

ヘテロジニアス集積技術を用いた超狭線幅波長可変レーザーの開発

Development of an Ultra-Narrow-Linewidth Wavelength-Tunable Laser Based on Heterogeneous Integration



北 智洋 (Tomohiro KITA, Ph. D.)
早稲田大学 先進理工学研究科
物理学及応用物理学専攻 教授
(Professor, Waseda University)
応用物理学会 電子情報通信学会 Optica
研究専門分野: 半導体工学

あらまし

デジタルコヒーレント光通信や FMCW 方式の光距離計測では、発振周波数の揺らぎが小さい狭線幅レーザーが必要である。本研究では、半導体光増幅器とシリコンフォトニクス波長フィルタを組み合わせたヘテロジニアス波長可変レーザーに、反射率を電氣的に調整できるミラーを導入した。反射率可変ミラーの外部に高 Q 値のファイバ・ファブリ・ペロー共振器を接続し、レーザーへ戻る光の強度を調整することで、安定した自己注入同期を実現した。その結果、発振線幅を 7 kHz まで狭窄化した。最近では、低損失で非線形光学効果が生じにくい SiN 導波路をレーザー外部共振器に用いることにより、自己注入同期を用いずに 2.3 kHz の固有線幅も得ている。本研究は、小型で広帯域に波長を制御できる狭線幅光源の実現につながる成果である。

1. 研究の目的

インターネット通信、クラウドサービス及び人工知能の普及により、光通信システムで伝送される情報量は増加を続けている。伝送容量を拡大する方法として、光の強度だけでなく位相にも情報を載せるデジタルコヒーレント光通信が広く用いられている。光の位相を利用する通信では、レーザーの発振周波数が揺らぐと受信信号の位相も揺らぎ、信号を正しく識別することが難しくなる。このため、発振線幅が狭く、位相雑音

の小さいレーザー光源が必要となる。また、狭線幅レーザーは、LiDAR のような光センシングにおいても有用である。Frequency modulated continuous wave (FMCW) 方式による距離計測では、時間とともに周波数を変化させたレーザー光を対象物へ照射し、反射光と参照光との周波数差から距離を求める。レーザーの線幅が狭いほど長いコヒーレンス長が得られ、遠方から戻る微弱な反射光を高い信号対雑音比で検出できる。

一方、通常の半導体レーザーは小型で高効率であるものの、発振できる波長範囲や発振線幅が限られている。そこで本研究では、光を発生・増幅する化合物半導体と、波長選択や光回路の形成に適したシリコンフォトニクスを組み合わせたヘテロジニアス波長可変レーザーを用いた。

本研究の目的は、広い波長可変範囲を持つヘテロジニアスレーザーに反射率可変ミラーを集積し、外部共振器からレーザーへ戻る光の量を制御することにより、安定した狭線幅発振を実現することである。

2. 反射率可変ミラーを集積化した波長可変レーザー

図 1 に、本研究で用いたヘテロジニアス波長可変レーザーの基本構造と顕微鏡写真を示す。レーザーは、半導体光増幅器である Semiconductor optical amplifier (SOA) と、シリコンフォトニクスチップとを光学的に接合した構造である。SOA が光を発生・増幅し、シリコンチップ上の光回路が発振波長を選択する。シリコンチップには、周囲長がわずかに異なる二つのリング共振器が形成されている。リング共振器では、リングを一周した光の位相が元の光と一致する特定の波長だけが共振する。リングの周囲長が異なると、それぞれの共振波長の間隔もわずかに異なる。二つのリング共振器を直列に接続すると、両者の共振波長が一致する波長だけが強く透過する。この現象をバーニア効果という。リング上に形成したヒーターを加熱すると、熱光学効果によって導波路の屈折率が変化し、共振波長が移動する。二つのリングの共振条件を調整することにより、広い波長範囲から一つの波長を選択して発振させることができる [1]。

ヘテロジニアス集積技術を用いた超狭線幅波長可変レーザーの開発

Development of an Ultra-Narrow-Linewidth Wavelength-Tunable Laser Based on Heterogeneous Integration

