

サブピコ秒光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測システムの参照光光路差に対する 信号光位相データの線形性検証

電子工学科 上野研究室 坂野 将太

1. 研究背景

将来、通信の高速化・大容量化の要求に応える光通信システムとして電気処理を行わない全光信号処理技術が挙げられる。全光信号処理は電気処理を行わないために通信の処理速度を飛躍的に向上することが可能になる。中でも、全光信号処理技術を実現させる素子として半導体光導波路が小型で集積化可能、超高速動作、低エネルギー動作により期待されている[1]。

そこで本研究ではサブピコ秒スケールで、半導体光導波路の全光信号処理で重要な要素である強度変調量と位相変調量を測定可能な、ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測法が原理通りの動作を示すかを実験的に調査し、当研究室の実験装置が試料評価に有効であることを明らかにした。

2. 原理と方法

2.1 光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測法

半導体光導波路を評価する有効な方法として光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測法が挙げられる。この方法は半導体光導波路の時間的な強度変調量と位相変調量を同時に読み取ることが可能である。半導体光導波路にとってこれらの要素は導波路内の屈折率変調量を見ることになり、屈折率変調から間接的に試料内のキャリア動作を観測することが出来る。キャリア動作は半導体光導波路がデバイスとしての使用できるかを決定する重要な要素の1つになっている[2]。

2.2 光ヘテロダイン法

ヘテロダイン法は周波数が僅かに異なる2つの光信号を重ね合わせ、差周波でできる信号(ビート信号)を測定することで、物質からの情報を高精度・高感度で得ることが出来る計測法である。そこでヘテロダイン法の原理を説明する。原理は以下のような式で表される。

$$\begin{aligned} I_{beat} &= \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{pro} + E_{ref}) \right|^2 \\ \text{ビート信号強度} &= I_0 \left[1 + \cos \left\{ 2\pi f_b t + 2\pi \left(\frac{l_{pro}}{\lambda_{pro}} - \frac{l_{ref}}{\lambda_{ref}} \right) + (\phi_{pro} - \phi_{ref}) \right\} \right] \quad (2.2.1) \\ &= I_0 [1 + \cos(2\pi f_b t + \theta_{meas.})] \end{aligned}$$

$$\text{光位相} \quad \theta_{meas.} = 2\pi \left(\frac{l_{pro} - l_{ref}}{\lambda} \right) + (\phi_{pro} - \phi_{ref}) \quad (2.2.2)$$

(E_{pro} 、 E_{ref} : プローブ光、参照光の電界成分 I_{beat} : ビート信号強度 ($I_0 = a^2$) P_{pro} 、 P_{ref} : プローブ光強度、参照光強度 f_{pro} 、 f_{ref} : プローブ光、参照光の周波数、 $f_b = f_{pro} - f_{ref}$ l_{pro} 、 l_{ref} : プローブ光、参照光の光路長 λ_{pro} 、 λ_{ref} : プローブ光、参照光の波長 ϕ_{pro} 、 ϕ_{ref} : 光の初期位相)

今回の研究ではプローブ光と参照光は同じ波長のために θ_{meas} では、 λ とした。式(2.2.2)から信号光の光路長である l_{pro} 、 l_{ref} のいずれかを増減させて θ_{meas} との関係を示すと信号光と位相は線形比例の関係を示す。このことからヘテロダイン法が原理通りの動作を示していることを明らかにする。また位

相が 360 deg. (2π) 増加されたときの信号光の光路長は光源の波長と等しくなる。よって実験結果は光源の波長と測定された 1 波長とが一致するはずである。

2.3 当研究室の光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測法

図 1 では 80 MHz の繰り返し周波数のパルス (~ 1300 nm の波長、150 fs のパルス幅、300 mW の光強度) を発振する Optical Parametric Oscillator (OPO) を光源としている。OPO から発振された光を偏光ビームスプリッター (Polarization Beam Splitter, PBS) で 2 つに分ける。1 つはポンプ光であり、もう 1 つはプローブ光となる。ポンプ光は PBS 通過後 2 つのレンズにより平行ビームにし、その後遅延ステージ (Delay stage #1) を通る。遅延ステージ #1 によりプローブ光とポンプ光に遅延時間を与える。プローブ光は顕微鏡対物レンズ (Microscope Objective, MO) によりシングルモードファイバー #1 (Single-Mode Fiber, SMF) へ集光する。SMF により自己位相変調 (Self Phase Modulation, SPM) が起きることでスペクトルが広がり、次にバンドパスフィルター (Band Pass Filter, BPF) (CVI 社製、帯域幅 10 nm) で切り取る。

その後、PBS でプローブ光をさらに 2 つにプローブ光と参照光に分ける。プローブ光と参照光はそれぞれ音響光学変調器 1,2 (Acousto-Optical Modulator 1,2 AOM#1,#2) で光周波数を 81.2 MHz、78.7 MHz にシフトさせる。プローブ光は BS でポンプ光と結合して、先球ファイバー (Spherical Lensed Fiber, SLF) を通り試料に入射される。出力光は再び MO を通り BPF でポンプ光をカットし、プローブ光は BS で参照光と合波する。プローブ光と参照光の光周波数をそれぞれ AOM シフトさせて、差周波数を 2.5 MHz になっている。そのため 2.5 MHz となったビート信号を検出し、ロックインアンプでプローブ光の位相変調量度と強度変調量度を読み取る。

