

# サブバンド間遷移による全光スイッチ

鈴木 信夫\*・石川 浩\*\*・秋本 良一\*\*

## All-Optical Switches Based on Intersubband Transitions

Nobuo SUZUKI\*, Hiroshi ISHIKAWA\*\* and Ryoichi AKIMOTO\*\*

Recent progress of ultrafast near-infrared optical switches utilizing the intersubband transitions (ISBT) in InGaAs/AlAsSb, GaN/AlN, and CdS/ZnSe/BeTe quantum wells (QW) is reviewed. In an InGaAs ISBT switch, 5-dB switching with a recovery time of 690 fs was achieved at a 4.3-pJ input. The recovery time of GaN ISBT switches was as short as 110 fs, although switching energy was rather high. In the II-VI ISBT switches, rather small switching energy (10 pJ for a 5-dB switching) was achieved for a short recovery time (~200 fs). For practical applications, however, further reduction in switching energy is required. In addition to the reduction in the background loss and the coupling loss, miniaturization of the waveguides is crucial. The development of ultrafast ISBT switches with low switching energy is expected to spur progress of the optical signal processing technology.

**Key words:** photonic network, optical switch, ultrashort optical pulse, intersubband transition, saturable absorber

増加の一途をたどるデジタルデータを効率的に処理するためには、光ファイバーを伝送される信号のデータレートを上げて、信号の処理単位を大きくしていく必要がある。現在 40 Gb/s の実用化が始まっているが、100 Gb/s 以上では電気的な処理が追いつかないため、光時分割多重 (OTDM) 技術の導入が必須となる。超高速光スイッチはその実現の鍵となるデバイスのひとつである。研究レベルでは光ファイバー中の光非線形性を利用した光スイッチが使われているが、実用性 (サイズ, コスト, 安定性, 集積化, 遅延時間等) の観点から、半導体を用いた超高速光スイッチの実現が望まれる。しかし、現在研究が進められている半導体光増幅器 (SOA) や電界吸収型光変調器 (EAM) を応用した半導体光スイッチの応答速度はキャリア寿命 (>数十 ps) により制限されており、光デマルチプレクサー (DEMUX) のような周期的な動作を別にすれば、動作レートは数十 Gb/s にとどまる。これに対し、半導体量子井戸中のサブバンド間遷移 (intersubband transition,

以下 ISBT と記す) は応答速度が 100 fs~数 ps と高速であり、100 Gb/s 以上で動作する半導体光スイッチへの応用が期待できる<sup>1)</sup>。

本稿では、1995 年 12 月から 2005 年 3 月まで行われた経済産業省/NEDO 技術開発機構の「フェムト秒テクノロジー」プロジェクトの成果を中心に、ISBT 光スイッチの開発状況と今後の課題についてまとめる。

### 1. 近赤外サブバンド間遷移

半導体量子井戸中に形成される、井戸に垂直な方向には離散化されているが、井戸に平行な面内では連続的な電子のエネルギー帯を、「サブバンド」とよぶ。井戸幅を薄くするほど基底サブバンドのエネルギーは高まり、サブバンド間の間隔  $E_{ij}$  も広がる。光ファイバー通信で使われる波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯でサブバンド間の遷移を実現するためには、深くて薄い井戸が必要である。これまでに、InGaAs/AlAs (Sb) 系<sup>2,3)</sup>、GaN/Al(Ga)N 系<sup>4-8)</sup>、および II-VI 族<sup>9)</sup> の量

\*1 (株)東芝研究開発センター先端電子デバイスラボラトリー (〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1) E-mail: nob.suzuki@toshiba.co.jp

\*\*2 独立行政法人産業技術総合研究所超高速光信号処理デバイス研究ラボ (〒305-8568 つくば市梅園1-1-1)

子井戸で波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯のサブバンド間遷移が実現されている。いずれも、分子ビームエピタキシー (MBE) により成長されたものである。それぞれの典型的な井戸構造を図 1 (a), (b), (c) に、サブバンド間吸収により励起された電子の緩和過程を図 1 (d) に示す。

