H. Curnan, Material Chemistry and Physics, 33 (1993) 281
- [7] Stefan Weiss, Elke Zakel, Herbert Reichl, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part.A, Vol.19 No1, March 1996
- [8] Elke Zakel, Ghassem Azdasht, Herbert Reinchl, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, Vol. 17, No. 4, November 1994
- [9] Daniel A. Coehn, Mark E. Heimbuch, Larry A. Coldren, Appl. Phys. Lett. 69(4), 22 July 1996
- [10] Daniel A. Cohen, Larry Coldren, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 3, No2, April 1997

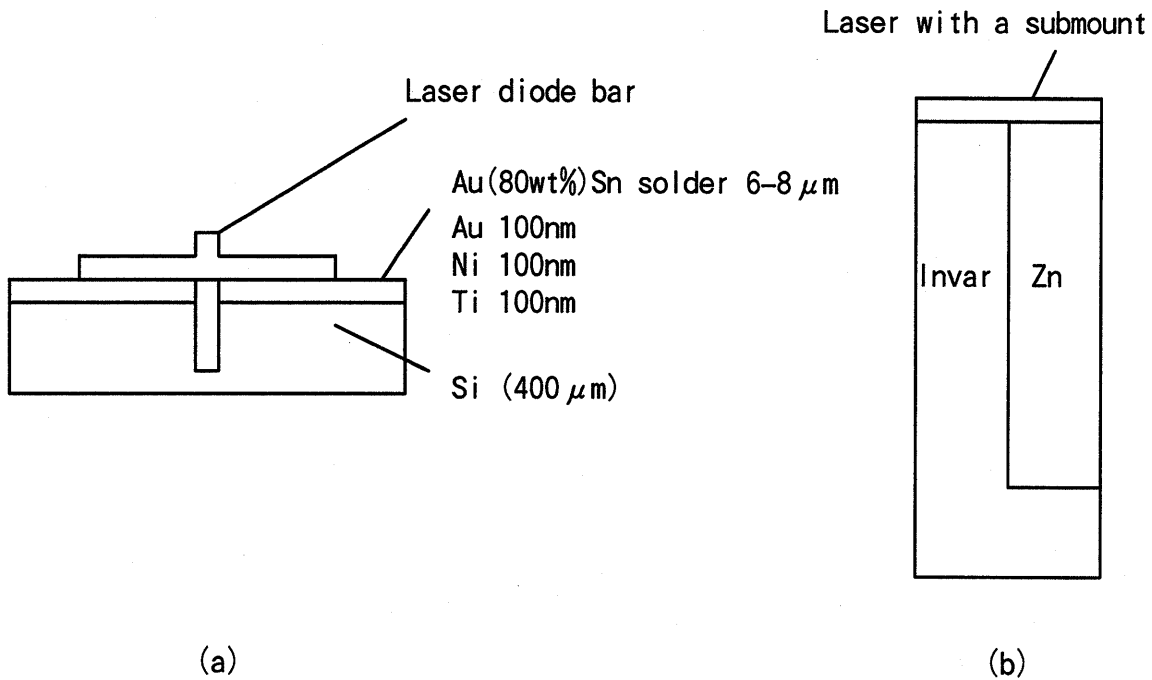


Fig.1: (a) シリコンサブマウントに実装した半導体レーザ。サブマウントの大きさは $10 \times 5 \times 0.4 \text{ mm}$ であり中央に幅 $50 \mu\text{m}$ 深さ $300 \mu\text{m}$ の溝が入れられている。この溝によって応力集中が起こる。(b) 温度特性補償ヒートシンクの模式図。大きさは $10 \times 25 \times 5 \text{ mm}$ であり、熱膨張係数の異なるインバーと亜鉛によってできている。

