

# 高速・高効率なナノ半導体とバルク半導体の

## 光位相変調度と速度の計測評価研究

電子工学専攻 上野研究室 本間 正徳

### 1. はじめに

現在の光通信システムは、送信した光信号を一度電気信号に変換し、電気的な処理を施した後、再び光信号に戻す形式である。その為、電子の動作速度限界により通信速度が制限(40-Gb/s)を受ける。今日、通信速度の高速化・データの大容量化という要求が高まる中、電気的処理を介さない全光信号処理技術の研究が盛んに行われている。全光信号処理をするに当たり、全光スイッチング素子は重要要素の1つであり、小型集積化・高速動作・低エネルギー動作といった課題が挙げられる。現在、汎用性が高い・広範囲の波長に対応可能という理由から、バルク型の半導体光増幅器(SOA)が研究・開発段階で多く使用されている[1]。将来的には、上述した課題の克服の為に、ナノ半導体構造であるフォトニック結晶(PC)や量子ドット(QD)を応用した素子が期待されている。PCは光波長程度の周期構造を構成している事により、強い光閉じ込め効果とスローライト効果(=群遅延速度効果)という特徴を持つ。一方QDは、電子を3次元から閉じ込めた構造(=電子の0次元の世界)という構成により、非線形性が強く、また、低飽和エネルギーであるという特徴を有する。このPCとQDを組み合わせた対称マッハ・ツェンダ型(SMZ)全光スイッチング素子が提案され、100 fJで位相変調度 $\pi$ を得られる事を実証した[2]。これは光導波路部分を

PCで構成し、非線形媒体部分にQDを使用した構造をしており、更に、10 fJで動作する40-Gb/s全光フリップ・フロップ(FF)メモリの提案もされている。

上位目的として、このPC/QD全光FFメモリに代表される次世代全光スイッチング素子の実用化の為に、ナノ半導体光導波路内のキャリアの振る舞いの解明を掲げている。その中で、ナノ半導体とバルク半導体の光位相変調度と光強度変調度の波長依存性に注目した。共同研究先である筑波大学がナノ半導体の評価を担当している事もあり、我々はバルク半導体における波長依存性の評価を行う事にした。

本研究では、スイッチング動作に必要な位相変調度を光強度と同時に測定可能にする実験装置の構築と、1.3- $\mu\text{m}$ 帯バルク半導体光導波路を実験対象としたKramers-Kronig(K-K)関係式を使用した波長依存性の評価を行った。ここで1.3- $\mu\text{m}$ 帯の試料を使用するのは、上位目的にあるナノ半導体はその波長帯に適している為である。

### 2. 原理

#### 2.1 スwitching動作原理

ここではSMZ全光スイッチ(図1)を用いてスイッチング動作原理を説明する。信号光(SP)の出力は制御光(CP)に依存してスイッチされるが、何も行わないと、SPはport-Bから出力される。この事を踏まえ、SPと上部入力ポートからのCP-ONを入射される

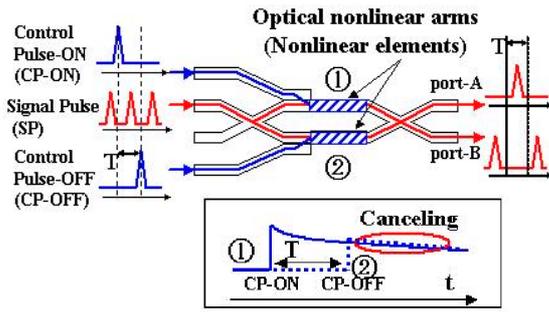


図1 対称マッハ・ツェンダ型(SMZ) 全光スイッチの概念図

と、非線形アーム①で CP-ON が非線形媒体に吸収され、 $\chi^{(3)}$ に寄与する非線形光学効果が生じる。その結果、非線形媒体の屈折率変調が誘起され、SP の位相が変調される。すると、干渉状態の変化に伴い SP の出力が port-A に切り替わる。その後何もせずにアーム①内の屈折率変調が徐々に緩和するのを待てば、出力ポートはそれに従い元のポート(port-B)に戻る。この緩和を待たずに T 秒後に下部入力ポートから CP-OFF を入射すると、アーム②において①と同様な現象が生じる。その結果、CP-ON による遅いキャリア緩和が強制的にキャンセルされ、出力が port-B に切り替わる(図 1 下図)。つまり、半導体のキャリア緩和(寿命)に制限されない高速なスイッチング動作と、矩形型に近いスイッチング窓動作が可能となるのである。この動作原理は差分位相変調方式と言う。また、出力をスイッチする為には、位相変調度が $\pi$ 必要となる。