### 1.1 InGaAs/AlAs/AlAsSb 系

InGaAs/Al(Ga)As 系の ISBT は以前から研究されていたが<sup>2,10)</sup>、励起された電子が寿命の長い Al(Ga)As の X 谷に捕獲されると高速の吸収回復が得られないので<sup>11)</sup>、近赤外超高速光スイッチ用量子井戸では障壁層に直接遷移の AlAsSb を用いる。単純な量子井戸では波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯で十分な吸収強度が得られないので、薄い AlAs 障壁層を介して 2 つの井戸のサブバンドを結合させた結合量子井戸 (CQW) 構造が使われている<sup>3)</sup>。結合量子井戸では、基底サブバンドと励起サブバンドがそれぞれ  $E_1$  と  $E_2$ 、 $E_3$  と  $E_4$  に分裂する<sup>2)</sup>。  $E_1$ - $E_4$  間の遷移を使うことにより、十分な強度の 1.55  $\mu\text{m}$  帯の吸収を実現できる。結合量子井戸は、後述のように吸収回復時間の短縮にも有効である。In と Sb の相互拡散による界面の劣化を抑えるためには、井戸層と障壁層の間に薄い AlAs 層を挿入するのが有効である<sup>12)</sup>。

### 1.2 GaN/AlN 系

GaN と AlN の電子親和力の差は 2 eV あるが、GaN と AlN の間には 2.6% の格子不整合があり、歪みにより伝導帯不連続は 1.75 eV 程度に縮小しているものと考えられる。しかし、極性のある  $c$  軸方向に量子井戸を積層した場合、ピエゾ電気効果や自発分極により GaN と AlN で逆向きに数 MV/cm の内部電界が生じ、ポテンシャルの傾斜により実効的に井戸を深くすることができる<sup>13)</sup>。これまでに、最短波長 1.08  $\mu\text{m}$  までの ISBT が報告されている<sup>5)</sup>。

### 1.3 CdS/ZnSe/BeTe 系

ZnSe と BeTe は GaAs にほぼ格子整合する。ZnSe と BeTe の  $\Gamma$  点の伝導帯不連続は 2.3 eV あるが、BeTe は間接遷移であり、1.6  $\mu\text{m}$  の ISBT では励起された電子が BeTe の X 谷に捕獲されてしまい、応答が遅くなる。そこで、井戸層内に CdS 層を設けて井戸を深くし、励起サブバンドが BeTe の X 点より低い位置にくるようにすることで、高速の応答が実現された<sup>14)</sup>。高品質の多層構造を作製するためには、CdS 層と BeTe 層の間に薄い ZnSe 層を入れるとともに、各井戸層の BeTe 障壁層間にも ZnSe 中間層をはさむ。

### 1.4 吸収回復時間

サブバンド間吸収の吸収係数は 2 つのサブバンドの電子

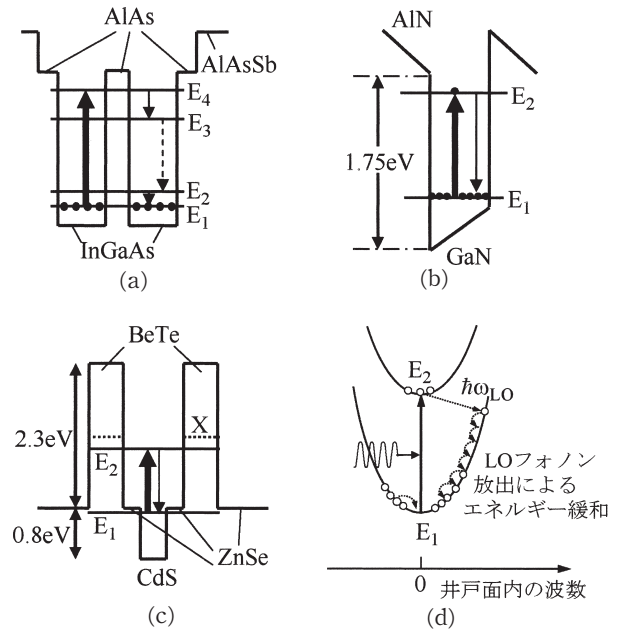


図 1 光通信波長帯のサブバンド間遷移を実現するための典型的な井戸構造と緩和過程。(a) InGaAs/AlAsSb 結合量子井戸、(b) GaN/AlN 量子井戸、(c) CdS/ZnSe/BeTe 量子井戸、(d) サブバンド間緩和過程。