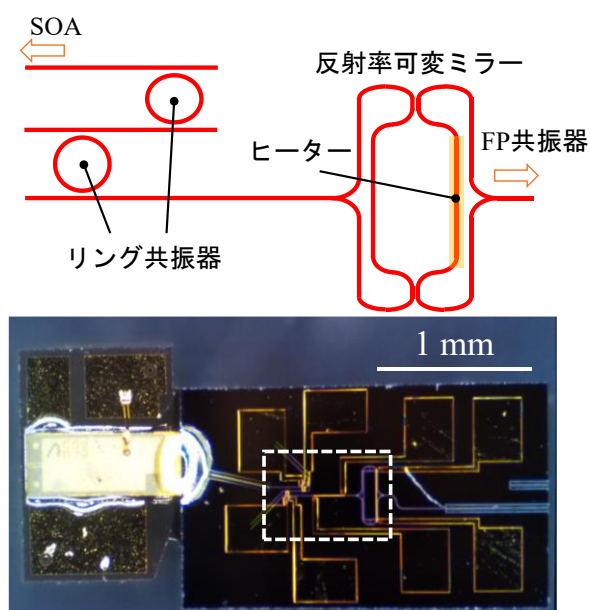


図1 パーニア効果を用いたヘテロジニアス波長可変レーザーの基本原理

レーザーの発振特性は、共振器を構成するミラーの反射率に強く依存する。反射率が高いと光はレーザー共振器内に多く戻るが、外部へ取り出される光は少なくなる。反対に反射率を低くすると、外部へ取り出される光が増加する一方、レーザー共振器内へ戻る光は減少する。本研究では、シリコンチップ上に反射率を電氣的に調整できる反射率可変ミラーを形成した。反射率可変ミラーは、二つの光経路を持つマッハ・ツェンダ干渉計型の光スイッチと等価な構造である。入力された光は二つの導波路へ分岐し、それぞれの経路を通過した後に再び合流する。一方の導波路上にはヒーターが形成されている。ヒーターを加熱するとシリコン導波路の屈折率が変化し、その経路を通過する光の位相が変化する。二つの光が合流するときの位相関係によって、光が反射側へ進む割合と透過側へ進む割合が変化する。したがって、ヒーター電力を調整することで、ミラーの反射率を連続的に変化させることができる。機械的にミラーを動かす必要がなく、シリコンチップ上の小型ヒーターのみで反射率を制御できることが本構造の特長である [2]。

3. レーザー発振中における反射率制御

最初に、反射率可変ミラーがレーザー発振中にも正しく機能することを確認した。SOA への注入電流を変化させ、レーザー出力の増加率であるスロープ効率を測定した。さらに、反射率可変ミラーのヒーター電力を変化させ、各条件におけるスロープ効率を求めた。

図3に、スロープ効率のミラーヒーター電力依存性を示す。レーザー発振する閾値電流において急激にスロープ効率が増加しており、ヒーター電力によって発振閾値が変化することが確認できる。これは、反射率可変ミラーによってレーザー共振器内へ戻る光と外部へ取り出される光との割合が変化し、レーザー発振の閾値条件が変化したためである。

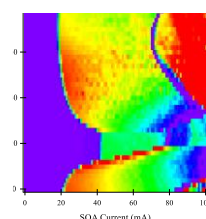


図3 レーザーのスロープ効率のミラーヒーター電力依存性

図4に、レーザーの発振閾値から算出した反射率可変ミラーの反射率とヒーター電力との関係を示す。ヒーター電力の増加に伴い、反射率は正弦関数状に変化した。これは、ヒーターによる熱光学位相変化を利用して、ミラーの反射率を連続的に制御できることを示している。以上より、ヒーター電力の調整によって、ミラー反射率を広い範囲で制御できることを確認した。ただし、反射率を極端に低くすると、レーザー共振器内へ戻る光が不足し、リング共振器による波長選択が不安定になる。したがって、反射率にはレーザーが安定して発振できる範囲が存在する。反射率可変ミラー

ヘテロジニアス集積技術を用いた超狭線幅波長可変レーザーの開発

Development of an Ultra-Narrow-Linewidth Wavelength-Tunable Laser Based on Heterogeneous Integration

は、単に出力光量を変更するための素子ではなく、レーザー共振器と外部の光回路との結合状態を調整する素子として利用できる。

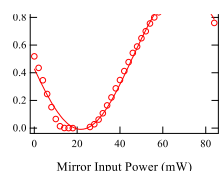


図4 反射率可変ミラーの反射率及び透過率のヒーター電力依存性

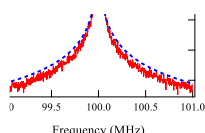


図4 遅延自己ヘテロダイン法で計測した自己注入同期時の発振線幅

5. 自己注入同期による線幅狭窄化

次に、反射率可変ミラーの外部に高Q値のファイバ・ファブリ・ペロー共振器を接続した。ファブリ・ペロー共振器は、二つの反射面の間で光を往復させる構造であり、特定の周波数の光だけが強く共振する。

