

# 光ビート法により発生した高周波信号の参照信号強度依存性

松山 英治

筑波大学数理物質科学等技術室 (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 (THz) の電磁波は、スピンや量子振動を観測する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。光ビート法によりマイクロ波を発生させるため、波長が近赤外領域 (1.0 から 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いた (光ヘテロダインミキシング)。発生させた電磁波の中心周波数は 569.1 MHz である。この出力信号のスペクトルを観測することにより、出力信号の参照信号強度依存性を詳しく調べた。参照信号強度を  $-5$  dBm から  $-50$  dBm へと減少させても、スペクトル純度は 5 MHz 幅に維持された。また、出力信号強度は参照信号強度の減少 ( $-5$  dBm から  $-50$  dBm) とともに直線的に減少した。よって、本報告で述べた光ビート法を拡張することにより、波長と強度を精密に制御できる、マイクロ波および THz 電磁波を発生させることが可能であると示唆された。

キーワード・走査プローブ顕微鏡、THz、  
光ビート、ESR - STM

## 1. はじめに

従来の光にない性質、生体試料などの指紋領域にある波長を持ち、量子エネルギー ( $h\nu$ ) が触媒化学反応過程に関わる領域にある、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、SPM、走査近接場光顕微鏡 (NSOM) など最新の技術は電波・光境界領域にある電磁波の利用が期待されている。従来から THz 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、振動数と強度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。

分光に用いられる光は高いスペクトル純度と良好な 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。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ている<sup>[1],[3],[5]</sup>。今回は光ビートによる光ヘテロダインミキシング参照光強度と計測した、RF スペクトル純度について報告する。

## 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、光減衰器 (ATT) 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  $\mu\text{m}$  の光通信波長領域でレーザー発振波長を精密に可変できる光発振機である。光ファイバ導波路は、光通信波長領域でレーザー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機からの 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、近赤外光通信波長領域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  $\mu\text{m}$  の光通信波長領域で 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受信機である。スペクトルアナライザは、RF 信号を周波数領域で検出して表示する測定器である。光 ATT は光ファイバ導波路内に挿入し精密に通過光を減衰させ光量を調整するものである。測定器の仕様を 2.1.1 ~ 2.1.6 に示す。

---

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。

## 2.2 測定方法

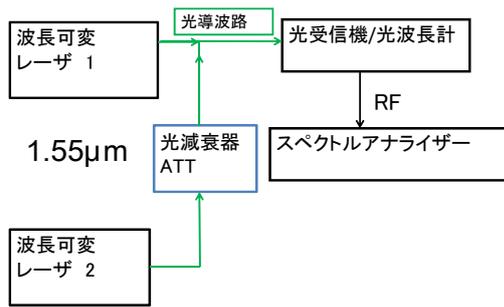


Fig 1. Composition of measuring Equipment

### 2.1.1 近赤外波長可変レーザー

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 - 5 0 XK - 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：11982 A：Light wave converter  
1200 ~ 1600 nm、変換帯域幅：15 GHz、  
等価ノイズ：30 Pw  $\sqrt{\text{Hz}}$

### 2.1.5 スペクトルアナライザー

Anritsu：MS2687 B ~ 30 GHz

### 2.1.6 光減衰器

ANDO：AQ - 3505 A  
減衰量：1.55  $\mu\text{m}$ , 0 ~ 65 dB

光の振動数の表記は波長を用いた。( nm )  
マイクロ波の振動数の表記は周波数を用いた。( Hz )  
光、マイクロ波強度の表記は dBm を用いた。  
0 dBm = 1 mW である。

