

# 光ビート法による高周波の発生

松山 英治

筑波大学数理物質科学等支援室 (物性・分子工学専攻)

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

## 概要

マイクロ波からテラヘルツにいたる電磁波は、高周波トンネル顕微鏡 (RF-STM) や近接場顕微鏡など、走査プローブ顕微鏡 (SPM) の新しい光源として有望視されている。テラヘルツ電磁波の発生に向けての第一歩として、波長が近赤外領域 1.0~2.0  $\mu\text{m}$  にある 2 本のレーザービームを混合し、単一モード光ファイバを用いて非線形受光素子に導き、各々の光の周波数の差周波数をもつマイクロ波領域の電磁波を発生させた。発生した信号のスペクトル純度の計測結果から電磁波のコヒーレンスは極めて高いことが確認できた。このことから、本光ビート方法を拡張することにより、テラヘルツ電磁波の発生が可能であると期待できる。

**キーワード：**走査プローブ顕微鏡、テラヘルツ、光ビート、コヒーレンス

## 1. はじめに

従来の光にない性質、例えば、紙、プラスチックなど非金属を透過し、分子振動に対応する振動数を持ち、生体を含め材料分析上重要な領域の波長を持つ、テラヘルツ (THz) 電磁波 (電波、光) を使用した新しい分光技術が注目されている。特に微小な領域を観察する顕微分光、走査プローブ顕微鏡、近接場顕微鏡、などの最新の技術は電波・光境界領域にある光の利用が期待されている。従来からテラヘルツ電磁波の発生には多くの技術的に困難な点があり、この分光領域の光源として取扱いが簡単で高性能な (光の線幅が狭い、振動数が安定、ノイズとの振幅比が良い、振動数を広い範囲で精密に可変できる) <sup>[1,2]</sup> 光源はなかった。分光に使用される光には高いコヒーレンスと良好な C/N (信号光強度とバックグラウンドノイズ光強度との比) が求められる。筆者は分光の要素技術の開発と分光解析の結果に影響を及ぼす要因の研究を行っている。そこで、これらの条件を充たす電波・光境界領域の電磁波を発生させるため光ビートを用いて高周波 (RF) を発生する基礎的な実験を行った。今回は発生した信号のスペクトル純度の計測結果について報告する。

## 2. 装置と測定法

### 2.1 装置

今回使用した装置は、近赤外波長可変レーザー 2 台、光ファイバ導波路、光波長計、光受信機、スペクトルアナライザー、低雑音前置増幅器、から構成されている。近赤外波長可変レーザーは、1.0~2.0  $\mu\text{m}$  の光通信波長帯域内でレーザー発振波長を精密に可変できる光発振器である。光ファイバ導波路は、光通信波長帯域内でレーザーの光を単一モードで低損失に伝送でき、各々のレーザー発振器からの 2 本の光を 1 本に混合できる機能を持つものである。光波長計は、近赤外光通信波長帯域内でレーザー発振波長を精密に計測できる測定器である。光受信機は、1.0~2.0  $\mu\text{m}$  の光通信波長帯域内で 2 光波混合 (2 周波混合法) された光を受け、差周波数を出力できる非線形特性光受光素子と増幅機能を備えた光通信用の受信機である。スペクトルアナライザーは、RF 信号を周波数領域で検出して表示する測定器である。低雑音前置増幅器は、RF 信号を増幅する装置である。測定器の仕様を 2.1.1~2.1.6 に示す。

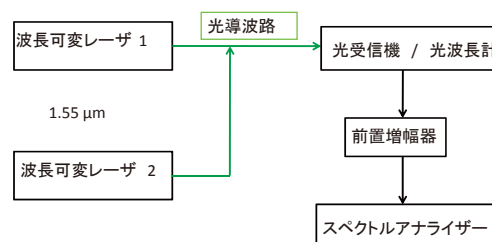


図 1. 測定装置の構成

2 周波混合法：周波数が異なる 2 つの電磁波 (光) を非線形な特性を持つ受光素子に入射させ、各々の周波数の和と差の成分を出力に生じさせる、光混合法。光、電波の表示単位：光 (nm), 電波 Hz、光、電波境界領域の共通単位に明確な定めはない。

### 2.1.1 近赤外波長可変レーザ

外部光共振器型精密波長可変型

サンテック：RSL-210、安定度：(+, -) 0.005 nm/30 min、線幅：< 500 kHz

Hewlett-Packard：:8168 F、安定度：0.001 nm、線幅：100 kHz

### 2.1.2 光ファイバ導波路

2 入力 1 出力光ファイバカップラ、

日本航空電子工業：DS-15-50XK-380

分岐比：45~55 % (1547, 1553 nm)

過剰損失：0.25 (dB) 以下 (1.547, 1553 nm)

