

半導体レーザーカオスと He-Ne レーザーの モード間光ビートを用いた THz 波源開発

山下 雄大*, 白尾 拓也*, 栗島 史欣*, 谷 正彦**, 栗原 一嘉***, 山本 晃司**,
荻行 正憲****, 長嶋 健****, 岩澤 宏*****

Development of THz wave source using optical beats between modes of semiconductor laser chaos and a He-Ne laser

Yuki Yamashita*, Takuya Shirao*, Fumiyoshi Kuwashima*,
Masahiko Tani**, Kazuyosi Kurihara***, Kouzi Yamamoto***,
Masanori Hangyo****, Takeshi Nagashima****, Hiroshi Iwasawa*****

A low cost and stable terahertz wave source using a laser chaos is developed. Optical spectra of the laser chaos are broad. In order to oscillate the laser chaos, an optical delayed feedback is introduced using an external mirror. Thus, the optical spectrum is spread about 70 times compared with that the C.W. steady semiconductor laser and the frequency interval between longitudinal modes is about 50 GHz. Optical beats occurs between semiconductor laser's longitudinal modes and these frequency intervals a 50 GHz. Therefore, the laser chaos is important to generate the stable and wide range terahertz wave. Mixing the He-Ne laser with the semiconductor laser chaos system, it's possible to generate THz waves up to 0.864 THz.

Keywords: Terahertz, Chaos, Laser, MLD-TDS

1 序論

テラヘルツ波は電波的な透過性を有する最短波長であり、簡単な分子の回転準位や有機物の振動準位に相当しているため危険物探知、麻薬探知、医療など様々な分野で活躍が期待されている¹⁻³⁾。20年ほど前まではテラヘルツは未開拓領域で、ボロメーターを用いた強度の観測のみは可能だった。しかし小型で簡便な発生装置がなく、時系列が取れない上に、ボロメーターは液体ヘリウムによる冷却が必須であるといった問題点があった。Auston が 1984 年に考案し 1990 年にはフェムト秒レーザーを利用したテラヘルツ時間領域分光法(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS) が発達し、テラヘルツ波の発生と時間波形の検出が可能になった⁴⁻⁶⁾。しかし実験に使用するレーザーがとても高価であり、尖頭値に数%程度の揺らぎを含むのでテラヘルツ波にも揺らぎを含んでしまうといった問題点があった。次に半導体レーザーを使った THz-TDS が提案され安価に THz-TDS システムを構築可能になったが半導体レーザー自体は安定しているが THz 波は不安定で帯域が 0.5 THz 以下に限られるといった問題点があった⁷⁾。本研究では半導体レーザー

* 福井工業大学, ** 福井大赤外センター, *** 福井大教育,

**** 阪大レーザーエネルギー学研究センター, ***** 福井大学名誉教授

に外部鏡を用いて光学的遅延帰還を加えることによってレーザーカオスを発生させる。これによりスペクトルが多モード化し高周波成分まで発生可能な安価な THz 波源開発をする。半導体レーザーカオスは半導体レーザーに外部鏡による光学的遅延帰還を加えることで発生するので安価なシステム構築が可能になる。さらに波面が平面波で、周波数安定性が高い He-Ne レーザーと光混合させることにより高周波のビートを発生させ、これまで以上に高周波を発生させることを目標にしている。

本研究の目的は「半導体レーザーカオスと He-Ne レーザーのモード間光ビートを用いた THz 波源開発」であると同時に「半導体レーザーカオスを用いた安価で安定なテラヘルツ波源の開発」である。

2 実験方法,実験系

・ 2.1 光スペクトルの測定方法

光スペクトル測定は図 1 に示すような光路でレーザーを光スペクトルアナライザに送りレーザーの光スペクトルを検出させる。ビームスプリッター1 で半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させる。さらにミラー2→ビームスプリッター2→ミラー5 といった順番で光を送っている。またミラー1 からビームスプリッター1 を経由して戻り光をいれ光学的遅延帰還を加えている。半導体レーザー単体の光スペクトルを測定するときは He-Ne レーザー光遮断して測定を行う。またレーザーの出力が高すぎるときは光スペクトルアナライザを破損させてしまうことがあるので光路中に ND フィルターを設置しパワーを調整する。