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  $\mu\text{m}$  領域の近赤外レーザー光に適用して実施した。具体的には、2本の連続発振 ( cw ) レーザ光を混合して、単一モード光通信ファイバ導波路をへて ( 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。波長可変レーザー1を1.55  $\mu\text{m}$ の波長に固定し発振させた。波長可変レーザー2をレーザー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さらに接近させスペクトルの重なりを確認した Fig 2, a, b。レーザー ( 1, 2 ) の発振波長の差がマイクロ波領域で観測される周波数になる。レーザー2の発振波長を精密に可変させた ( 差周波数 2 GHz 付近まで接近 )。レーザー1の発信波長と光出力の設定は 1.549978  $\mu\text{m}$ , -3.90 dBm とした。レーザー2の発信波長と光出力の設定は 1.549999  $\mu\text{m}$ , -3.90 dBm とした。レーザー2の出力ライン光導波路の中に光ATTを挿入し通過光量を指数オーダーでステップ状に減衰させ光ヘテロダインミキシングの参照光強度設定を行った。この光を単一モード光ファイバ、( 3 dB 分枝、混合機能を持つ ) 3 dB カップラへ入射し、レーザー ( 1, 2 ) 2本の光出力を一本の光ファイバにより混合させ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電界分布はレーザー ( 1, 2 ) とともに同一方向に設定した。光受信機内で発生するマイクロ波の出力信号を取り出し交流 ( AC ) 結合された、RF スペクトラムアナライザー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、波長可変レーザー ( 1, 2 ) の発振線として 1.55  $\mu\text{m}$  付近に 2 本観測された Fig 2. a。

スペクトルのさらなる接近に伴い 2 台のレーザーの発振線スペクトルは重なって観測された。Fig 2. b。

上記の計測範囲で、レーザー ( 1, 2 ) の発振線以外の光は観測されなかった。

レーザー1の発振波長と光強度は 1.549978  $\mu\text{m}$ , -3.90 dBm であった。

レーザー2の発振波長と光強度は 1.549999  $\mu\text{m}$ , -3.90 dBm であった。

光強度の指数的減衰（レーザー, 2）に発生した電磁波の強度は指数的に減衰した Fig 3. a, b, c, d, e, f, g、Fig 4。計測した強度範囲においてマイクロ波スペクトルの線幅は5 MHz 以下であった。C/N : |15~75| dB を計測した Fig 4。

### 3.2 スペクトラムアナライザーによる計測

スペクトラムアナライザーで計測された信号は、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電磁波である。

センター周波数 569.1 MHz、信号強度・ノイズ比 : C/N 75 dBm、線幅 W : 5 MHz 以下であった Fig 3. a。

位相ノイズは、観測された信号の中心周波数から（+,-）60 MHz の範囲で急激に減衰した Fig 3. a。

線幅が5 MHz 以下のスペクトル線1本が常に観測された。

時々2本15MHz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 Fig 3. a, c, d, e。

参照光レーザー（2）光強度の指数的減衰に応答した、RF スペクトルプロファイル Fig 3. a, b, c, d, e, f, g、Fig 4。

観測条件、観測温度： 300 K

スペクトラムアナライザー設定：RBW 300 kHz, VBW 30kHz (RBW：分解能帯域幅), ATT 10 dB である。

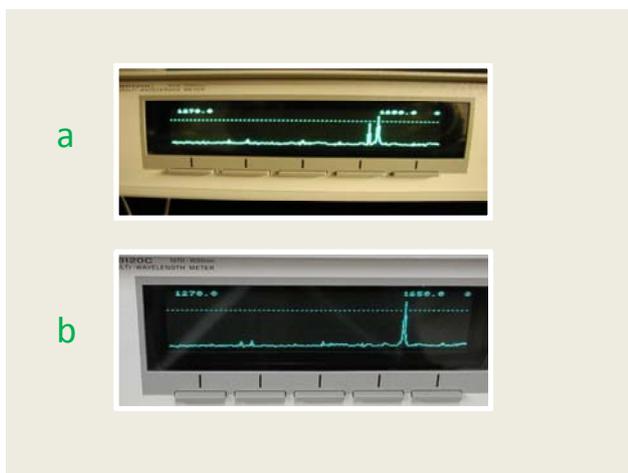


Fig 2. a and b  
Near infrared region laser (1, 2) Oscillation line.

