

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760158

研究課題名(和文) 随伴解析に基づいたマイクロ熱プロセスの最適制御に関する研究

研究課題名(英文) Adjoint-based optimal control of micro-scale thermal processes

研究代表者

森本 賢一 (Morimoto, Kenichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：90435777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、随伴解析に基づいた熱プロセスの最適制御手法を構築すること、および本制御の有効性を実験的に検証することを目的としている。マイクロデバイスにおける熱プロセスにおいて、時空間的な温度分布制御を実現し、定常かつ空間的に一様な従来型の熱管理技術の高度化を図ることを主眼とする。本研究では、半導体パルスレーザーを具体的な制御対象とし、随伴熱伝導解析に基づいた温度均一化のための最適熱制御手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this study are to develop adjoint-based optimum thermal control schemes for thermal processes and to verify the effectiveness of the present control scheme in real experiments. The proposed scheme would allow for control of temperature distribution in micro devices in a spatio-temporal way, which is not achievable by conventional thermal management techniques that can cope with only steady and spatially-uniform temperature distribution. In the present study, optimum thermal control schemes based on adjoint heat conduction analysis have been developed for stabilization of the temperature profile in pulsed laser diodes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：最適熱制御 随伴解析 半導体パルスレーザー 熱伝導

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体デバイスや医療機器、生化学分析装置、小型発電デバイスなどへの応用を想定し、マイクロマシン (MEMS) 技術を用いたマイクロデバイスが注目されている。特に、各種デバイスのさらなる性能向上を実現するためには、高発熱密度の CPU における除熱性能の向上や高速な温度変動を伴う半導体レーザーの温度均一化など熱管理技術の高度化に対する期待が高まっている。しかし、高速な温度変動を有する半導体デバイスや時空間的な温度分布の影響が支配的となる各種熱プロセスなど、従来の定常かつ空間的に一様な温度制御技術のみでは対応できない系が多くなっている。従って、本研究で構築するマイクロ熱デバイス/熱プロセスにおける時空間的な温度分布制御技術は、既存デバイスの性能向上や設計自由度の増大をもたらすとともに、高性能・高機能熱プロセスの創出を可能にするものと期待される。

本研究では、現実的な工学応用を前提とした熱プロセスを抽出し、理論的・数値解析的アプローチにより構築する最適温度制御手法を、MEMS 技術を用いて製作されるプロトタイプにより実験的に実証することを目指す。本研究で制御対象とする半導体パルスレーザーにおいては、レーザー波長のドリフトを低減するため、パルス発振に伴う熱散逸による急激な温度変動を抑制することが重要である。しかし、従来の冷却技術では、熱容量が大きく、1 μ s オーダーの半導体素子の熱時定数には対応できない。そこで、著者らは、高時間応答性を有した温度制御としてヒーター加熱によるフィード・フォワード制御手法を開発し、その有効性を理論的および実験的に検証してきた。

2. 研究の目的

既報にて 1 次元熱伝導を仮定した端面発光型の半導体パルスレーザーモデルにおいて、随伴解析を用いた最適温度制御スキームを開発し、数値解析・実験の両面においてパルス加熱時間内の活性層内最大温度差を顕著に低減できることを実証している。

本研究では、随伴解析を用いた最適温度制御を拡張し、素子上面に加えて素子内部にヒーターを配置する多制御入力系に適用する。また、本手法をレーザー出射方向が基板面と垂直となる面発光レーザー (VCSEL) に適用するため、面内温度分布を有する多次元熱伝導を考慮した最適温度制御手法を構築する。さらに、実デバイスへの適用を図るため、実験誤差を考慮した実用的な最適熱制御スキームを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、半導体パルスレーザーの高時間応答最適温度制御手法を開発する。本研究

内容は、最適制御理論に基づいた理論的/数値解析的アプローチによる最適制御手法の構築、マイクロマシン技術による評価実験用デバイスの製作、および本手法の実験的評価により構成される。数値解析技術については、独自の計算コードを拡張し、本制御問題に適用する。また、プロトタイプデバイスの製作には現有のマイクロマシン製作装置を利用し、本最適熱制御手法の評価実験システムを構築する。