レーザーから出射した光をファイバ共振器へ入射すると、共振器から戻った光の一部が再びレーザー共振器へ入射する。戻り光の周波数及び位相がレーザー発振と適切な関係になると、レーザーの発振周波数が外部共振器の共振周波数に引き込まれる。この現象を自己注入同期という。自己注入同期では、戻り光が強いほど常に線幅が狭くなるわけではない。戻り光が弱す

ぎる場合には、レーザー発振を安定化する効果が十分に得られない。一方、戻り光が強すぎる場合には、複数の発振状態が競合して発振が不安定になる。したがって、レーザーと外部共振器との結合強度には最適値が存在する。

本研究では、チップ上の反射率可変ミラーを用いて、ファイバ共振器へ出射する光及びファイバ共振器からレーザーへ戻る光の強度を調整した。ヒーター電力を調整し、安定した自己注入同期が得られる反射率を探索した結果、代表的な発振条件において7 kHzの狭線幅発振を得た(図5)。これは、反射率可変ミラーによって外部共振器からの帰還光量を適切に制御し、線幅狭窄化と安定発振とを両立できることを示す結果である。2024年に発表した研究では、反射率の調整によって自己注入同期時の線幅を数kHzから数百kHzの範囲で制御できることも確認している[2]。

6. SiN外部共振器を用いたさらなる狭線幅化

自己注入同期はレーザー線幅を大幅に狭窄化できる一方、外部に高Q値共振器を接続し、戻り光の強度や位相を調整する必要がある。実用化に向けては、外部帰還系を必要とせず、レーザー共振器自体を低損失かつ高Q値にする方法も有効である。

従来用いてきたシリコン導波路は、小型で高密度な光回路を形成できる一方、通信波長帯の強い光に対して二光子吸収などの非線形光学効果が生じる。このため、共振器を長尺化して光を強く閉じ込めると、発振が不安定になる場合があった。そこで最近では、レーザー外部共振器の主要部分にSiN導波路を用いている。SiNは通信波長帯において二光子吸収が生じにくく、低損失な長尺導波路を形成できる。SiN導波路によって波長選択用リング共振器と長いレーザー共振器を構成し、高速な位相制御が必要な部分だけにシリコン導波路を用いるSiN/Siハイブリッド構造を開発した。

この構造では、自己注入同期を用いることなく、周波数ノイズ測定から2.3 kHzの固有線幅を得た。また、65.2 nmの波長可変範囲、1 MHzの繰り返し周波数における周波数チャープ及びFMCW距離計測も実証している[3]。2.3 kHzという値は、周波数ノイズスペクトルのホワイトノイズ成分から求めた固有線幅である。

ヘテロジニアス集積技術を用いた超狭線幅波長可変レーザーの開発

Development of an Ultra-Narrow-Linewidth Wavelength-Tunable Laser Based on Heterogeneous Integration

おわりに

本研究では、SOA とシリコンフォトニクス波長フィルタを組み合わせたヘテロジニアス波長可変レーザーに、反射率可変ミラーを集積した。バーニア効果による広帯域波長可変動作を維持しながら、ミラーヒーター電力によってレーザー共振器の反射率を制御できることを確認した。

さらに、反射率可変ミラーの外部にファイバ・ファブリ・ペロー共振器を接続し、レーザーへ戻る光の強度を調整することで、安定した自己注入同期と 7 kHz の狭線幅発振を実現した。最近では、低損失な SiN 導波路を用いた外部共振器により、自己注入同期を用いずに 2.3 kHz の固有線幅も得ている。

異なる光材料の長所を組み合わせるヘテロジニアス集積技術は、単一材料だけでは実現が難しい高機能レーザーを小型化する上で有効である。本研究成果は、通信及びセンシングに用いる集積型狭線幅光源の実現に向けた基盤技術となるものである。

この研究は、令和 4 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 5 ～ 7 年度に実施されたものです。

用語解説

- *1 デジタルコヒーレント光通信 光の強度に加えて位相や偏波を利用して情報を伝送する通信方式である。大容量かつ長距離の光通信に用いられる。
- *2 FMCW Frequency-Modulated Continuous Wave の略である。光の周波数を時間とともに変化させ、対象物からの反射光と参照光との周波数差から距離や速度を測定する方式である。

参考文献

- [1] T. Kita, R. Tang, and H. Yamada, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 22, No. 6, Art. No. 1500612, 2016.
- [2] T. Yabuki and T. Kita, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 63, 04SP54, 2024.
- [3] T. Tsunoda and T. Kita, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 65, 07SP03, 2026.