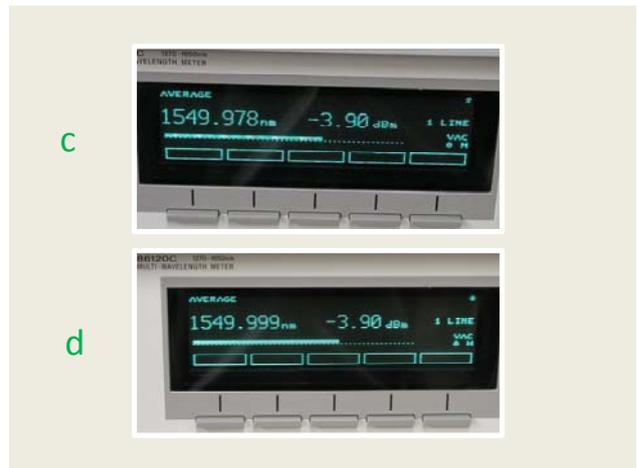


Fig 2. c and d  
Near infrared region laser (1, 2) Wavelength and Power.

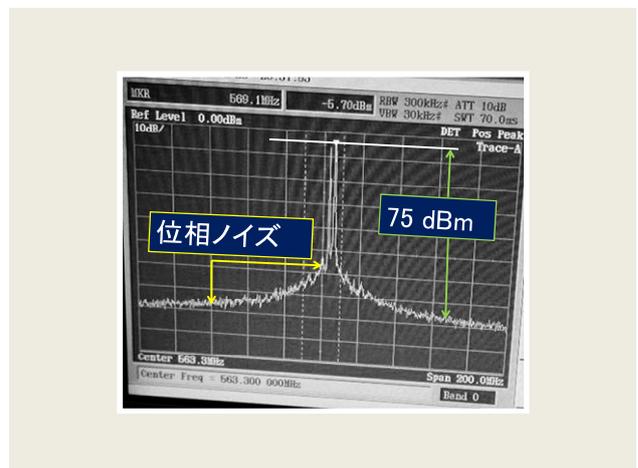


Fig 3. a Measured microwave spectrum.

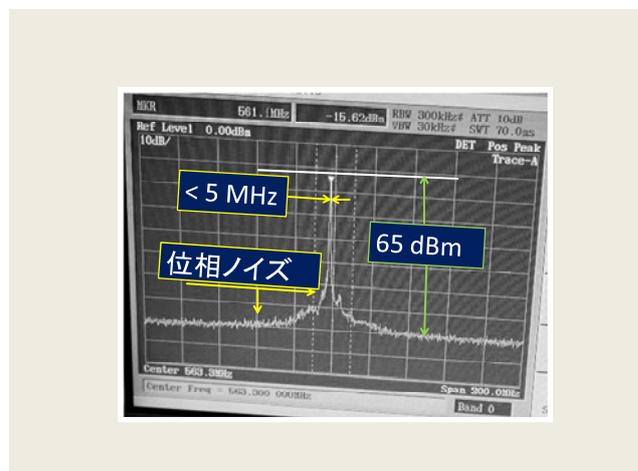


Fig 3. b Measured microwave spectrum.

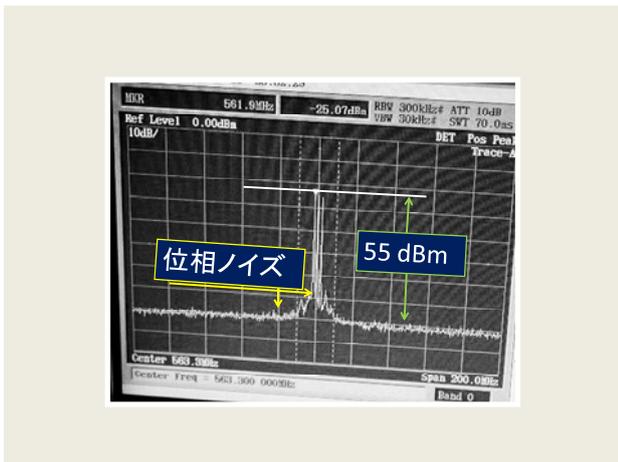


Fig 3 . c Measured microwave spectrum.