4. 研究成果

図 1 に、本研究で解析対象とする半導体パルスレーザーモデルの模式図を示す。Case 1 では端面発光型レーザー (EEL)、Case 2 では面発光レーザー (VCSEL) を想定している。レーザー素子の発熱量は、活性層内で空間的に一様に分布するものと仮定し、レーザー上面に配した制御ヒーターからの熱入力により活性層内の温度変動を抑制するための最適制御スキームを構築する。

本制御では、レーザー照射時における活性層内温度変動を最小化することを目的とし、評価汎関数 J を活性層温度 T と目標温度 T_{target} の差の二乗積分として、以下のように定義する。

• Case 1

$$J(q, w_1) = \int_0^{\tau} \int_{x_A}^{x_B} (T(x, t; q, w_1) - T_{\text{target}})^2 dx dt, (1)$$

• Case 2

$$J(q) = \int_0^{\tau} \int_{z_A}^{z_B} \int_0^{r_1} (T(r, z, t) - T_{\text{target}})^2 r dr dz dt (2)$$

ここで、Case 1 において、制御熱入力 $q(t)$ 、 $w_1(t)$ は、それぞれ制御用ヒーター 1 (上部ヒーター) による正のみの熱流束、制御用ヒーター 2 (内部ヒーター) による正の発熱量とする。また、Case 2 において、制御熱入力 $q(r, t)$ は、上面の制御用ヒーター ($r = r_A \sim r_B$) により与えられる正のみの熱流束とする。本研究では、固体層内の熱伝導がフーリエ則に従うものと仮定し、随伴熱伝導解析を行った。本制御スキームにおいて、随伴温度変数 $\Psi(x, t)$ を用いることで随伴方程式系が構成され、評価関数 J の勾配を以下のように導出できる。

• Case 1

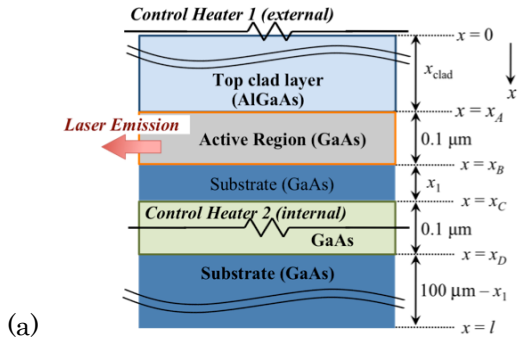
$$J'_q = \psi(0, t), \quad J'_{w_1} = \int_{x_c}^{x_D} \psi(x, t) dx, (3)$$

• Case 2

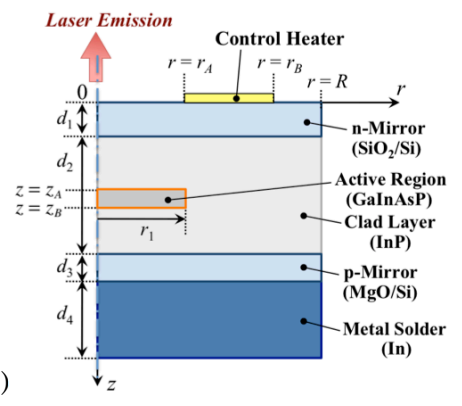
$$J'_q = \Psi(r, 0, t), \quad (r_A < r < r_B) (4)$$

式 (3)、(4) を用いることで、勾配法に基づいた最適熱入力を得るための制御スキームを構成することができる。

Case 1 において、内部ヒーターの効果を調査した。上部クラッド層厚さ (x_{clad}) は内部ヒーター・活性層間距離 (x_1) と等しいものとし、



(a)



(b)

図1 半導体レーザーの模式図：(a)端面発光型、(b)面発光型.