### 2.1.3 光波長計

Hewlett-Packard：8120 C：1270~1650 nm、

表示解像度：0.001 nm、精度：(+, -) 2 ppm (+, -) 0.003 nm at 1550 nm and 1310 nm

### 2.1.4 光受信機

Hewlett-Packard：11982A: Light wave converter  
1200~1600 nm、変換帯域幅：15 GHz、  
等価ノイズ：30 Pw √Hz

### 2.1.5 スペクトラムアナライザ

Anritsu：MS62B3 ~23 GHz、RBW: 1 kHz

### 2.1.6 低雑音前置増幅器

Anritsu：MN-2602A、

増幅帯域幅：2~8 GHz、Gain: 30 dB

## 2.2 測定方法

実験は、マイクロ波・ミリ波領域における、電波工学上の周波数変換技術（光ビートを用い、ヘテロダインミキシングを行い光の差周波数の振動を発生する）を 1.0~2.0 μm 領域の近赤外レーザ光に適用して実施した。具体的には、2 本のレーザ光を混合して、光通信用ファイバを用いた導波路をへて（2 光波混合法）非線形特性を持つ光受光素子に光を導き、光ビートの非線形効果ミキシングを行った<sup>[1,2]</sup>。2 つの光の差周波数の振動数を持つ電磁波発生の手順は以下のとおりである。波長可変レーザ 1 を 1.55 μm の波長に固定し発振させた。波長可変レーザ 2 をレーザ 1 の発振波長に合わせるように発振させた。光波長計により発振線の接近を確認した。レーザ (1, 2) の発振波長の差がマイクロ波領域で観測される信号の周波数になる。レーザ 2 の発振波長を精密に可変する（差周波数を 10 GHz 付近まで接近）。この光を単一モード光ファイバ、（3 dB 分岐、混合機能を持つ）3 dB カップラに入射し、レーザ (1, 2) の 2 本の光出力を一本の光ファイバで混合させ 2 光波を伝送し、非線形効果受光素子を持つ光受信機に導い

た。このときファイバ内の光の電界分布はレーザ (1, 2) とともに同一方向に設定されている。光受信機内で発生しているマイクロ波の出力信号を取出し RF 前置増幅器へ入力し、スペクトラムアナライザによる観測が容易な信号強度に RF 信号を増幅した。交流 (AC) 結合された、RF スペクトラムアナライザにより発生したスペクトルの純度を調べた。

## 3 結果

### 3.1 光波長計による計測

1270~1650 nm の計測範囲で、波長可変レーザ (1, 2) の発振線として 1550 nm 付近に 2 本観測された。図 2 はレーザ 2 の発振波長をレーザ 1 の発振波長に接近させているときの観測結果である。なお、上記の計測範囲で、レーザ (1, 2) の発振線以外の光は観測されなかった。

### 3.2 スペクトラムアナライザによる計測

スペクトラムアナライザで観測した図 3 の信号は、光ビートがマイクロ波領域の電磁波に変換され光受信機から出力された信号で、センター周波数 7.07 GHz、信号強度・ノイズ比：C/N 53 dBm、線幅 W：5 MHz、であった。位相ノイズは、観測した信号の中心周波数から (+, -) 100 MHz の範囲で急激に減衰していた。線幅 5 MHz のスペクトル線 1 本が常に観測された。時々 2 本 15 MHz の間隔内にホッピング（10 MHz の範囲に変動して希に現れる）を伴い観測された。