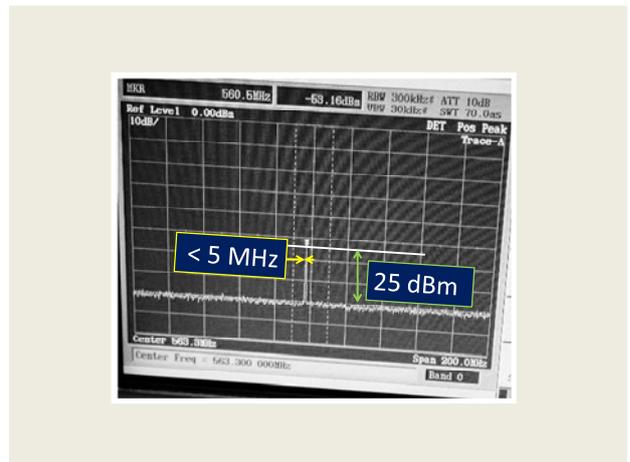


Fig 3 . f Measured microwave spectrum.

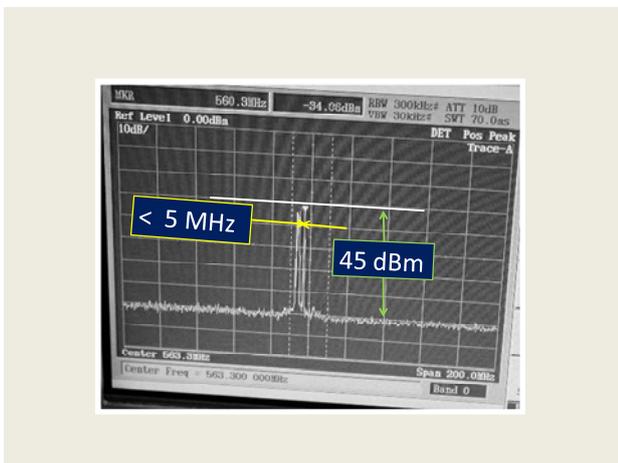


Fig 3 . d Measured microwave spectrum.

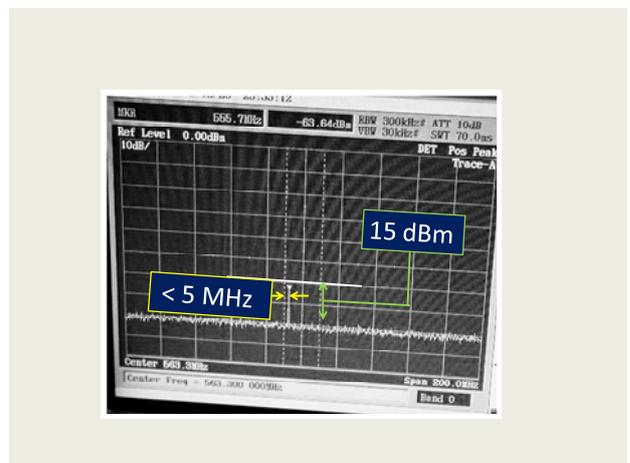


Fig 3 . g Measured microwave spectrum.