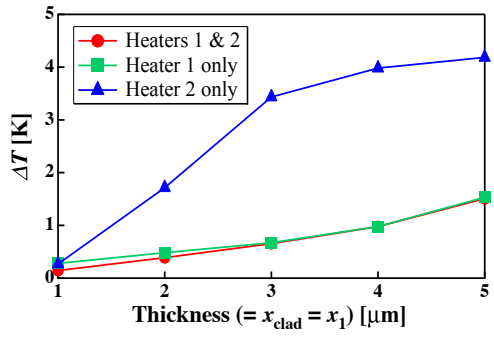


図2 活性層内最大温度差とクラッド層厚さの関係

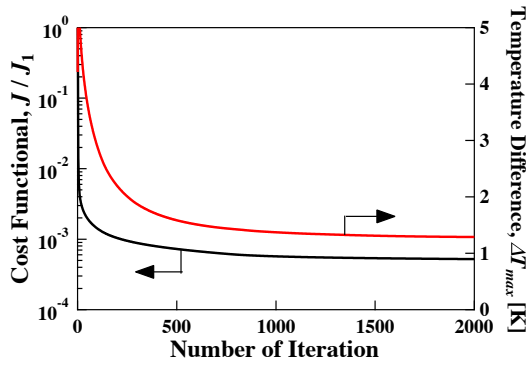
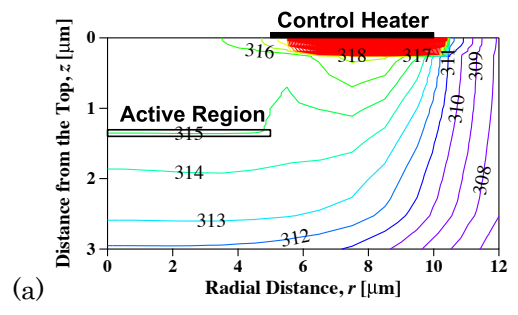
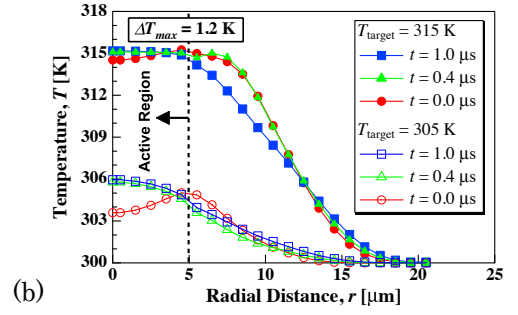


図3 評価関数、最大温度差の収束過程

$x_1 = 1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ と変化させた場合の制御結果を図2に示す. 縦軸はレーザー照射時における活性層内の最大温度差を示している. $x_1 < 3 \mu\text{m}$ では内部ヒーターを用いることで上

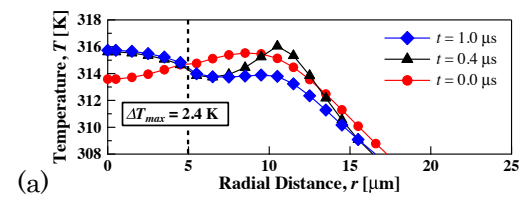


(a)

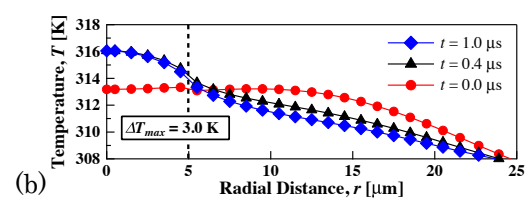


(b)

図4 本制御による温度分布の変化：(a) 空間分布、(b) 半径方向分布の時間変化



(a)



(b)

図5 加熱位置の影響：(a) $r_A = 10 \mu\text{m}$ 、(b) $r_A = 15 \mu\text{m}$.

部ヒーターのみの場合より制御結果が向上する. 一方, $x_1 > 3 \mu\text{m}$ では, ほぼ効果がないことがわかる. また, 内部ヒーターのみでは距離の増加とともに制御効果が著しく低下する. これらのことから, 内部ヒーターは効果的に機能する場合もあるものの, その効果は極めて狭い範囲に限定されることが示され, 実用的には上部ヒーター加熱のみで十分であると判断される.

Case 1における結果に基づき, Case 2においては, 素子上面に配した外部の制御ヒーターのみ考慮した. 図3に, 本最適化計算による評価関数 J , およびレーザー照射時における活性層内最大温度差 ΔT_{max} の変化を示す. 繰り返し回数の増加に伴い, J および ΔT_{max} が減少し, 本最適化スキームが有効に機能していることがわかる. ここでは, ヒーター位置を $r_A = 5 \mu\text{m}$ とし, 初期温度を $T_0 = 300 \text{K}$,

目標温度を $T_{\text{target}} = 315 \text{ K}$ としている. 本解析条件では, ΔT_{max} が非制御時の約 4.3 K から約 1.2 K まで減少する. 目標温度を $305 \text{ K} \sim 325 \text{ K}$ で変化させた場合, 目標温度が大きいほど温度変動抑制効果は大きい. 従って, 許容制御入力に応じた目標温度の設定が必要となる.