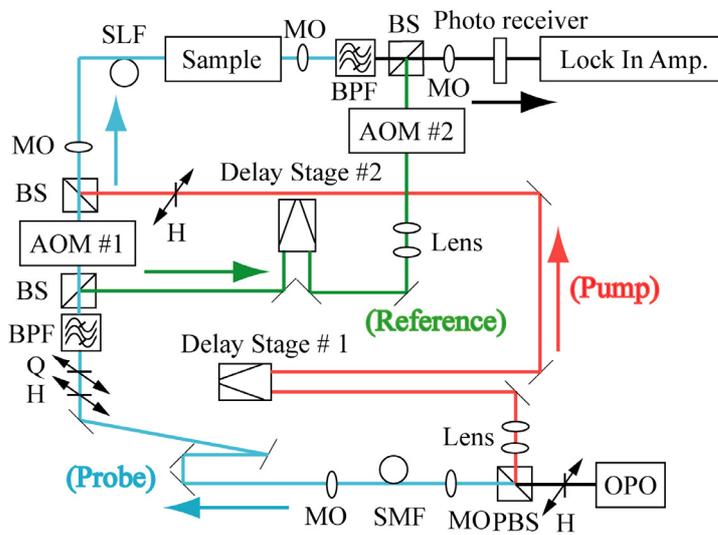


図 1 当研究室の実験セットアップ

3 実験結果

参照光光路長増分に対するビート信号の光位相増分の線形性測定結果が図 2 (a) である。参照光の光路長に増減による光位相は崩れていて線形性を示しているとは言いがたい結果となった。測定波長は $1.95 \mu\text{m}$ となり OPO 光源 ($1.28 \mu\text{m}$) と比較すると、 $0.47 \mu\text{m}$ のずれとなっている。そこで線形性が崩れる原因の調査を行った。この原因として実験装置の位相雑音を考えた。位相雑音は空気の振動や他の光の影響によるもので規則性がない。そこで雑音成分のために位相が乱れてしまい位相が光路長と線形比例にならないと考え、位相雑音成分を線形性測定と同時に計測した (図 2 (b))。

位相雑音成分を利用し測定データの補正を行った。補正後が図 3 である。補正後のグラフは位相と光路長が線形比例している。これより位相の線形性を崩す原因は雑音成分であることが判った。

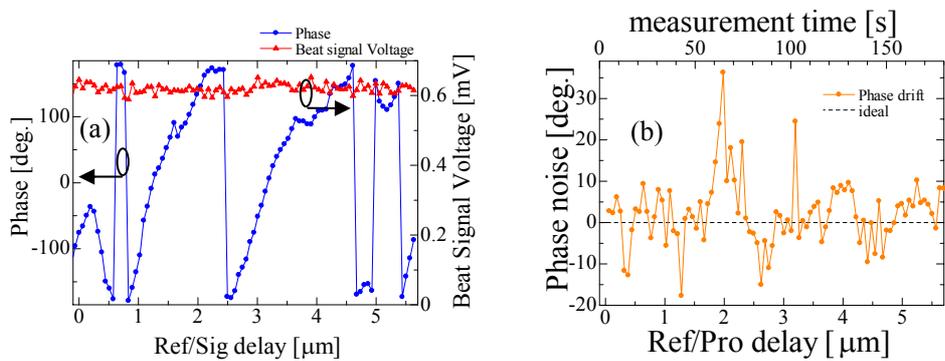


図2 (a)参照光光路長増分に対するビート信号の光位相増分の線形性結果
(b) 測定時の雑音による光位相ドリフト成分

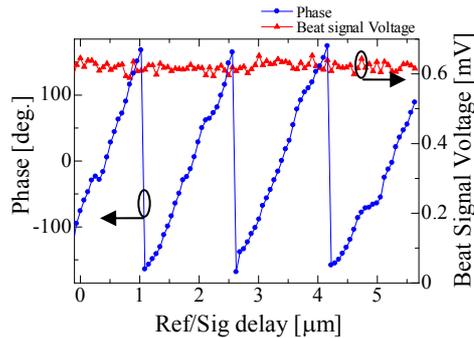


図3 位相線形比例データの補正後結果

しかし、補正後の測定波長は $1.42 \mu\text{m}$ となっており補正前の値より光源の中心波長 $1.28 \mu\text{m}$ とずれが生じている。光源は単一波長ではなく $1.25 \sim 1.33 \mu\text{m}$ の幅を持っている。しかし今回の測定波長はこの範囲に入っていないために補正による位相雑音の取り除きには限界があり測定時点で雑音を減らす必要があると考えた。そこで、実験装置の雑音成分を軽減するために測定時間間隔 ΔT と、ビート信号強度を増減させ雑音成分調査することで、雑音成分が依存している要因の特定を行い雑音の軽減を行った。ここで測定時間間隔 ΔT とは測定 1 ポイントの測定時間のことを指している。

