

# GaN系サブバンド間遷移を応用したサブピコ秒光スイッチ

Sub-picosecond Optical Switches Utilizing Intersubband Transition in GaN

鈴木 信夫 飯塚 紀夫 金子 桂

■ SUZUKI Nobuo

■ IIZUKA Norio

■ KANEKO Kei

絶え間ないデジタルデータの増加に対応するために、光ファイバネットワークへの光信号処理技術の導入が必要とされている。東芝では、そのキーデバイスの一つとして、窒化ガリウム/窒化アルミニウム (GaN/AlN) 量子井戸中のサブバンド間遷移を利用した新しい超高速半導体光スイッチの開発を進めている。GaN 光導波路中の強いバックグラウンド吸収の原因となっていた結晶欠陥の低減を図り、ゲート幅 0.24 ps の超高速動作を実現した。導波路型半導体光スイッチでもっとも高速の 1.5 Tビット/s のスイッチング動作が可能であることが実証された。

It is necessary to introduce optical signal processing technologies into optical fiber networks to cope with the continuous increase in digital data. Toshiba has developed a novel ultrafast semiconductor optical switch based on the intersubband transition (ISBT) in GaN/AlN quantum wells, as one of the key devices for this purpose. Crystalline defects, which cause strong background absorption in GaN waveguides, were successfully reduced, and a gate width as short as 0.24 ps was achieved. The potential for such GaN switches to operate at 1.5 Tbit/s, the fastest speed among waveguide-type semiconductor optical switches, was verified.

## 1 まえがき

インターネットを介して流れる情報量は年2倍を超える勢いで増えている。今後も高精細映像などの負荷の大きなデジタル情報の増加が見込まれており、伝送レートも現状の 10 Gビット/s から 40 Gビット/s, 160 Gビット/s と上げていく必要がある。現在の光ファイバネットワークでは、伝送されてきた多重化信号をノードでいったん電気信号に戻し、電気的に処理できる小さな単位に分解してから処理を行っている。このままデータが増加し続けると、ルータの消費電力やサイズが大きくなりすぎ、立ち行かなくなる。そこで、大東の信号処理については信号を光のまま処理する“光信号処理技術”の導入が進むものと予測されている。

超高速光スイッチは、このような将来の光ノード処理に必要なデバイスの一つである。現状でも、光ファイバの非線形性を利用して、100 Gビット/s 以上の光スイッチング実験が行われている。しかし、サイズ、コスト、消費電力、安定性、低遅延性、集積化などを考えると、半導体光スイッチの実現が強く望まれる。ところが、これまでの半導体光スイッチの応答速度は電子の再結合寿命 (100 ps ~ 数 ns) で制限されており、数十 Gビット/s が限界であった。

この限界を打ち破る半導体中の光スイッチ原理として、サブバンド間遷移 (以下、ISBT (InterSubBand Transition) と略記) が注目されている<sup>(1)</sup>。ISBT は半導体量子井戸の伝導帯内 (あるいは価電子帯内) に形成される、サブバンドと呼ばれる電子準位間の遷移である。緩和時間 (上の準位に励起さ

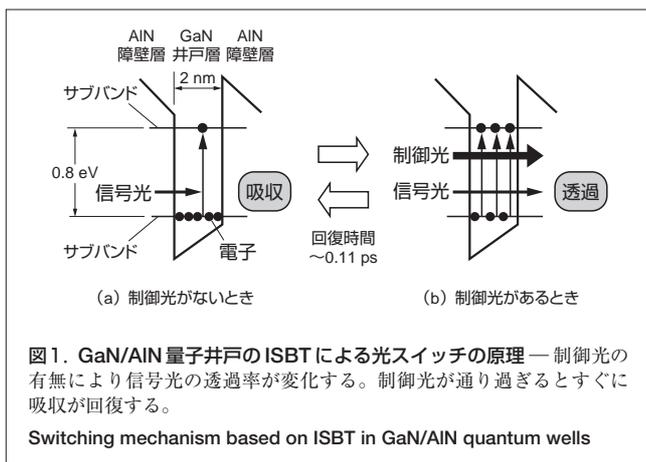
れた電子が下の準位に戻る時間) がバンド間遷移と比べて 2~3 けた短い (0.1~数 ps) ので、約 1 Tビット/s (毎秒 1 テラビット = 毎秒 1 兆回) の超高速動作が可能になる。