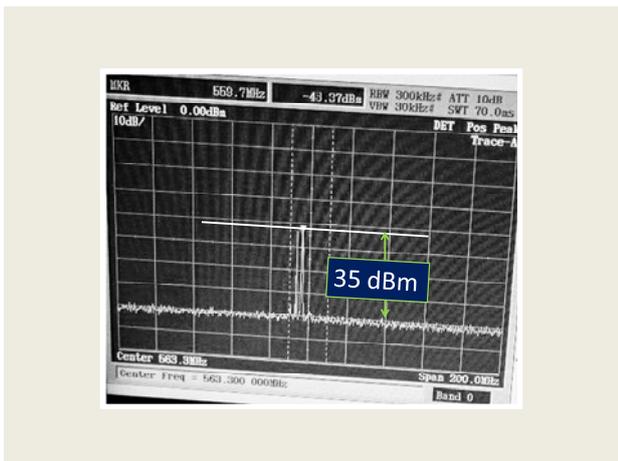


Fig 3 . e Measured microwave spectrum.

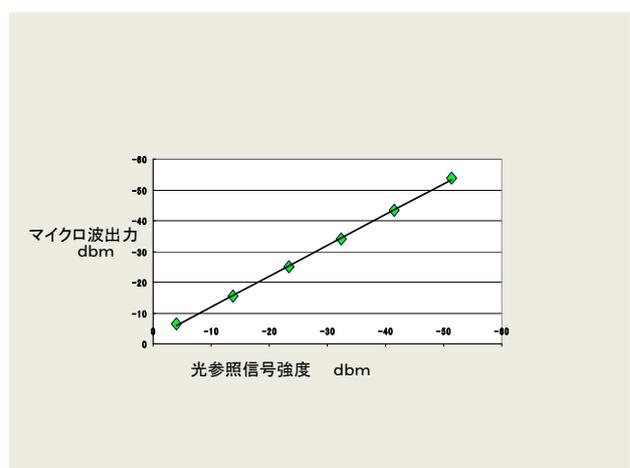


Fig 4 .  
Reference light Power and generated microwave Power.

## 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走査トンネル顕微鏡 ( ESR - STM ) を用いて、トンネル分光と ESR 検出感度の向上開発に取り組んでいる<sup>[5]</sup>。ESR - STM の観測対象はナノサイズ領域の分析であり、計測される不対電子のスピンの数は極少数となる。STM による単一スピンの検出が期待されている<sup>[4][5]</sup>。ESR - STM が観測する信号は微弱で熱限界付近になり極めて高い検出感度と STM のトンネルコンデションに高い安定性が求められている<sup>[4][5]</sup>。近年 ESR が計測する周波数は超小型超電導マグネットの普及によって、サブミリ波 ~ TH 領域へ広がっており SPM による新たな分光技術の構築が期待されている。2 台の波長可変レーザーが発生する差周波数は、MHz ~ THz と極めて広くかつ緻密である。波長可変レーザーの発振波長を精密に制御することでコヒーレンスの高い光ビートを作成できる<sup>[2]</sup>。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>。今回の実験条件は L バンド ESR - STM の ESR 共鳴要素をもつ参照信号光として、数百 MHz に光ビートの設定を行った<sup>[5]</sup>。レーザー ( 1, 2 ) の発振線は良好であった Fig 2. a, b 。発振波長の接近によって光スペクトルは重なって観測された Fig 2. b 。観測した波長領域にノイズ源となる光は測定されなかった ( 1200 nm ~ 1600 nm ) 。このことは、光ビートを広い波長領域の任意な波長に設定可能であることを示している Fig 2. a, b 。観測されたマイクロ波のスペクトル純度は信号強度・ノイズ比 : C/N 75 dBm と 7 桁の範囲にあり、線幅は W : 5 MHz 以下、と良好であった Fig 3. a 。参照光の指数強度減衰に、発生する電磁波強度の応答は良い直線性を示した Fig 3. a, b, c, d, e, f, g 、 Fig 4 。測定結果から発生した電磁波の線幅、と C/N は SPM による表面分光に充分活用可能な値が確保されている。微弱な信号強度においてもスペクトル純度の荒れは確認されず、高いスペクトル純度が得られた。レーザー ( 1, 2 ) の設定波長と測定されたマイクロ波の周波数にわずかな差が見られた。これは光強度測定のおり参照光ビート設定レーザー光の on/off 制御をアクテブスイッチの on/off によって実施したことで、レーザー発振に穏やかな温度によるドリフトが生じわずかな周波数のずれとして観測されたものと理解される ( 1 GHz 以下 ) 。観測されたスペクトルに小さなホッピングが測定された Fig 3. a, c, d, e 。波長可変レーザー発振波長と線幅を高安定化するレーザー制御機能から生じ、本実験はレーザー ( 1, 2 ) の光をヘテロダインミキシングすることで高精度な計測を実施しており計測されたものと推察する。