表 1,2 には実験に使用したレーザーの特性をそれぞれ記す。

表 1 半導体レーザー

型番	出力	波長	電流
HL6323MG	P=35mW	$\lambda = 639\text{nm}$	I=95mA

表 2 He-Ne レーザー

型番	出力	波長	縦モード間隔
62738-L	P=21mW	$\lambda = 632.8\text{nm}$	257MHz

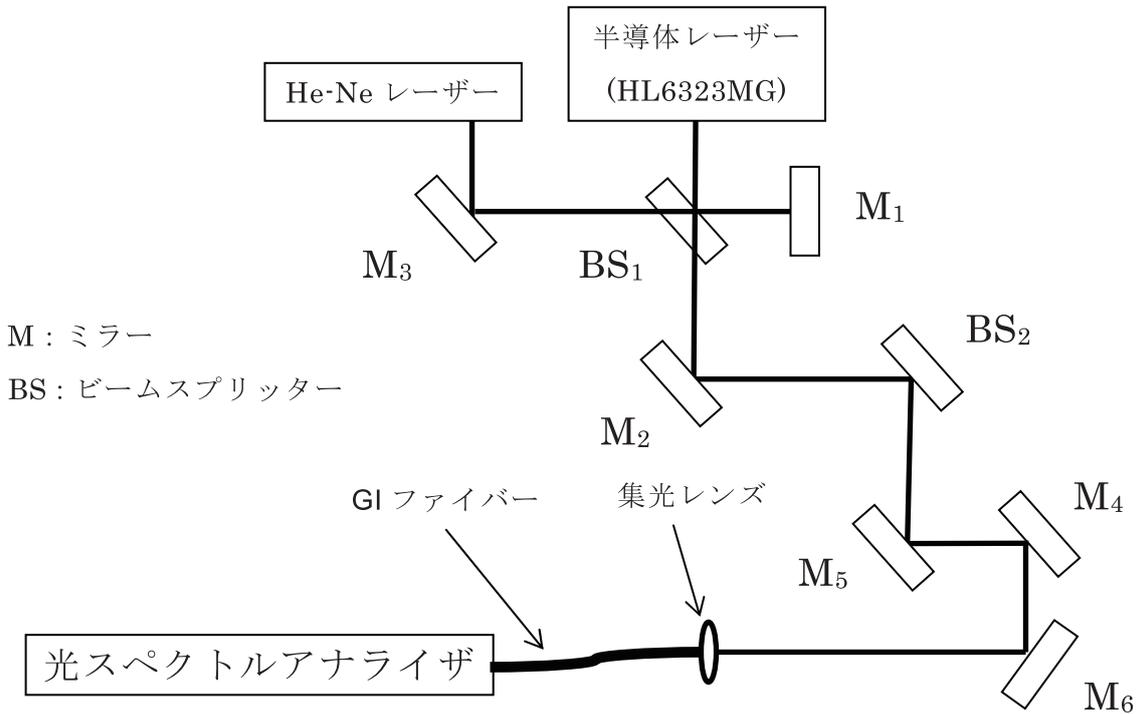


図 1 光スペクトルの測定の実験系

・ 2.2 光スペクトルの実験結果

半導体レーザー単体の時の戻り光量 0%の光スペクトルは図 2(a)に示す。波長 λ は 639.58[nm]で周波数 ν は 469.06 [THz]となった。さらに光スペクトルのピークから 20[dB]下がったところのスペクトル幅を見ると 639.56[nm]で周波数は 469.05[THz]と 639.59[nm]で周波数は 469.07[THz]なのでモードの差は 30.0 [pm]で周波数差は 20.0[GHz]だった。

半導体レーザー単体時に戻り光量 1.48%を加えた場合の光スペクトルは図 2(b)に示す。半導体レーザー単体で戻り光量を 1.48%加えて半導体レーザーのスペクトルを測定した場合は、モードが楕状に広がっていた。一番強度が高いところの隣にあるモードの差を調べてみたところ 639.62[nm](639.55[nm])なので縦モード間隔 70.0[pm](469.03[THz])と 4.690[THz]なので 851.35[GHz]だった。さらに強度が一番高かった時から 20[dB]下がったところのスペクトルの幅を見てみると、640.02[nm](4.7028[THz])と 637.92[nm](468.74[THz])なので全体のスペクトル幅 2.10[nm]と周波数差 1.543[THz]だった。

この結果から半導体レーザーに戻り光をいれ光学的遅延帰還を加えたものは戻り光を加えなかったものと比べ光スペクトルは 70 倍程度拡大していることがわかった。

He-Ne レーザー単体時の光スペクトルは図 2(c)に示す。He-Ne レーザーの波長は本来 632.8[nm]だが今回の結果では分光器の精度上 633.0[nm]と僅かではあるが少しずれていた。周波数成分は 473.94[THz]だった。

半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させ戻り光量 1.48%を加えた場合の光スペクトルは図 3(a)に示す。強度が一番高かった時から 20[dB]下がったところのスペクトルの幅を見てみると、637.18[nm](470.82[THz])と 635.99[nm](471.71[THz])なので全体のスペクトル幅は 1.190[nm]で周波数差は 0.881[THz]だった。この結果から半導体レーザーに戻り光をいれ光学的遅延帰還を加えたものは戻り光を加えなかったものと比べ光スペクトルは 2.9 程度拡大した。

半導体レーザーカオスと He-Ne レーザーを光混合させ戻り光量 0%の場合の光スペクトルは図 3(b)に示す。半導体レーザーと He-Ne レーザーとのモードの間隔が一番近い幅は 634.15[nm] (473.07[THz])と 632.99[nm](473.94[THz])なのでモードの差は 1.160[nm]で周波数差 0.867[THz]だった。