本最適制御計算 (面発光型レーザーモデル) により得られた最適時空間熱入力分布から, パルス入力開始前に急激に増大する熱入力が投入されるとともに, パルス入力開始後は熱入力がほぼ無くなる様子が明らかになった. このことは, 1次元モデル (端面発光型レーザー) における結果と符合する. 面発光レーザーにおいては, 最適熱入力が半径方向に分布し, そのピーク位置は活性層側に存在する. 図4に, レーザー照射時の深さ方向位置 $z = 1.35 \mu\text{m}$ における半径方向温度分布の時間変化を示す. 活性層内における温度上昇は, 中央部において最大となる. 一方, 制御時にはパルス入力開始前の熱入力により, 活性層外端で最大, 中央部で最小となる温度分布が形成される. その結果, レーザー照射時には活性層内の内部発熱を打ち消す深さ方向の空間温度勾配が形成され, 時空間的に均一な温度分布が得られることがわかる.

さらに, 制御用ヒーターの加熱位置の影響を調べるため, ヒーター位置を変化させた最適制御計算を行った. 図5に, ヒーター位置を変化させた場合 ($r_A = 10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}$) の結果を示す. ヒーター位置 (r_A) の増加とともに, 到達最大温度差は増大するものの, ヒーターを活性層から遠ざけた場合にも本制御が機能し, 均一な温度分布に近づくことが明らかになった. 本制御に要するヒーター加熱量は, 活性層・ヒーター間の距離の増加に伴い増加し, 制御コストは増大する.

以上のように, 半導体パルスレーザーの時空間温度分布制御を実現する観点から, 端面発光レーザーにおいて複数の制御用ヒーターを用いる系および面発光レーザーモデルを対象とした最適温度制御スキームを構築した. 活性層内温度変動を抑制する上で内部ヒーター加熱による効果は限定的であり, 上部ヒーター加熱のみによる制御手法が実用的であると考えられる. また, 1次元随伴熱伝導解析を拡張し, 2次元円筒座標系における最適熱制御スキームを構築した. 本スキームを面発光レーザーモデルに適用し, 活性層内温度変動を顕著に抑制できることが示された.

また, 実デバイスへの適用を図るため, 実験誤差を考慮した実用的な最適熱制御スキームを開発した. 本制御スキームでは, デバイス内部の温度センサ情報に基づき, 薄膜の熱物性値を推定する物性値推定スキームを随伴解析により構成し, 素子上部の加熱ヒーターからの熱入力を用いた最適熱制御手法に組み込む. 現在までに, 本手法を端面発光レーザーを模擬した1次元簡易モデルに適

用し, 物性値推定スキームを用いることで制御効果をさらに向上できることが明らかになっている.

現在までに, 評価実験用のプロトタイプデバイスの製作と評価実験システムの構築を進めてきており, 今後, 本最適熱制御手法の有効性を実験的に評価するための基盤が整備されている.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① Kenichi Morimoto, and Yuji Suzuki, “Adjoint-Based Optimum Thermal Control of Pulsed Laser Diodes,” Proc. of the 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, Japan, Aug. 10-15th, 2014 (発表予定).
- ② 森本賢一, 鈴木雄二, 「面発光レーザーの最適熱制御における加熱位置の影響」, 第50回日本伝熱シンポジウム, 仙台, 2013年5月29日-5月31日, pp. 544-545.
- ③ 森本賢一, 鈴木雄二, 「随伴熱伝導解析に基づいた面発光レーザーの最適熱制御」, 日本機械学会熱工学コンファレンス2012, 熊本, 2012年11月17日-11月18日, pp. 65-66.
- ④ 森本賢一, 木下英典, 鈴木雄二, 「随伴方程式に基づく面発光レーザーの最適時空間温度分布制御に関する研究」, 第49回日本伝熱シンポジウム, 富山, 2012年5月30日-6月1日, pp. 293-294.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 賢一 (MORIMOTO, Kenichi)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号: 90435777