

誘導ブリルアン散乱を用いた半導体レーザーの線幅狭窄化

日大生産工(院) ○和田 知也 , 中野 晶博
日大生産工 南 康夫 , 野邑 寿仁垂 , 石澤 淳

1) まえがき

近年、センシング技術や移動体通信の発展には高速無線通信の進歩が不可欠であり、Beyond 5 G / 6 Gに向けてミリ波・テラヘルツ帯の開拓が必要とされている。

従来の電気的手法では高周波帯でノイズ増幅や伝送品質の劣化が生じ、大容量通信の障害となる。そこで我々は、低位相ノイズ性と高度変復調が可能な光周波数コムと光電変換を用い、超高速・大容量な次世代無線通信を実現することを目指している。特に光ファイバーや光共振器を用いたブリルアンレーザーは、非線形光学効果により狭線幅を実現できるため、注目されている¹⁾。

本研究では、誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) リング共振器が非常に狭い線幅を有する点を利用し、外部共振器型半導体レーザーの出力を高精度で安定化させ、位相雑音を低減することを目指し、SBS の特性評価を行った。

2) 誘導ブリルアン散乱 (SBS)

誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) は、光ファイバー中の光と音波 (フォノン) との相互作用によって生じる非線形光学現象である。この現象では、入射光の一部が後方に散乱され、数GHz程度の周波数シフトを伴うブリルアン散乱光が生成される。SBSは非常に鋭い共鳴特性を示すことから、光のスペクトル幅を狭める手法として注目されている。ブリルアン周波数シフト (Hz) を ν_B 、光ファイバーの屈折率を n 、媒質中の音速 (約5~6 km/s) を V_A 、入射光の波長を λ とすると、

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda} \quad (2.1)$$

と表せる。

入射光 (ポンプ光) は、媒質中に音響波を励起する役割を果たす。光が媒質中を伝搬すると、光の電場が媒質の分極を周期的に変化させ、その結果、光圧によって媒質中に音波が発生する。この音波は、屈折率が周期的に変調された領域として働く。入射光によって生じた音波は、動く回折格子のように振る舞う。この格子によって光が後方方向に反射される。この反射光が、いわゆるブリルアン散乱光 (特にストークス光) である²⁾³⁾。



Fig.1 誘導ブリルアン散乱の概要図

石英系 (シリカ) ファイバーを想定すると、屈折率、音速、波長のパラメータは $n = 1.444$ 、 $V_A = 5960 \text{ m/s}$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ である。これらを用いて、ブリルアン周波数シフトを、式 (2.1) に当てはめて数値計算すると以下のようにになる。

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda} \cong 1.11048 \times 10^{10} \text{ Hz} \quad (2.2)$$

したがって、1550 nm帯の石英系ファイバーでは、ブリルアン周波数シフトは約11.10 GHzとなる。

3) 実験方法および測定方法

Fig. 2 にSBS発生の実験配置図を示す。波長可変レーザーには、波長1530 -1565 nm と可変で、23 dBm の最大出力を持つものを使用した。サーキュレーターを通してレーザー光に戻る光がレーザー光源の故障の原因となるため、それを防ぐためにサーキュレーターとレーザーの間にアイソレーターを接続した。SBSによ

って生じた光は 実験装置図の緑線で示す方向に伝搬している。そして、PMF内で起きたSBSをカプラーを用いて90/10に分岐し、10%ポートをレーザー光源から出たモニター光をフォトダイオード (PD) でバランス検出し、RF スペクトルアナライザーで計測した。