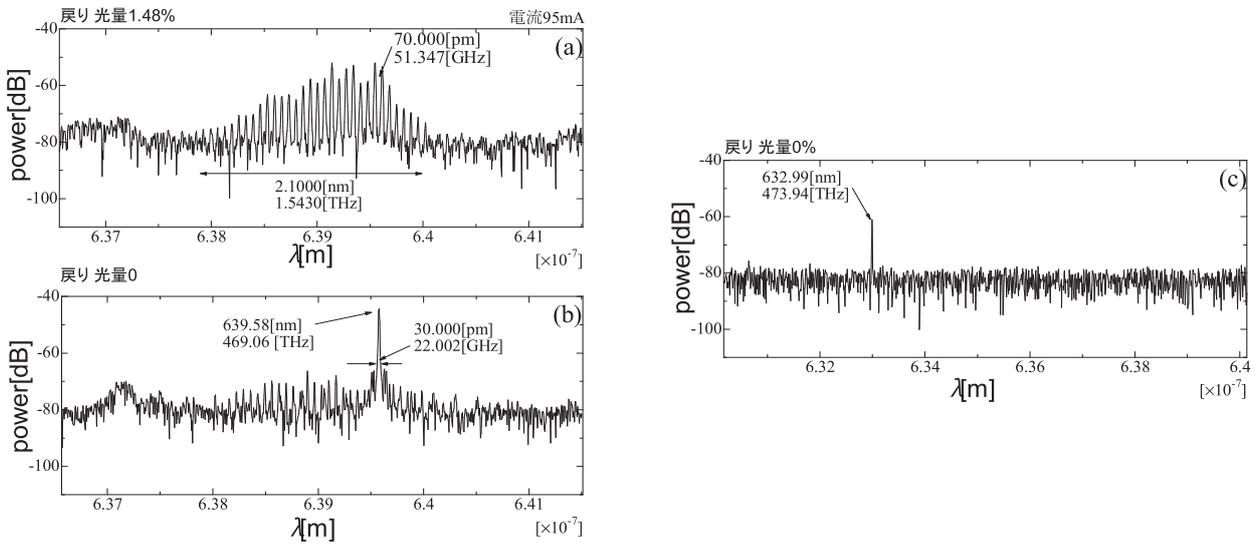


図 2 半導体レーザーと He-Ne レーザー単体時のレーザー光スペクトル

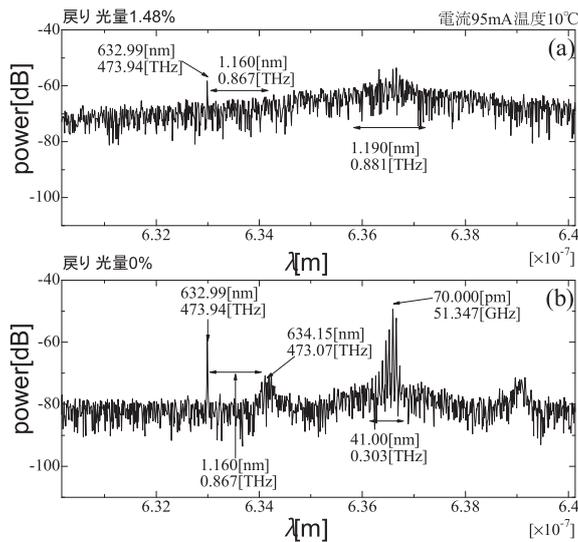


図 3 半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合のレーザー光スペクトル

・ 2.3 テラヘルツ波の測定方法

実験系は図 4 に示す。ビームスプリッター1で半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させる。ミラー2を経由させてビームスプリッター2で光を2つに分岐する。一方のレーザー光はミラー5の方から光伝導アンテナ（発生器）の方へ照射される。分岐した他方は、可動レールの上のリトロフレクタで反射しミラー4、ミラー6を経由し光電動アンテナ（検出器）に照射される。可動レールが移動し、時間遅延を変化している。さらに、エミッタ側で発生したテラヘルツ波をディテクタ側へ照射することで THz 波とレーザー光の相互相関をとりそれをロックインアンプで検出している。