密度の差 ( $N_1 - N_2$ ) に比例するので、強い励起光により  $N_2$  が  $N_1$  に近づくと、吸収の飽和が起こる。励起された電子はエネルギー  $\hbar\omega_{LO}$  の LO フォノンを出して基底サブバンドの波数の大きな状態に緩和し、さらに LO フォノンを何個か放出してサブバンド内をエネルギー緩和し、もとの状態に戻る。電子密度が高い場合はバンド端付近の空いた状態をフェルミ面近傍の電子がすぐに埋めるので、吸収回復時間はほぼサブバンド間緩和時間で決まる。

障壁高さが無限大の矩形量子井戸を仮定すると、励起サブバンドから基底サブバンドへの緩和レートは、

$$W_{21} = \frac{e^2 \hbar \omega_{LO}}{8\pi \epsilon_0 \hbar^2} \left( \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \right) \left( \frac{6m_0 m^*}{E_{21}} \right)^{1/2} \times \left[ \frac{1}{4 - (3\hbar\omega_{LO}/E_{21})} + \frac{1}{12 - (3\hbar\omega_{LO}/E_{21})} \right] \quad (1)$$

で近似できる<sup>15)</sup>。ここで、 $e$  と  $m_0$  は電子の電荷と質量、 $\epsilon_0$  は真空中の誘電率、 $\hbar$  はプランクの定数を  $2\pi$  で除した値、 $m^*$  は電子の有効質量、 $\epsilon_s$  と  $\epsilon_\infty$  は静電的比誘電率と光学的比誘電率、 $E_{21}$  はサブバンド間のエネルギー差である。表 1 に示すように、イオン性の強い GaN や CdS は  $m^*$  や  $\hbar\omega_{LO}$  が大きく、 $\epsilon_s$  と  $\epsilon_\infty$  の差も大きいため、InGaAs 系より 1 桁速く応答する。サブバンド間緩和時間  $\tau_{ISB}$  を図 2 に比較する。  $\nabla$ <sup>16)</sup>,  $\triangle$ <sup>17)</sup>,  $\blacktriangle$ <sup>3)</sup> は InGaAs 系、 $\diamond$ <sup>18)</sup>,  $\circ$ <sup>19)</sup>,  $\bullet$ <sup>20)</sup> は GaN 系、 $\square$ <sup>14)</sup>,  $\blacksquare$ <sup>21)</sup> は CdS 系の実験値である。点線、実線、一点鎖線は、それぞれ InGaAs, GaN, CdS の

表1 サブバンド間緩和時間にかかわる材料定数.

材 料	InGaAs	GaN	CdS
電子の有効質量 $m^*$	0.042	0.2	0.19
静電的比誘電率 $\epsilon_s$	14.1	9.5	10.3
光学的比誘電率 $\epsilon_\infty$	11.6	5.35	5.2
LO フォノンエネルギー $\hbar\omega_{LO}$	36 meV	88 meV	38 meV

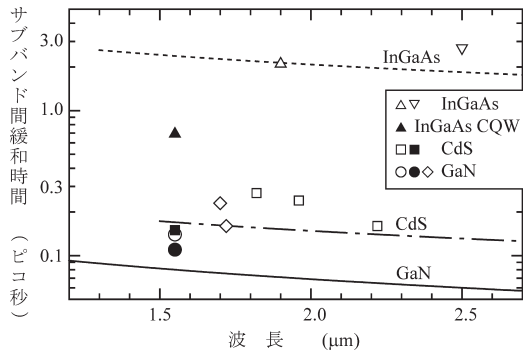


図2 InGaAs, GaN, CdSのサブバンド間緩和時間の比較.