光ファイバ通信で使われる波長 1.55  $\mu\text{m}$  付近の ISBT は、井戸を深くできるインジウムガリウムヒ素/アルミニウムヒ素アンチモン (InGaAs/AlAsSb) 系、窒化ガリウム/窒化アルミニウム (ガリウム) (GaN/Al (Ga) N) 系 (以下、GaN 系と略記)、及び硫化カドミウム/セレン化亜鉛/テルル化ベリリウム (CdS/ZnSe/BeTe) 系の量子井戸で実現されている<sup>(1)</sup>。これらのうち、もっとも高速の動作が可能なのは、GaN 系である。ここでは、国家プロジェクト“フェムト秒テクノロジー” (1995年12月~2005年3月) の枠組みの中で東芝が分担して開発を進めてきた、GaN 系 ISBT 光スイッチについて述べる。

## 2 GaN系サブバンド間遷移

### 2.1 原理

図1は、GaN/AlN 量子井戸の伝導帯のエネルギー構造を模式的に示した図である。窒化物半導体はピエゾ電気効果や自発分極が大きく、井戸層と障壁層で逆向きに MV/cm オーダーのビルトイン電界が生じている。GaN/AlN 界面のエネルギー障壁は 1.75 eV 程度であるが、ビルトイン電界によるポテンシャルの傾きで実効的な障壁が高くなるので、短波長化に有利である。井戸層を 2 nm 程度にすると、サブバンド間のエネルギー差を約 0.8 eV (吸収波長 1.55  $\mu\text{m}$  相当) にできる。井戸層にはドナー (電子を供給する不純物) として



シリコン(Si)が添加されており、高密度の電子が下のサブバンドに存在している。

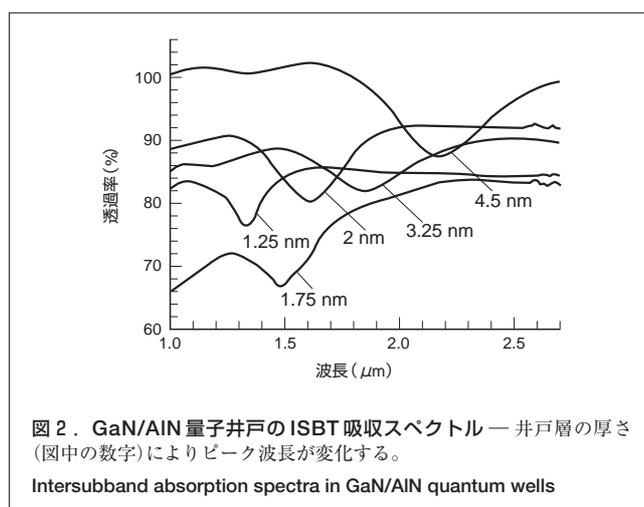
ISBT吸収波長帯域内に信号光パルスと制御光パルスの波長を設定する。制御光パルスがない状態では、入射した信号光はすべて吸収される。強い制御光パルスがある状態では、約半数の電子が上のサブバンドに励起されて吸収が飽和し、信号光は透過する。二つのサブバンドはエネルギー分布に重なりがあるので、励起された電子は縦光学フォノン(エネルギー約90 meVの格子振動モード)にエネルギーを吐き出して、元のサブバンドに戻ることができる。GaN系は電子と縦光学フォノンの相互作用が強く、このエネルギー緩和に要する時間がInGaAs系より1けた短い(約0.1 ps)。したがって、制御光パルスが通り過ぎれば、直ちに吸収が回復する。