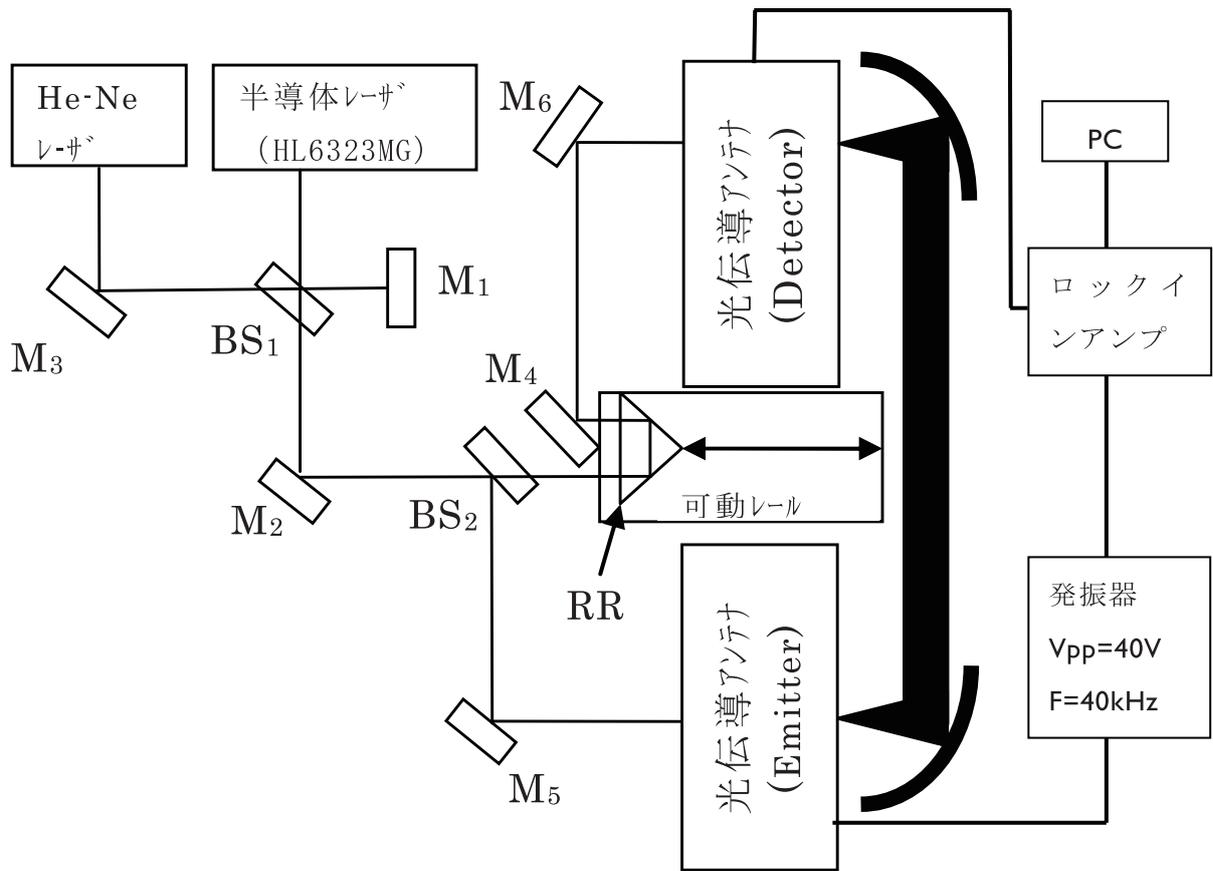


図 4 テラヘルツ波の測定の実験系

・ 2.4 実験結果

半導体レーザー単体時戻り光量 1.48%を入れたものと戻り光量 0%のときのテラヘルツ波の時系列は図 5(a),(b)にそれぞれ示す。図 5(c)にはエミッタ側の光入力を遮断しディテクタ側は光入射したテラヘルツ波の時系列を示す。左を実数部、右を虚数部とする。実数部を見ると戻り光量 1.48%加えたものは戻り光を入れなかったものと比べると強度が拡大した。虚数部はロックインがうまく取れているので虚数部の値は小さくなった。

半導体レーザー単体時戻り光量 1.48%を入れたものと戻り光量 0%のときのテラヘルツ波の時

系列のフーリエスペクトルは図 6(a),(b)に示す。図 6(c)にはエミッタ側の光入力を遮断しディテクタ側は光入射したテラヘルツ波の時系列のフーリエスペクトルを示す。戻り光を入れたものも入れなかったものも周波数成分が一番高いところで $0.38[\text{THz}]$ と両者ともに $0.5[\text{THz}]$ 以下になってしまっている。今回は戻り光量 1.48% と少ないのが原因だと考えている。

半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させたときのテラヘルツ波の時系列はそれぞれ図 7(a),(b)に示す。図 7(c)にはエミッタ側の光入力を遮断しディテクタ側は光入射したテラヘルツ波の時系列を示す。実数部を見ると戻り光量 1.48% 加えたものと戻り光量 0% の時系列にこれといった違いを観測することができなかった。 1.48% と戻り光量が少なく、He-Ne レーザーとの光混合によるビートの影響の方が大きいと考えられるが詳細は検討中である。虚数部はこちらもうまくロックインが取れているので値は小さくなっていた。

半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させたときのテラヘルツ波の時系列のフーリエスペクトルはそれぞれ図 8(a),(b)に示す。図 8(c)にはエミッタ側の光入力を遮断しディテクタ側は光入射したテラヘルツ波の時系列のフーリエスペクトルを示す。半導体レーザー単体の時は周波数成分が $0.5[\text{THz}]$ 以下になってしまっていたが、戻り光を入れ He-Ne レーザーと光混合させたものは $0.864[\text{THz}]$ まで出ている。さらに S/N 比は 107 倍になっていた。また $0.5[\text{THz}]$ を超えると半導体レーザーカオス単体での S/N 比は 1 となっているのでノイズになってしまっている。しかし He-Ne レーザーを光混合させた S/N 比は $0.5[\text{THz}]$ を超えていても 10 倍以上出ていることが分かる。戻り光を加えない場合でも $0.5[\text{THz}]$ 以上での S/N 比上昇を確認している。そのため He-Ne レーザーの影響が大きいと考えられる。さらに $0.864[\text{THz}]$ のときに S/N 比が急に上がっているがこのときに He-Ne レーザーの影響が最大出てきていると考えられる。また図 3(a)の光スペクトルを見ると半導体レーザーと He-Ne レーザーのモード間隔が $0.867[\text{THz}]$ の部分でビートが起きたと考えられる。