ここで因果律が認められる時、SP の屈折率と位相、波長の間には一般的に K-K 関係が成り立つ。

## 2.2 ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測法

ポンプ・プローブ計測方式にヘテロダイ

ン計測方式を加えた計測法である。半導体光導波路試料を通過する事により、プローブ光がポンプ光のパワーとその遅延時間に依存して変調される(式-1)。その変調を受けた情報(光位相・光強度変調とその緩和時間)を持つプローブ光を参照光(式-2)と干渉させる事により生じる、ビート信号から情報を検出する計測法である(式-3)。

- ・光強度と同時に光位相の情報を検出する事が出来る

- ・ほぼ一定の周波数の光のうなり信号(ビート信号)を検出するので、周波数の異なる雑音光の影響を受けない

- ・参照光の強度を大きくする事で検出される信号強度を大きく出来るので、微弱な信号の検出が可能である

といった特徴が挙げられる。

$$\begin{cases} E_{pro} = \sqrt{P_{pro}(t, P_{pump})} \cos\{(\omega + \omega_{pro})t + \phi(t_{delay}, P_{pump})\} \quad (1) \\ E_{ref} = \sqrt{P_{ref}} \cos\{(\omega + \omega_{ref})t\} \quad (2) \end{cases}$$

$$I_{beat} \propto (E_{ref} + E_{pro})^2 \quad (3)$$

$$\longrightarrow I_{beat} \propto \sqrt{P_{ref}} \sqrt{P_{pro}(t, P_{pump})} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + \phi(t_{delay}, P_{pump})\}$$

## 3. 実験構成

### 3.1 構築した実験装置

実験装置を立ち上げる上で、装置性能の目標値を次の様に設定した。時間分解能に関しては、助言を頂いた他研究機関が 2 ps 程度であるという点と、強度測定しか行えなかった旧実験装置において 400~600 fs であった点を考慮し、400 fs~1 ps と定めた。ダイナミックレンジは、PC/QD 光導波路を測定対象にする際に他機関でおよそ 10 dB で測定が行えた点を考慮して、10 dB 以上と設定した。

実験装置を構築する段階で、装置の性能を示すプローブ光と参照光によるビート信号を測定した。このパルス幅が時間分解能

を、信号対雑音比(SNR)がダイナミックレンジを表す。測定方法は参照光側に設置した遅延ステージを動作させる事で、プローブ光と参照光間の遅延時間に対するビート信号のパワーを検出する形式である。

まず、実験試料無し状態でビート信号を測定し、ピークパワーをプローブ光の入力パワーについて系統的に調べる事で、実験装置が実際に正常に動作する事を検証した。またビート信号を観測する事により、SNRがダイナミックレンジを表すという点から、ナノ半導体やバルク半導体試料を測定する際に、どの程度の性能を有しているかを確認する指標ともなる。

図2がその結果である。対数グラフにおいて測定値の傾きがおよそ2である事が判る。この結果を式-3の強度係数と比較する事で、立ち上げた実験装置にヘテロダイン計測方式が適用されている事が確認出来た。この時の参照光のパワーは16  $\mu\text{W}$  である。

次いで、実験試料としてPC/QD光導波路を用いた時を考えてみる。入力光と光導波路との結合損失や導波路内での損失を考慮した出力パワーから、およそ10 dBのダイナミックレンジが得られると推定された(図2の楕円の領域)。

これらの準備段階を経て構築した実験構成であるが、1つの光源光パラメトリック

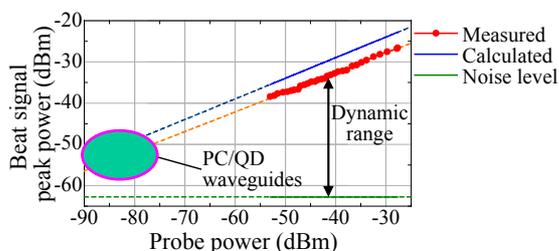


図2 プローブ光入力パワーに対するビート信号のピークパワー

発振器である(OPO)から2つの光を作り出している。OPOから出力された光(TE-偏光)を偏光ビームスプリッタ(PBS)で2つに分ける。一方はポンプ光として、もう一方はプローブ光として使用する。この2つの光のパワー比率は、PBS前に設置した $\lambda/2$ 板(H)で調整可能にしている。この調整はプローブ光の決定において重要となる。