## 2.2 近赤外波長のISBTの実現

GaNとAlNには約2.4%の格子不整合(原子間隔の違い)があり、基板となるサファイアとは結晶の型も異なる。良質な量子井戸を作製するためには、高度な結晶成長技術が必要である。当社は最初、青色発光デバイスの作製などで一般的な有機金属気相成長法(MOCVD)で研究を始めたが、2.9 μmまでしか短波長化することができなかった。そこで、薄膜界面の制御性に優れた分子ビームエピタキシ法(MBE)による開発に切り替え、図2に示すような波長1.33~2.15 μmのサブバンド間吸収を実現した<sup>(2)</sup>。

## 2.3 光導波路中のバックグラウンド吸収の低減

光導波路中を伝搬する光は、偏光方向(光電界の向き)が基板に垂直か平行かにより、TM(Transverse Magnetic)モードとTE(Transverse Electric)モードに分類される。ISBTは、光電界の向きが井戸に垂直な場合だけに生じる現象なので、光導波路中ではTMモードだけが選択的に吸収される。開発初期のGaN系光導波路でも吸収に顕著な偏光依存性が観測されたが<sup>(2)</sup>、強い光を入れても理論どおりの吸収飽和は観測されなかった。この原因を探求した結果、



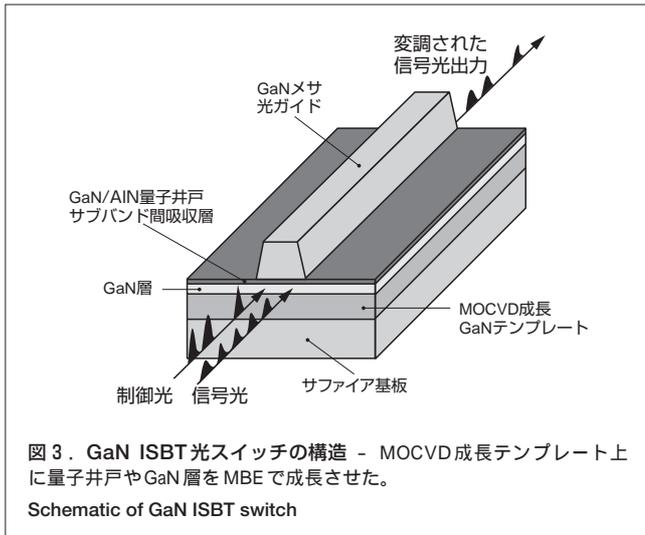
刃状転位(結晶欠陥の一種)が原因で吸収にISBTと同様の偏光依存性を生じていたことがわかった。サファイア基板上にMBE成長したGaN層には、成長方向に沿って格子不整合に起因する刃状転位が多数並んでいる。転位に捕獲された電子は転位に沿って動けるので、転位と平行な電界成分を持つTMモードが選択的に吸収される。このバックグラウンド吸収がISBTによる吸収より強かったため、ISBTの吸収飽和を観測することができなかったわけである。

そこで、まずGaN/AlN多層中間層の挿入により転位を低減し、GaN系光導波路中で初めてのISBTの吸収飽和の観測に成功した<sup>(3)</sup>。しかし、転位の低減効果が不十分であったため、信号光出力のオン/オフ比は2以下であった。そこで、多層中間層に代えてサファイア基板にあらかじめMOCVD成長したGaN層(テンプレート)を使うことにより、転位を大幅に減らした。量子井戸のない光導波路では、従来の成長条件で15~19 dB/mmあったバックグラウンド吸収を、多層中間層を用いた光導波路では9~12 dB/mmまで、テンプレートを用いた光導波路では1~3 dB/mmまで減らせた。