戻り光の影響を見てみるとまた半導体レーザー単体のときは表 3 を見てみると $0.73[\text{THz}]$ で 0.56 倍を除き 1.5 倍程度改善されている。周波数が一番高い $0.864[\text{THz}]$ では 2.71 倍だった。半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させたものは表 4 を見ると $50.6[\text{GHz}]$ で 0.78 倍を除き 2 倍程度改善されている。周波数が一番高い $0.864[\text{THz}]$ では 1.82 倍だった。

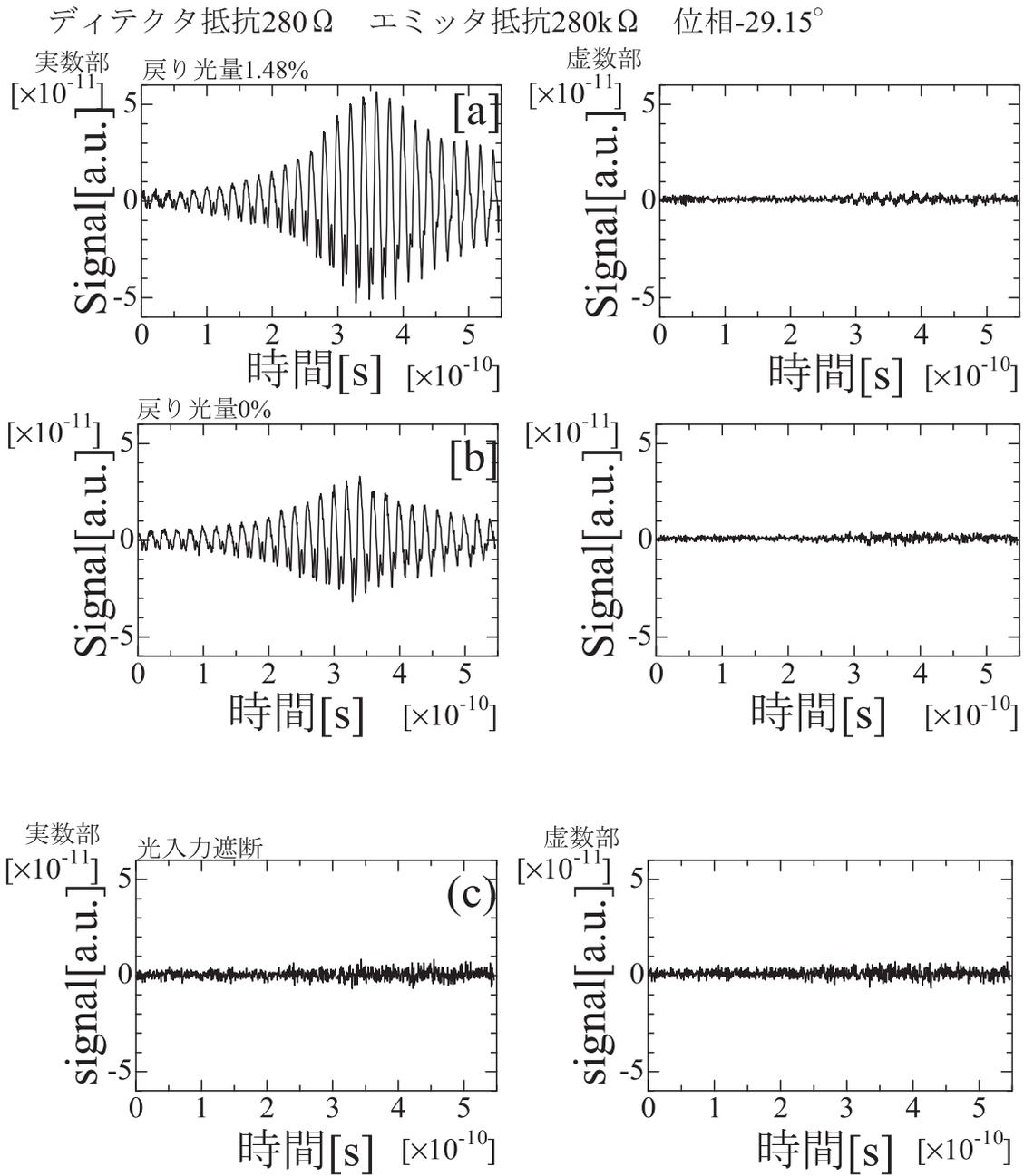


図 5 半導体レーザー単体時のテラヘルツ波の時系列

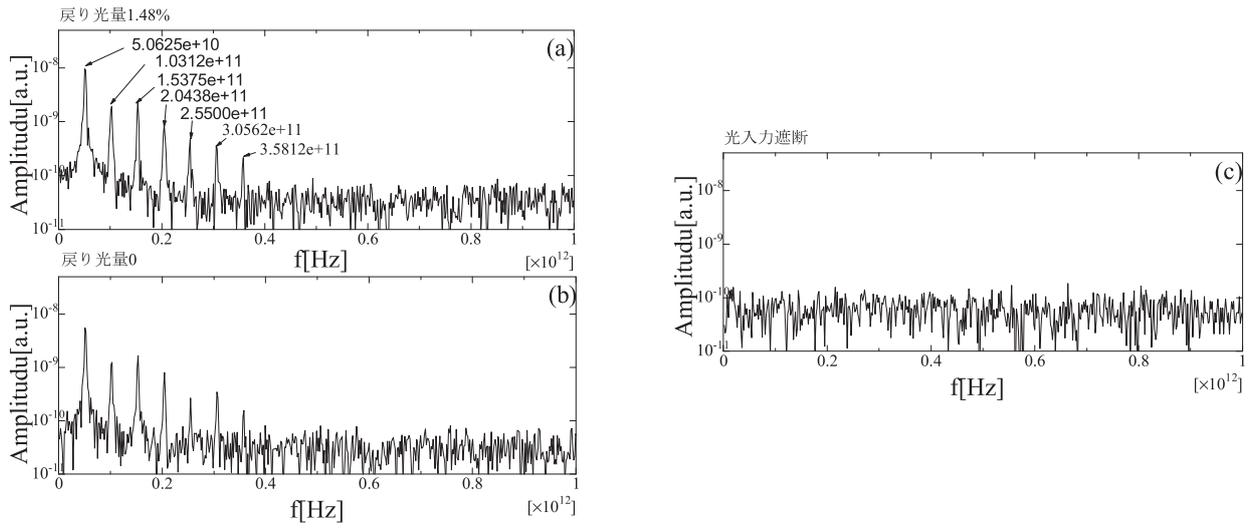


図 6 半導体レーザーのテラヘルツ波の時系列のスペクトル

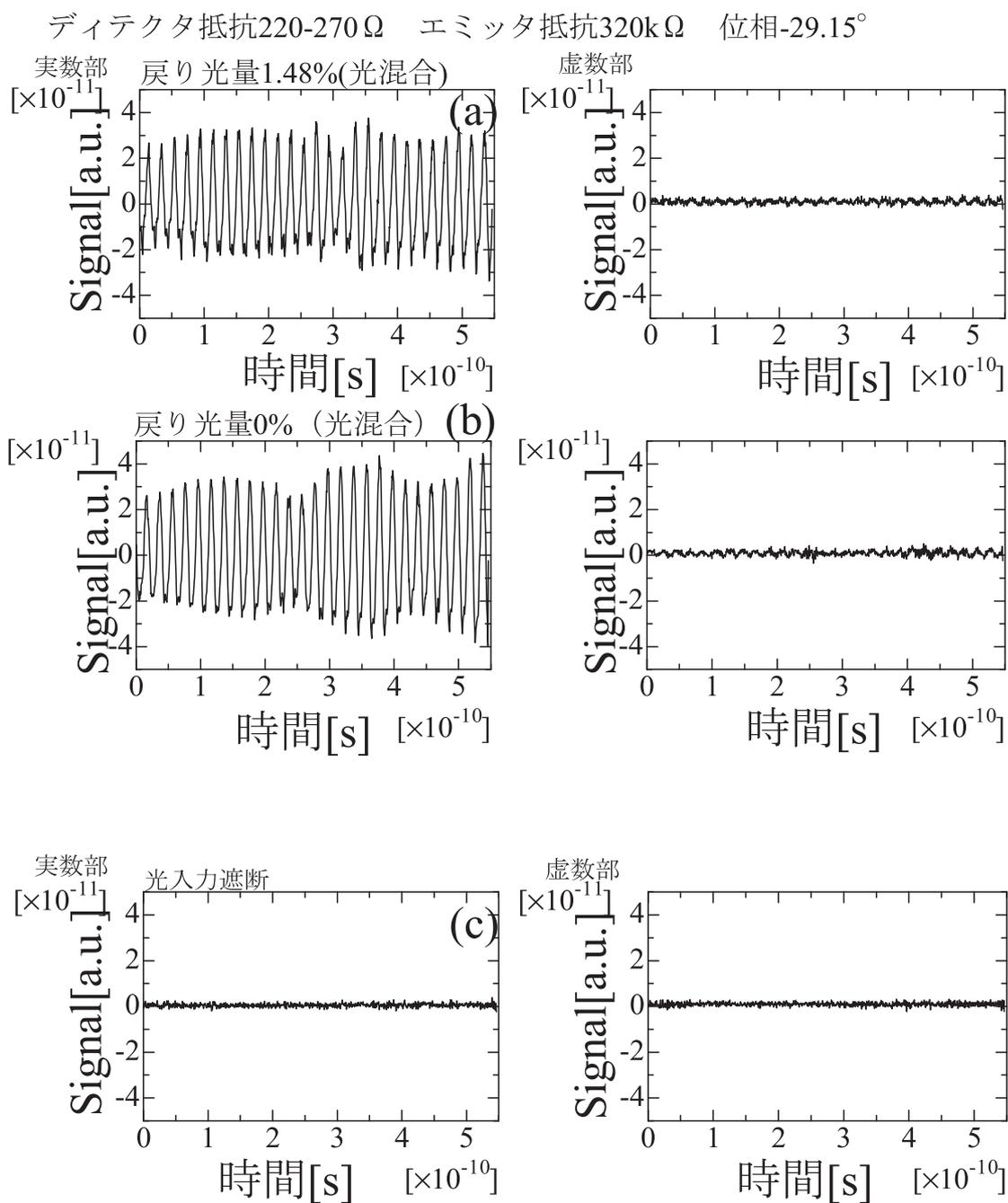


図 7 半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合のテラヘルツ波の時系列

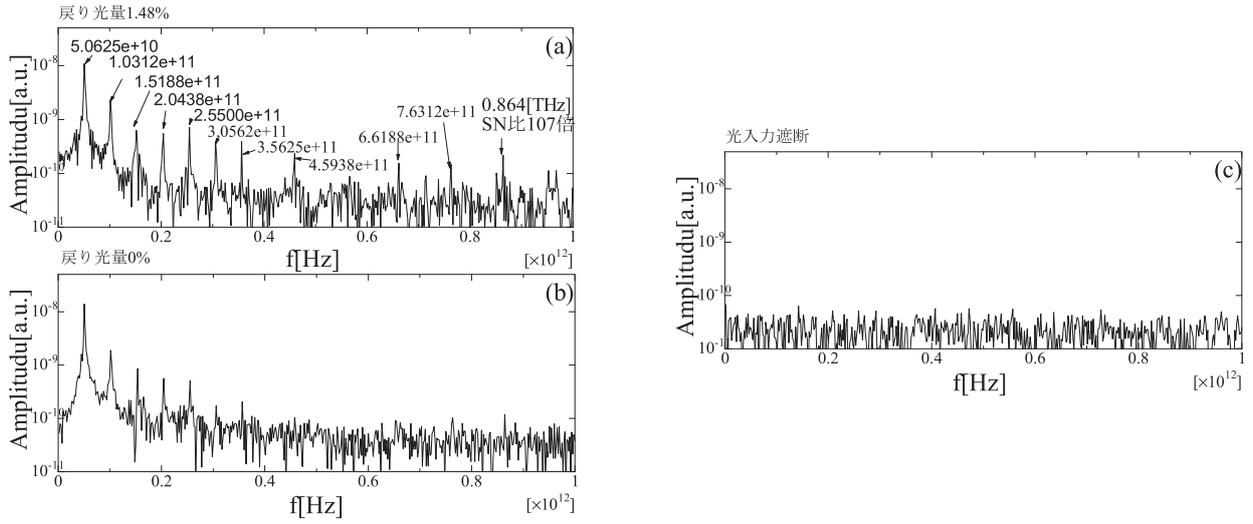


図 8 光混合時のテラヘルツ波の時系列のスペクトル

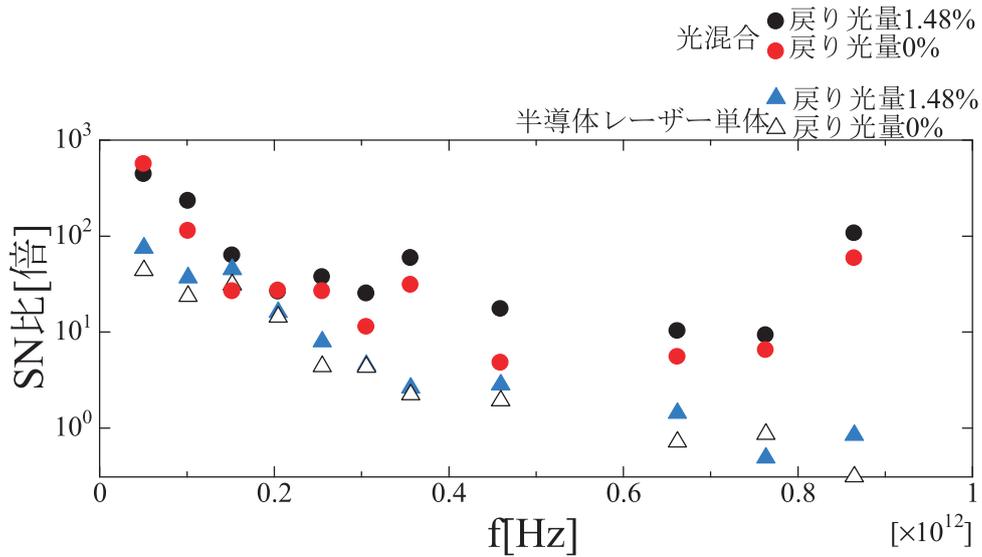


図 9 テラヘルツ波の S/N 比

表 3 半導体レーザー単体時の戻り光の影響

周波数[Hz]	戻り光量 1.48[%]	戻り光量 0[%]	増大率[倍]
5.06E+10	75.61	43.98	1.72