測定時間間隔 ΔT と位相雑音成分の依存性を示しているのが図 4(a)である。測定時間が長くなると位相雑音が大きくなることが判った。時間間隔が 0 ms の時には位相雑音成分が多くなっている。この原因としては時間間隔が 0 ms であると、遅延ステージの空間的な移動が終わり停止するまでに 10 ms 程度の時間が必要とされる。 0 ms では、光路長の増減による位相の増減が位相雑音と混同して雑音成分が増加しているためと考えた。測定時間間隔と測定波長の依存性は、時間間隔が長い場合がスペクトル波長に近い値になっている。これから時間間隔が 500 ms 程度空いていないと位相雑音がうまく補正できないと言う結果を得た。

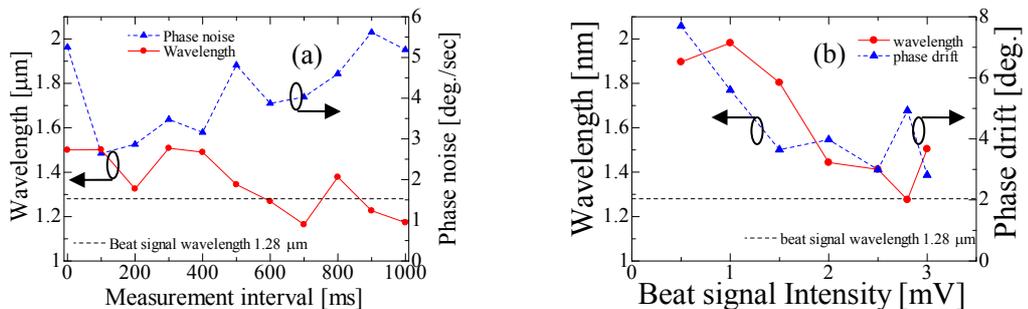


図4(a) 測定時間間隔 (ΔT) に対するビート信号の光位相雑音成分と測定波長依存性
(b) ビート信号強度に対する測定波長の依存性と位相雑音依存性

ビート信号強度変化させ、雑音成分に影響を与えているかどうかを系統的に調査を行い検証した結果が図4(b)である。結果はビート信号が1.5 mV未満になると急に位相雑音が増加してしまい6~8 deg.になり測定に影響が出てしまうことが判った。最も雑音が減ったビート信号強度が3.0 mVのときに2.4 deg.となった。

また測定波長に関しては、ビート信号強度が1.5 mV以下になると雑音成分である位相雑音が増加するため、波長がスペクトルの中心波長である1.28 μm から遠ざかっている。以上から、ビート信号強度は1.5 mV以上が測定時に要求されることが新しく判った。

今まで得た位相雑音成分の軽減方法を考慮して、参照光光路長増減による光位相の線形的増加を測定した。結果が図5である。この図では位相は参照光光路長に対して線形的に比例をしている。

また、計算値による比較においても測定結果と一致している点が多いためこの結果は良好な結果と言える。また測定平均波長は1.25 μm となっており光源の中心波長と1.28 μm と0.03 μm のずれとなっている。この値を位相差に直すと0.5 deg.となる。今回の測定での位相雑音は平均で2.8 deg.となっており今回の位相差はこの値よりも小さい値である。よって位相の雑音は十分に取り除けている結果となっている。

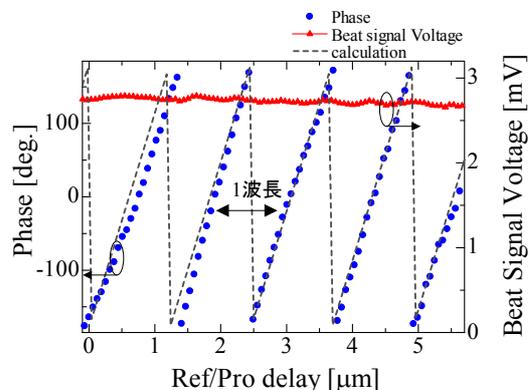


図5 参照光光路長増分に対するヘテロダイン信号の光位相増分の線形性結果

4 結論

今回、位相雑音成分を計算による補正及びビート信号強度と測定時間間隔を調節し位相雑音を軽減したことで、当研究室の実験設備でヘテロダイン信号の原理通りの動作が確認できた。このことから当研究室の実験装置を用いた半導体光導波路評価の測定の正当性が明らかにされた。

今後の展望としては、実際に半導体光導波路を用いての線形性の測定を行い、試料を用いても同様の結果が得られるかを明らかにし、試料の光位相・光強度変調量を測定・評価に有効な実験装置であることを証明していきたい。また位相雑音の原因についても更に調査を行い原因解明と実験装置の改善を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] Y.Ueno, S.Nakamura, and K.Tajima, “Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40–160-GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing,” J.Opt. Soc. Am.B, vol.19, No. 11, pp 2573-2589, 2002
- [2] 吉澤 徹、瀬田 勝男、“光ヘテロダイン技術,” アドコム・メディア株式会社