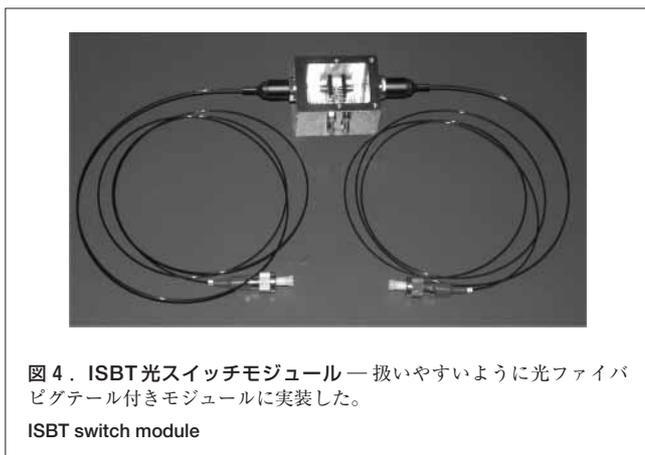
## 3 光導波路型光スイッチ

### 3.1 試作素子の構造

前節の結果に基づき、MOCVD成長GaNテンプレートを用いて光スイッチを試作した。構造を図3に示す。波長1.7 μmの制御光パルスにより波長1.55 μmの信号光パルスをスイッチできるように、ISBT吸収のピーク波長を1.65 μm付近に設定した。厚さ約2 μmの窒化物半導体層のうち上部約1 μmを塩素系ドライエッチングによりメサ加工し、光導波路を作製した。結晶欠陥の原因となる厚いAlNクラッド層は設けず、空気やサファイア基板との大きな屈折率差で光を窒化物半導体層に閉じ込める構造としている。メサ幅は約1.5 μmである



が、外部との結合効率を上げるため、端面近傍でテーパ状に $2\mu\text{m}$ に広げ、無反射コートを施した。素子長は $400\mu\text{m}$ である。試作したファイバピグテール付き光スイッチモジュールの外観(ふたを開けたところ)を図4に示す。



### 3.2 吸収飽和特性

波長 $1.55\mu\text{m}$ の信号光パルス(パルス幅 $0.13\text{ps}$ )に対する試作光スイッチモジュールの吸収飽和特性を図5に示す。ISBTの起こらないTEモードに対する挿入損失(○印)は、入力パルスエネルギーにかかわらず $6.7\text{dB}$ であった。損失の導波路長依存性から考えて、結合損失が支配的である。TMモード(●印)に対する飽和前の挿入損失は、TEモードより $23\text{dB}$ 大きかった。損失の波長依存性から、転位による吸収損失が $5\text{dB}$ 弱、ISBTによる吸収が $18\text{dB}$ 強と見積もられた。GaNのみの光導波路と比べて転位による吸収が大きいのは、量子井戸の格子不整合で発生した転位に井戸層の電子が捕獲されるためである。入力パルスエネルギーが $100\text{pJ}$ のとき、ISBTによる吸収は $10\text{dB}$ 減少した。