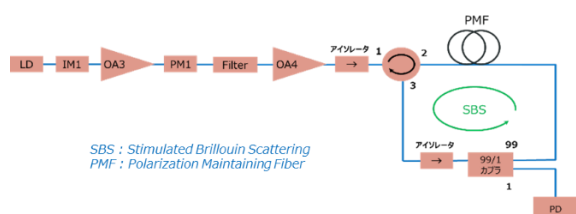


Fig.2 実験装置図

4) 実験結果および検討

Fig. 3 は、Fig. 2 に示した 90/10 カプラーの 10% ポートから出力される光強度の入射光強度依存性を示している。入射光強度を徐々に増加させたところ、20.6 dBm において出力光強度が急激に増大したことから、SBS (誘導ブリルアン散乱) が発生するために必要な入射光強度は 20.6 dBm 以上であることがわかった。また、入射光強度を 20.5 dBm および 20.6 dBm に設定した際の SBS の様子を RF スペクトルアナライザーで観測した。その結果、20.5 dBm では SBS が確認されなかった一方、20.6 dBm では明確に SBS が観測された。したがって、SBS の閾値は 20.6 dBm であると判断された。

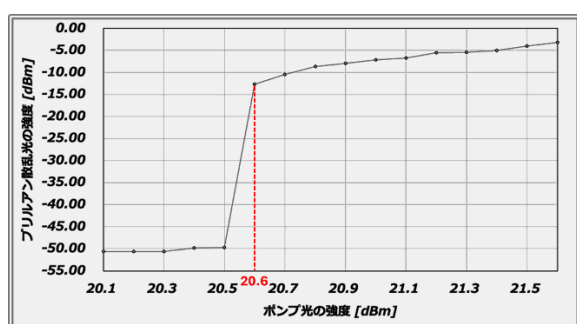


Fig.3 SBSの閾値特性

Fig. 4 にレーザー光源から出たモニター光とSBS光を光ヘテロダイン計測した結果を示す。約10.90 GHzでSBS光が観測された。また、計測時にSBSの周波数に揺らぎがあった。これは、PMF内でモードホップをするためだと考察する。

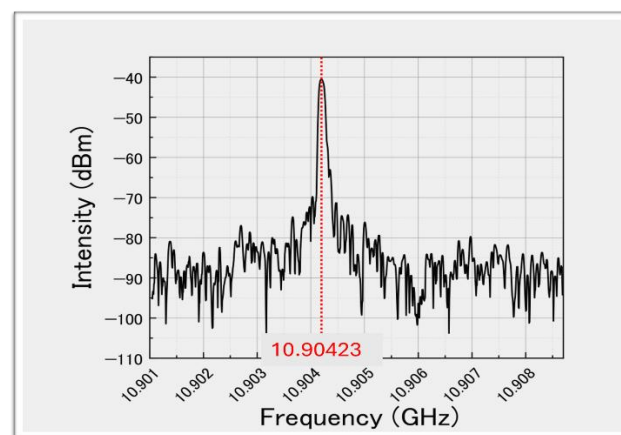


Fig.4 スペクトルアナライザーで観測したSBS

5) まとめ

本研究では、半導体レーザーを用いた誘導ブリルアン散乱光の性能評価を行い、その結果、SBSは約 10.90 GHzに観測された。今後は、PMFを温度変化などの外乱の影響を受けにくい環境下で動作させることでモードホップの発生を抑制し、外部共振型半導体レーザーの出力安定化を図るとともに、半導体レーザーの線幅のさらなる狭窄化を目指す。

参考文献

- 1) A. Debut et al.: Linewidth narrowing in Brillouin lasers: Theoretical analysis, Phys. Rev. A, vol. 62, pp. 023803 (2021)
- 2) T. Tetsumoto et al.: Optically referenced 300 GHz millimetre-wave oscillator, Nat. Photon., vol. 22, no. 15, pp. 516-522 (2021)
- 3) S. Huang et al.: Tens of hertz narrow-linewidth laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering, Opt. Lett., vol. 42, no. 24, pp. 5286-5289 (2017)
- 4) H. Ahmad et al.: Ultra-narrow linewidth single longitudinal mode Brillouin fiber ring laser using highly nonlinear fiber, Las. Phys. Lett vol. 10, no. 10, 105105(2013)