ポンプ光はOPOの出力光の中心波長を保つ。プローブ光は、シングルモードファイバ(SMF)を通す事により自己位相変調を起こしてスペクトルを拡げ、その後、バンドパスフィルタ(BPF)(帯域幅: 10 nm)で切り取る。その為、SMFへの入力パワーとファイバ長、BPFの組み合わせにより、切り取るパルスの波長帯の調整が可能となる。この装置では波長1200 nmから1350 nm迄の調整が可能である。最初にPBSで2つに分け異なる波長にした光を、ビームスプリッタ(BS)で1つに戻し、実験試料に入射する。その際、実験試料の構成に合わせ、ポンプ光とプローブ光共に偏光調整を可能にしている。方法は各々の光路にあるHと $\lambda/4$ 板(Q)を使用する。

実験試料への結合方法は、入力側は先球ファイバ(SLF)を使用し、出力側は顕微鏡対物レンズ(MO)で集光する形式である。その試料から出力された光を参照光と干渉させる。この参照光とは、プローブ光側のポンプ光と合波する前に設置したBSにより分けられた光である。この時、光位相計測の為、プローブ光と参照光各々の光路に音響光学変調器(AOM)を設置し、僅かに異なる周波数に設定して差周波を取っている。信号の検出部には光電検出器-ロック・イン型増幅器システムを使用し、より微弱な信



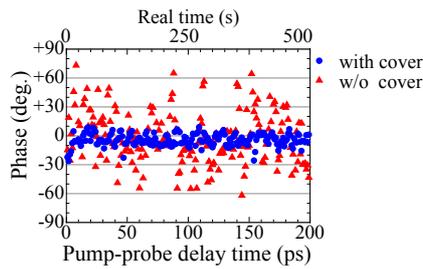


図 6 光位相測定時における雑音の影響

トする事によるこれ以上の雑音の低減に結び付く結果は得られなかった。

位相に関する雑音の原因として、実験装置外部からの空気の振動や光、熱の影響が考えられた。そこで我々は、対策の1つとして実験装置全体をカバーで覆う事を考え、実行した。その際、厳密にはではないが、光学機器間の間切りも行った。光強度の雑音に関しては、式-3より参照光のパワーが得られれば(アライメントを上手く行えば)雑音解消に繋がると考えた。

実験装置自体の雑音の影響とカバーの効果を求める為に、実験試料を除いた状態で、カバー無しと有り両方の状態における光位相測定時に発生する雑音の分布を測定した(図6)。結果、実験装置全体を覆う事で、20~30 deg.程度(雑音全体の70%前後)の雑音を改善する事が出来た。

#### 4. 評価結果

今回使用した実験試料は1.3- $\mu\text{m}$ 帯バルク型SOAである(図7)。SOA挿入時の装置の性能は、図8より時間分解能450 fs、ダイナミックレンジ35 dBであった。この時の参照光のパワーは45  $\mu\text{W}$ である。

SOAは注入電流を必要とする受動素子であるので、その電流値による光位相と光強度の依存性を観測した(図9)。図9-aより、注入電流の増加に伴い、光位相変調度が増

加する事が分かる。緩和速度に関しては、指数1次近似により140 ps程度であったが、100 mA以下では雑音の影響で求める事が出来なかった。図9-bより、光強度の測定結果では、注入電流値が130 mA付近以下で利得領域で反応していた傾向が吸収領域に変化して行く様子を観測した。この2つの領域の境界となる注入電流値から離れる程光強度変調度が増加した。これらの結果より、150 mAが安全面、利得領域という点から妥当であると判断した。

図10はポンプ光対プローブ光の入力エネルギーを10対1とした時の光位相と光強度の緩和特性を測定した結果である。光位相の緩和速度に関しては150 ps前後の一定な値を取るが、変調度については光位相と