1.01E+11	37.03	23.69	1.56
1.52E+11	45.12	31.28	1.44
2.04E+11	16.12	14.43	1.12
2.55E+11	7.96	4.41	1.81
3.06E+11	4.50	4.33	1.04
3.56E+11	2.62	2.23	1.17
4.59E+11	2.83	1.93	1.47
6.62E+11	1.43	0.72	1.99
7.63E+11	0.49	0.87	0.56
8.64E+11	0.84	0.31	2.71

表 4 半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させたときの戻り光の影響

周波数[Hz]	戻り光量 1.48[%]	戻り光量 0[%]	増大率[倍]
5.06E+10	443.24	566.36	0.78
1.01E+11	233.10	113.62	2.05
1.52E+11	63.25	26.68	2.37
2.04E+11	26.46	27.14	0.97
2.55E+11	37.53	26.70	1.41
3.06E+11	25.27	11.35	2.23
3.56E+11	59.32	31.11	1.91
4.59E+11	17.46	4.80	3.63
6.62E+11	10.30	5.52	1.87
7.63E+11	9.29	6.49	1.43
8.64E+11	107.07	58.85	1.82

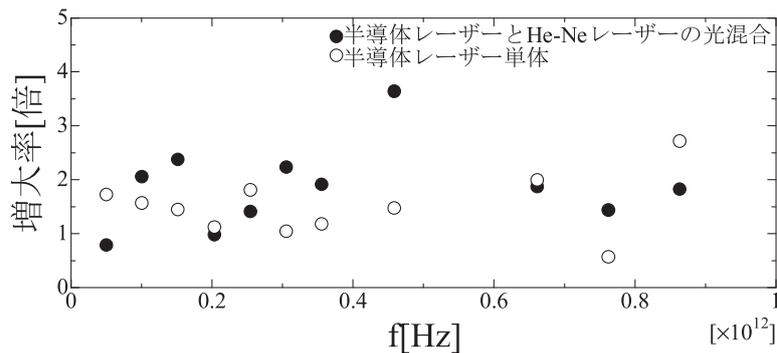


図 10 戻り光の影響

3 結論