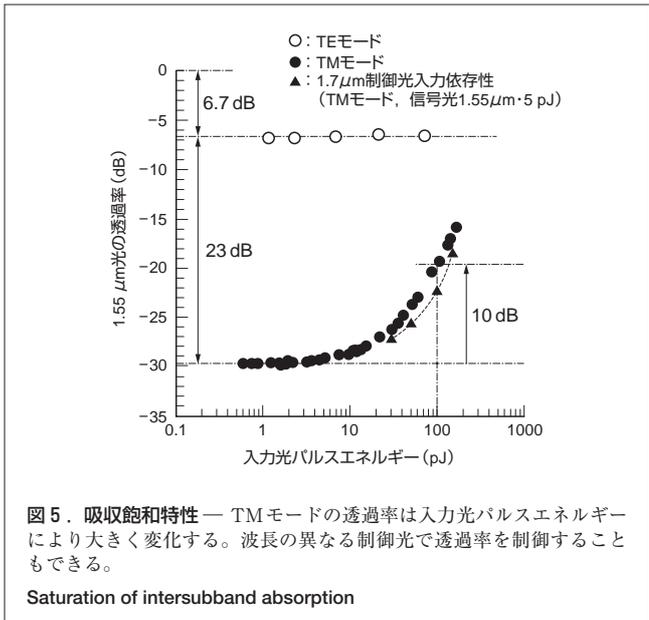
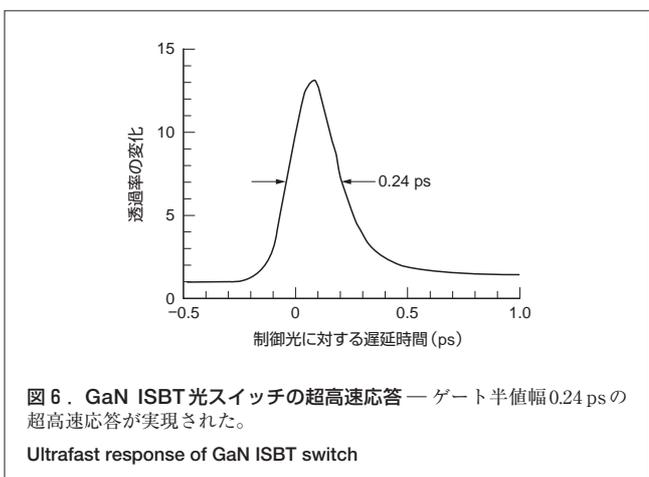


図5の▲印は、制御光パルス(波長 $1.7\mu\text{m}$ , TMモード, パルス幅 $0.13\text{ps}$ )の入射による、信号光パルス(波長 $1.55\mu\text{m}$ , TMモード, 入力パルスエネルギー $5\text{pJ}$ )の挿入損失の変化である。制御光入力パルスエネルギーが $150\text{pJ}$ のとき、信号光パルスに対する損失は $11\text{dB}$ 減少した。

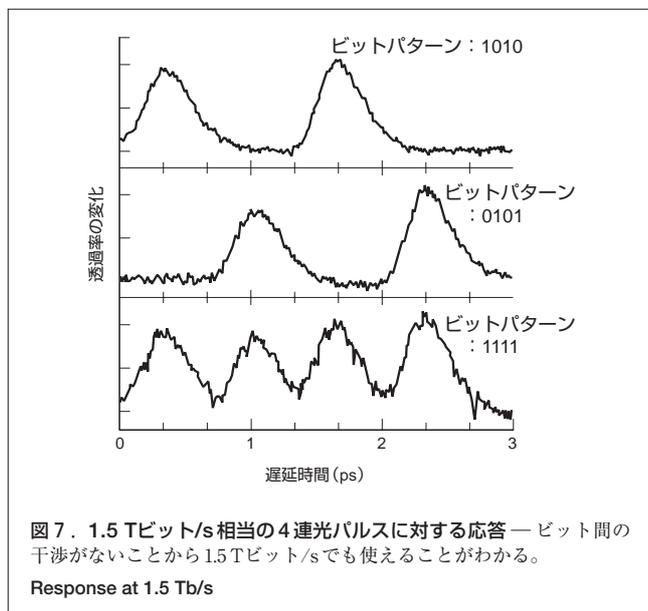
### 3.3 高速スイッチング特性

試作光スイッチモジュールの高速応答を図6に示す。横軸は制御光パルス(波長 $1.7\mu\text{m}$ , パルス幅 $0.13\text{ps}$ , エネルギー $150\text{pJ}$ )に対する信号光パルス(同 $1.55\mu\text{m}$ ,  $0.13\text{ps}$ ,  $5\text{pJ}$ )の入射タイミングの遅延, 縦軸は信号光の透過率変化(相対値)である。信号光と制御光のタイミングが合うと、透過率は約13倍になる。ゲート半値幅は $0.24\text{ps}$ であった。フィッティングにより求めた吸収回復時定数は $0.11\text{ps}$ であり、GaN系ISBT光スイッチの超高速動作が実証された。