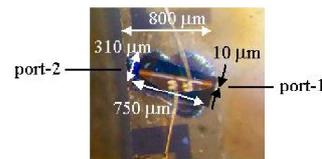


図 7 1.3- $\mu\text{m}$ 帯バルク型SOA

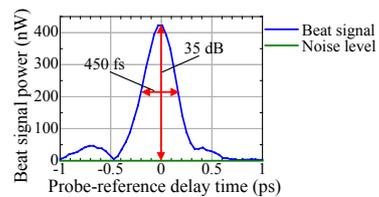


図 8 プローブ光と参照光によるビート信号

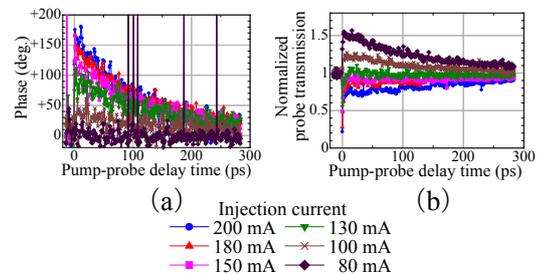


図 9 注入電流に対する測定結果

(a) 光位相緩和曲線、(b) 光強度緩和曲線

光強度共に統一性が無く、ばらついた値を取った。

プローブ光波長に関しては、光位相変調度が波長毎に異なる様子が見える(図 11-a)。図 11-b においては、光強度変調度は 7~16 dB の変化が見受けられたが、反応領域が波長によって異なる事から、その緩和速度については検証しなかった。この結果を、異なる入力エネルギー毎にまとめたグラフが図 12 である。ここで、光位相変調度は実線で、光強度変調度は破線で表してある。こ

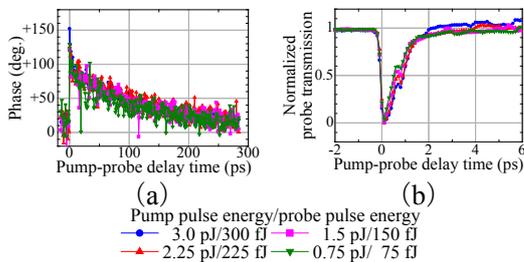


図 10 入力エネルギーに関する測定結果  
(a) 光位相緩和曲線、(b) 光強度緩和曲線

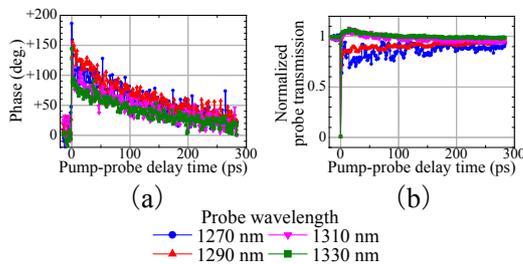


図 11 プローブ光波長に対する測定結果

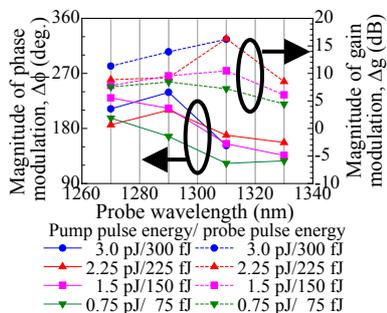


図 12 プローブ光波長依存性  
実線: 光位相変調度、破線: 光強度変調度

のグラフより、短波長側で位相変調度 $\pi$ を得られ、低エネルギー動作の観点からすると、この波長範囲においては 1270 nm が最も適している事が判る。更に、1310 nm 付近でグラフが反転する傾向にある。強度変調度に関しては、1310 nm 付近で変調度の頂点を取る様な凸型の傾向がある。この 2 つの傾向を照らし合わせると、K-K 関係に沿った波長依存性があると考えられる[3]。

## 5. まとめ

光強度と同時に光位相変調度を測定可能にする実験装置を完成させた。性能としては 500 fs 以下の時間分解能と 10 dB のダイナミックレンジを達成した。また、光位相測定時に発生する雑音に対しては、全体の 70%前後を低減する事に成功した。

1.3- $\mu\text{m}$  帯バルク半導体光導波路に関して、Kramers-Kronig 関係式の存在下で、光位相と光強度の変調度に波長依存性があるという見込みを実験的に証明した。

今後は、より広範囲のプローブ光波長に関する依存性を明らかし、ナノ半導体光導波路の評価に役立たせて行く。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、実験装置やナノ半導体試料の提供等、様々な助言を下された物質・材料研究機構の浅川潔氏、筑波大学の尾崎信彦氏、三菱電機の金本恭三氏に感謝致します。

## 引用文献

- [1] K. Tajima, JJAP, vol. 32, pt. 2, no. 12A, pp. L1746-L1749, 1993.
- [2] K. Asakawa et al., New Journal of Physics, vol. 8, no. 208, pp. 1-26, 2006.
- [3] R. Giller et al., Photonics Technology Letters, vol. 18, no. 9, pp. 1061-1063, 2006.