観測条件は、観測温度 300 K

スペクトルアナライザ設定：RBW 1 MHz

(RBW：分解能帯域幅、0 dBm = 1 mW)であった。

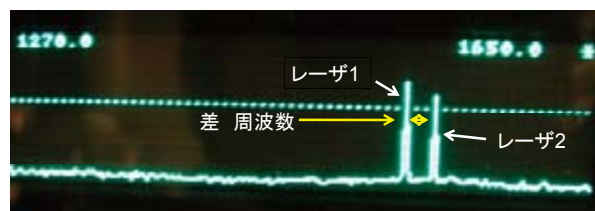


図 2. 近赤外領域レーザ (1, 2) の発振線と差周波数

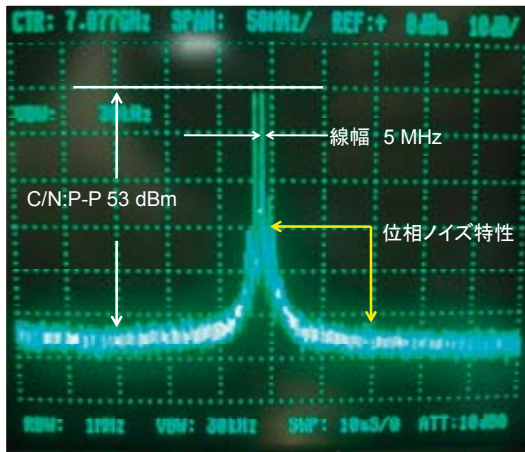


図 3. 観測されたマイクロ波領域にある RF 信号

#### 4 考察

筆者は業務の一つとして、電子スピンの情報を得るための走査トンネル顕微鏡 (ESR-STM) を用いて、STM による分光と ESR 検出感度の向上開発に取り組んでいる。ESR における最近の技術は 100 GHz 程度の RF 信号が取り扱われ解像度の向上がはかられている。また顕微分光における、RF 技術の導入は盛んであり、テラヘルツ (THz) 分光への期待が高まっている。分光に適した極めて高い振動数の RF 電磁波が簡単に発生できれば新しい分光領域の構築が見込まれ、励起線、参照信号としてのテラヘルツ電磁波の需要は多い。2 台の波長可変レーザーが発生する光レベルの差周波数は、メガヘルツ (MHz) ~ テラヘルツ (THz) と極めて広い差周波数を連続的に発生することができる。波長可変レーザー光の発振波長を精密に可変させることで、より周波数精度の高い光ビートが作られる<sup>[2]</sup>。この光ビートを各種の非線形効果特性を持つデバイスに照射すれば、マイクロ波からサブミリ波の電磁波を発生できる<sup>[1,2]</sup>。実験条件の一つとして ESR-STM、の ESR 共鳴要素をもつ参照信号としてマイクロ波領域であるギガヘルツ (GHz) 帯域に光ビート周波数の設定を行ない、発生した電磁波のスペクトル純度を調べている。図 2 よりレーザー (1, 2) の発振線は良好であり、ノイズ源になりうる光は存在していない、このことは、良好な光ビートを広範囲な波長に設定できることを示している。図 3 より、観測されたマイクロ波の信号は信号強度・ノイズ比: C/N 53 dBm と 5 桁をこえる範囲にあり、線幅は W: 5 MHz、と大変良好であった。分光に使用できる電磁波の性質を備えている。まれに観測中のスペクトルにホッピングが観測されたが、これは波長可変レーザーの発振波長と線幅を高

安定化するレーザーの制御機能から生じる。ホッピングは、本実験がレーザー (1, 2) の光をヘテロダイナミクスミキシングすることによって、高精度な測定を行っているため、観測されたものと推察している。

#### 5. まとめ

近赤外領域の波長が 1.55  $\mu\text{m}$  の光は約 190 THz 付近の周波数を持つ電磁波である。2 台の近赤外波長可変レーザーにより作られた光ビートをマイクロ波の電磁波にダウンコンバージョンする (目標とする周波数まで下げる) ことが可能であり、観測された電磁波のスペクトル純度は 2 台のレーザー其々の発振線が持つコヒーレンスを含めて表されている<sup>[2]</sup>。スペクトル純度は、5 MHz 以下の線幅を計測でき、位相ノイズに係る計測結果は 100 MHz の範囲で急峻にノイズレベルに減衰した。スペクトルの C/N 比は 53 dBm の値を計測でき、5 桁をこえる良い結果を得ることができた。スペクトルアナライザーが観測した 500 MHz のスキャン範囲にはサブスペクトルのない、純粋なビート信号 1 本のみ観測されている。これらのことから、発生した電磁波のコヒーレンスは極めて良好であり、高周波走査プローブ顕微鏡 RF-STM を始め近接場顕微鏡など SPM による新しい顕微分光に使用できるスペクトル純度を十分に備えていることが確認された。また、本光ビート法を拡張すれば、テラヘルツ電磁波の発生が可能であることが示唆された。

#### 6. 謝辞

光ビートによる高周波の発生の実施に際し、根本承次郎 筑波大学名誉教授、筑波大学数理物質科学研究科 中村潤児 教授、重川秀実 教授、大井川治宏 講師、武内 修 講師、の多大なご指導とご鞭撻に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] H. Ito, T. Furuta, Y. Hirota, T. Ishibashi, A. Hirata, T. Nagatsuma, H. Matsuo, T. Noguchi and M. Ishiguro Photonic millimetre-wave emission at 300 GHz using an antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiode Electronics Letters 38 (2002) 989-990.
- [2] M. Musha, A. Ueda, M. Horikoshi, K. Nakagawa, M. Ishiguro, K. Ueda, and H. Ito, "A highly stable mm-wave synthesizer realized by mixing two lasers locked to an optical frequency comb generator", Optics Communications 240 (2004) 201-208.

# Generation of the radio frequency signal by an optical beat method

Eiji Matsuyama

Institute of Materials Science, Academic Service Office for Pure and Applied Sciences,  
University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

Microwave to terahertz electromagnetic waves are considered as promising new light sources for the scanning probe microscope [SPM] such as the high frequency tunnelling microscope [RF-STM] and the near field microscope. As the first step to the generation of terahertz electromagnetic waves, two laser beams were mixed and guided through a single-mode fiber to a nonlinear detector. The wavelengths of two beams are  $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$  of near infrared region. The frequency of the output signal from the detector is the difference between those of two beams and is in the microwave region. It was confirmed, from the spectral purity measurement, that the coherence of the generated signal is quite high, suggesting the possibility of generating terahertz electromagnetic waves by extending this optical beat method.

**Keywords:** scanning probe microscopy; terahertz; optical beat; coherence