## 5. まとめ

波長が 1.55  $\mu\text{m}$  の光は 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周波数 ( 波長 ) 変換することが可能である。光ヘテロダインによる波長変換では観測された電磁波のスペクトル純度に 2 台のレーザー其々の発振線を持つコヒーレンスが含まれて表されている。計測したマイクロ波スペクトルの純度は、参照光強度の指数減衰に 5 MHz 以下の線幅を維持した。位相ノイズの計測結果は 100 MHz の範囲で急峻に、バックグラウンドノイズレベルに減衰した。スペクトルの C/N : は | 15 ~ 75 | dBm の値を得た。その線形性は 5 桁を越えて計測された Fig 4 ( m W ~ n W ) 。このことは微弱な電磁波を検出する励起参照信号光に活用できることを示している Fig 3. a, g 。スペクトルアナライザーが測定した 200 MHz のスキャン領域にサブスペクトルのない、純粋なビート信号 1 本のみ計測された。発生した電磁波のコヒーレンスとスペクトル純度は高く、高周波走査トンネル顕微鏡 RF - STM、( ESR - STM )、NSOM など SPM の新しい励起参照光源として充分活用可能であることを確認できた。本光ヘテロダイン法を拡張すれば、参照光パワーの変化にスペクトル純度を維持できる。波長、強度を精密に制御可能なマイクロ波から THz 電磁波の発生が可能であることが示唆された。

## 6. 謝辞

本実験実施に際し、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 重川秀実 教授、中村潤児 教授、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 300GHz 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.
- [3] 松山英治 光ビート法による高周波の発生 筑波大学技術報告書集 NO 28, (2008) 62-65
- [4] E. Matsuyama, S. Yasuda, O. Takeuchi, H. Oigawa, J. Nakamura, and H. Shigekawa, Development of Radio Frequency STM for ESR Spin Detection, 13 th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy, 119 (2005)
- [5] 特許 (特願 2006-7) ヘテロダインビートプローブ走査プローブ顕微鏡およびこれによってトンネル電流に重畳された微小信号の計測方法

# Dependence of High Frequency Signal Generated by an Optical Beat Method on the Reference Signal Intensity

Eiji Matsuyama

Institute of Materials Science, Academic Service Office for Pure and Applied Sciences University of Tsukuba,  
1-1-1 Tennohdai, 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. In order to generate microwaves by an optical beat method, two laser beams were mixed and guided through a single-mode fiber to a nonlinear detector ( optical heterodyne mixing ). The wavelengths of two beams are 1.0 ~ 2.0  $\mu\text{m}$  of near infrared region. The center frequency of the output signal from the detector is 569.1 MHz. The dependence of the output signal on the reference signal intensity was examined in detail by observing the spectrum of the output signal. Even when the reference signal intensity decreased from -5 dBm to -50 dBm, the spectral purity of the output signal was maintained to 5 MHz width. The intensity of the output signal was decreased linearly when the reference signal intensity was changed from -5 dBm to -50 dBm. Hence, it is suggested that, by extending the optical beat method described in this report, microwaves and terahertz electromagnetic waves whose wavelengths and intensities are strictly controllable can be generated.

**Keywords:** Optical beat; Scanning probe microscopy; Terahertz; ESR – STM