多層中間層を用いて試作した別の光スイッチモジュール



について、0.67 ps 間隔の4連光信号パルスに対する応答を評価した。図7の上から、信号光のビットパターンが1010, 0101, 1111の場合を示す。転位による吸収が10 dB以上ある素子なのでノイズは目だつが、ビット間の干渉がないことから1.5 Tビット/sでも使えることがわかる。



#### 4 今後の課題と展望

高速性とスイッチングパワーはトレードオフの関係にある。GaN系ISBT光スイッチは導波路型の半導体光スイッチでもっとも高速であるが、スイッチングエネルギーの低減が課題である。GaN系電子デバイスでは長さ1 mm当たり数十Wの消費パワーに耐えることが示されている。光ゲート素子など、繰返しレートの低い応用なら、スイッチングエネルギーが100 pJでも使用可能と考えられる。しかし、1 THzの繰返しレートでは消費パワーが100 Wになってしまい、まともな動作は期待できない。オン時の挿入損失の低減も必要である。

転位による吸収を更に減らし、量子井戸の構造を最適化すれば、スイッチングエネルギーは10 pJ程度まで低減できるものと予測されている。更に、導波路寸法をサブミクロンまで縮小し、入射端にスポットサイズ変換器を設けて結合効率を改善すれば、1 pJを切ることも可能である。将来は、GaN/Al(Ga)N結合量子井戸(電子がトンネルできる程度に薄い障壁層を介して複数の量子井戸を結合させた構造)を利用したサブバンド間増幅器も実現できると考えられる。サブバンド間増幅器の利得飽和を利用すると、スイッチングエネルギーを更に1けた低減できるものと予測されている<sup>(3)</sup>。

最近、フォトリック結晶やフォトリックワイヤ(光細線)を用

いたサブミクロンサイズの微細光導波路技術の開発が進んでいる。閉じ込めの強い光導波路なので、半径数 $\mu\text{m}$ の急角度の曲がりでも放射損失が小さく、高密度の光集積回路が実現できるものと期待されている。このような微細光導波路を用いてISBT光スイッチやサブバンド間増幅器を集積化することで、光ゲートスイッチのみならず、波長変換素子、 $2 \times 2$ 光スイッチなどの様々な超高速光制御素子を実現することが可能になるものと期待される。

#### 5 あとがき

GaN系ISBT光スイッチでオン/オフ比13, ゲート半値幅0.24 psの超高速動作を実現し、1.5 Tビット/sでもパターン依存性のないスイッチング動作が可能であることを示した。このような超高速光スイッチへのニーズが本格化するまでに、低スイッチングエネルギー化、低損失化、高機能化を進めていきたい。

なお、この研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO技術開発機構)から研究を委託されたフェムト秒テクノロジー研究機構(FESTA)の研究の一環として行われたものである。

#### 文献

- (1) 石川 浩, ほか. サブバンド間遷移を用いた超高速全光スイッチ. オプトロニクス. **21**, 4, 2002, p.145 - 150.
- (2) 飯塚紀夫, ほか. GaN系サブバンド間遷移を用いた超高速光制御デバイス. 東芝レビュー. **57**, 11, 2002, p.35 - 38.
- (3) Suzuki, N., et al. "Nitride intersubband photonic devices for ultrafast optical fiber communications". Proceedings 5. 30th European Conference on Optical Communication. Stockholm, Sweden, 2004-09, p. 46 - 49.



鈴木 信夫 SUZUKI Nobuo, D.Eng.

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー研究主幹, 工博. 光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会会員。

Advanced Electron Devices Lab.



飯塚 紀夫 IIZUKA Norio

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー研究主務. 光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会会員。

Advanced Electron Devices Lab.



金子 桂 KANEKO Kei

研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー. 光デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。Frontier Research Lab.