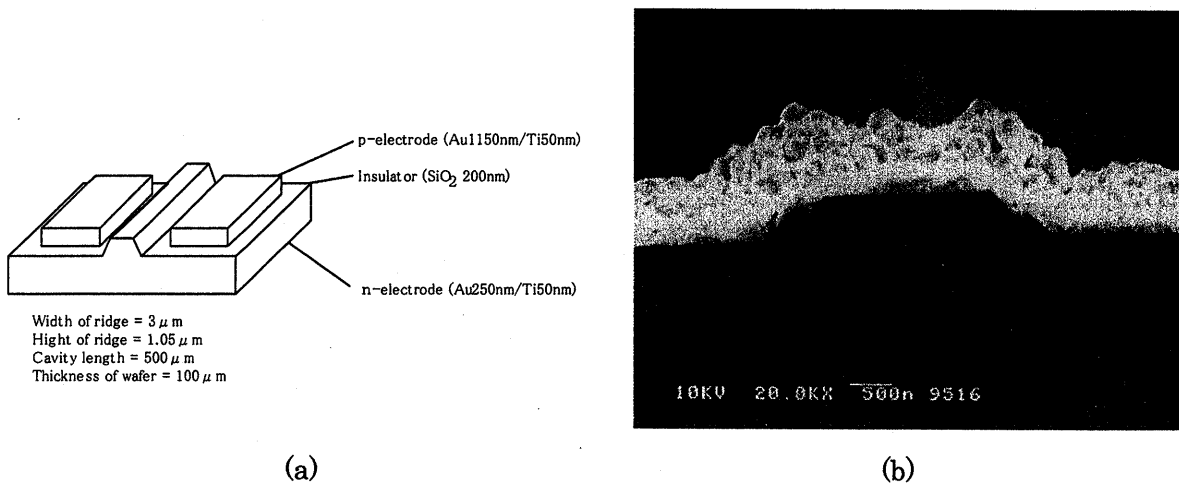
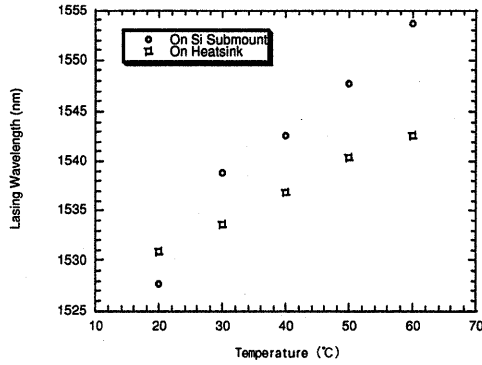
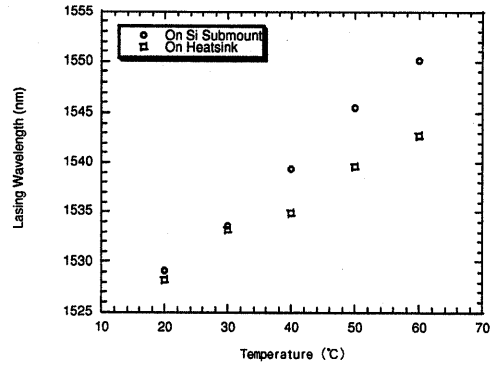


Fig.2: 作成した半導体レーザの (a) デバイス構造, (b) SEM 写真。活性層は5層の歪み量子井戸でできおりバリアの組成は $\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}_{0.54}\text{P}_{0.48}$ (格子整合、バンドギャップ $1.25 \mu\text{m}$) 幅 10 nm であり井戸の組成は $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ (1%圧縮歪み) 幅 10 nm である。

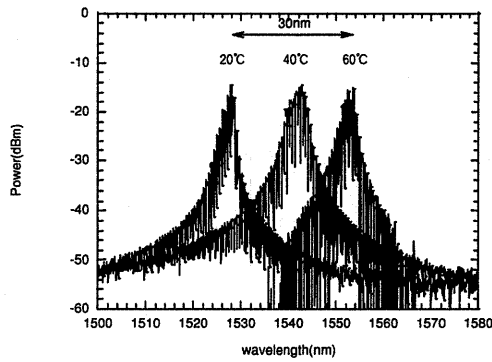


(a)

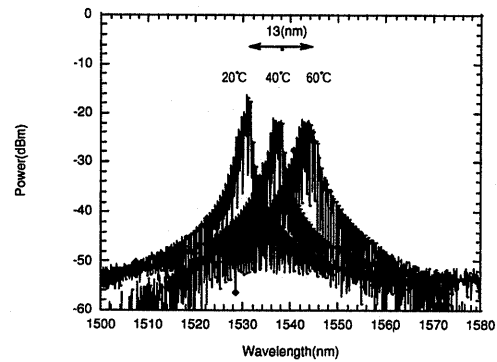


(b)