図 3 の戻り光を入れなかったときのスペクトルが広がってしまっているのはオーストンスイッチから一部が戻ってしまってモードが拡大してしまったものだと思う。テラヘルツ波の時系列にあまり違いが出なかった理由は戻り光量 1.48% とかなり少ないのが原因だと考えられる。そのため半導体レーザー単体時のフーリエスペクトルにも強度に若干違いが見られるもののほぼ違いが出てこなかった。しかし半導体レーザーと He-Ne レーザーを光混合させ戻り光を入れたものは 0.864[THz] で S/N 比が 107 倍になっていた。図 8 のテラヘルツ波の S/N 比を見ると半導体レーザー単体のもの 0.5[THz] の部分ではほぼノイズになってしまっているが光混合させたものは 10 倍程度出ていることが見てわかる。さらに 0.864[THz] のときに S/N 比が改善されているのがわかる。これは He-Ne レーザーの影響だと考えられる。図 3 のレーザーのスペクトルを見ると 0.864[THz] に近いものがあるのでその間でビートが発生したものだと思われる。

参考文献

- [1] F. Kuwashima: "Generation of THz Wave by Using A Chaotic Oscillation in A Laser", *Journal of Laser Engineering*, Vol. 39, No. 7, pp. 502 (2011)
- [2] B. B. Hu and M. C. Nuss: "Imaging with terahertz waves" *Opt. Lett.* 20, 1716-1718(1995).
- [3] A. G. Markelz, A. Roitberg, and E. J. Heilweil: "Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz", *Chem. Phys. Lett.* 320, 42-48(2000).
- [4] Auston D H, Cheung K P and Smith P R, "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles", *Apply. Phys. Lett.* 45 (1984) 284-6
- [5] D. Molter, A. Wagner, S. Weber, J. Jonuscheit, and R. Beigang: "Comblless broadband terahertz generation with conventional laser diodes", *OPTICS EXPRESS* 5290, Vol. 19, No.6(2011).
- [6] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. v. Exter, and C. Fattinger: "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors", *J. Opt. Soc. Am. B* 7, 2006–2015(1990).
- [7] O. Morikawa, M. Fujita, K. Takano, and M. Hanyo: "Sub-terahertz spectroscopic system using a continuous-wave broad-area laser diode and a spatial filter", *J. Appl. Phys.* 110, 063107(2011).

(平成 25 年 3 月 31 日受理)