Fig.3: 発振波長の温度依存性、それぞれ、(a)パルス発振、 (b) CW 発振での測定結果。不連続点はレーザキャビティの屈折率変化と利得変化によって生じるモードホッピングである。



(a)



(b)

Fig.4: CW 発振でのスペクトルの温度依存性の比較。(a) シリコンサブマウントに実装したときのスペクトル、(b) 温度特性補償ヒートシンクに実装した時のスペクトル。

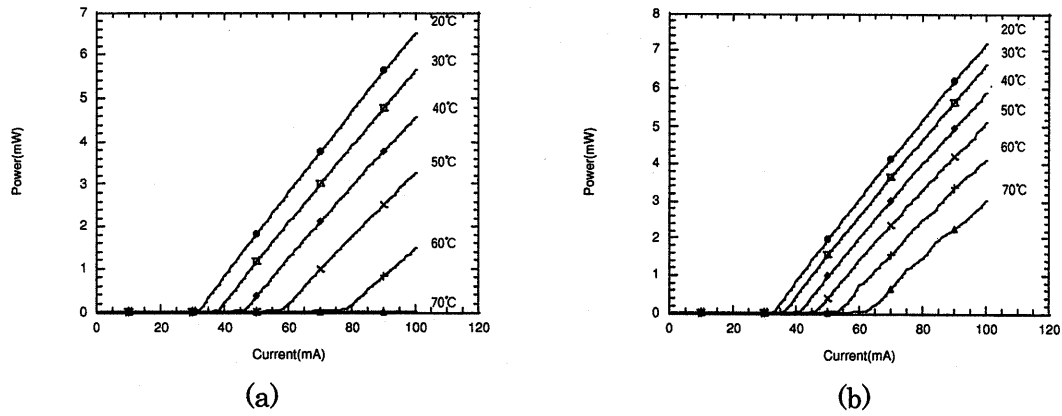


Fig.5: 電流・光出力特性の温度依存性。(a)シリコンサブマウントに実装した状態での測定結果、(b)温度特性補償ヒートシンクに実装した状態での測定結果。

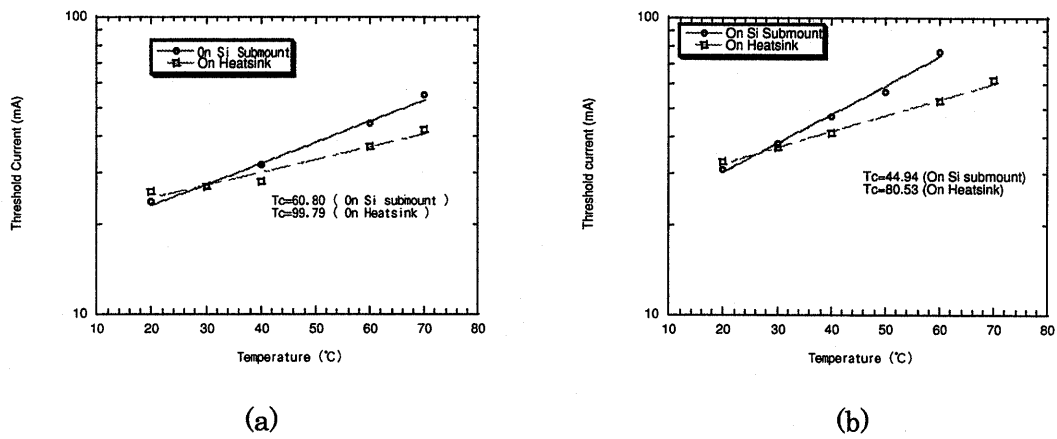


Fig.6: 発振しきい値の温度依存性。(a)パルス発振でのしきい値の温度変化、(b)CW発振でのしきい値の温度変化。CW発振のほうが特性温度の改善が大きいのはヒートシンクを追加したため放熱効率が上がったためと思われる。