近似式(1)による予測値 ( $1/W_{21}$ ) である. 式(1)は無  
限障壁を仮定しているため, 励起サブバンドが井戸の上端  
付近にくる近赤外域で  $\tau_{SB}$  を小さく見積もる傾向がある.  
InGaAs 系量子井戸の  $\tau_{SB}$  は 2~3 ps あるが, 結合量子井  
戸 (CQW) では  $E_4$  から  $E_3$  への緩和が速いので,  $E_4-E_1$  間  
の吸収回復時間を短縮でき, ▲印のように時定数 690 fs  
の吸収回復が実現された<sup>3)</sup>.

## 2. ISBT 全光スイッチ

ISBT は井戸層に垂直な電界成分のみに生じる現象なの  
で, 光導波路型のデバイスにする必要がある. 材料技術で  
先行する Sb 系で最初に導波路型光スイッチの試作が行わ  
れたが, 最近, GaN 系や II-VI 族でも導波路型光スイッ  
チモジュールの試作が報告されている.

### 2.1 InGaAs/AlAs/AlAsSb 系

図3は, 最初に試作された Sb 系 ISBT 光スイッチの 1  
Tb/s 相当 4 連パルスに対する光 DEMUX の実験結果で  
ある<sup>3)</sup>. 吸収層は, 厚さ 2.3 nm の InGaAs 井戸層 2 層が厚  
さ 0.9 nm の AlAs 中間障壁層を介して結合した結合量子  
井戸層と, 厚さ 8 nm の AlAsSb 障壁層を交互に 80 周期  
積層した構造からなり, リッジ光導波路に加工されてい  
る. 吸収回復時定数は 690 fs で, スwitching エネルギー  
は 80~100 pJ (素子に結合したエネルギーは約 30 pJ)  
であった.

Switching エネルギーが高い原因として, (a) ドー  
ピング時の Sb と In の相互拡散で井戸のポテンシャルがだ  
れてしまうこと, (b) 光の閉じ込めが弱いこと, (c) 二光

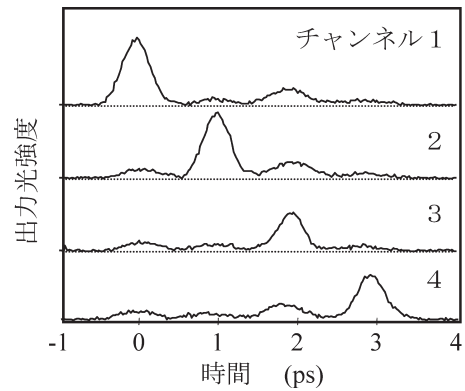


図3 Sb系 ISBT 光スイッチによる 1 Tb/s 相当光 DEMUX.

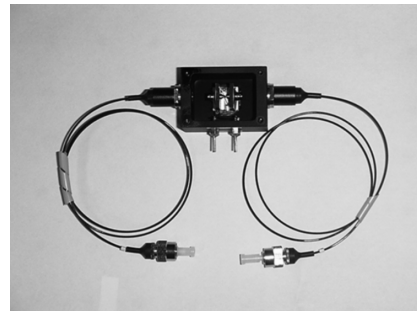


図4 Sb系 ISBT 光スイッチモジュール外観.

子吸収により ISBT による吸収飽和が部分的に相殺され  
てしまうこと, などが考えられ, これらの課題に対する対  
策が進められた. InGaAs 層と AlAsSb 層の間に AlAs 層  
をはさむと Sb と In の相互拡散を防止できるが, AlAs 層  
が厚いと井戸層の平均屈折率が低下して光閉じ込めが悪く  
なるうえ, 格子不整合による結晶欠陥を生じる. 最適化の  
結果, AlAs 層厚を 2 原子層とすることで高品質な量子井  
戸を作製することができた. また, 量子井戸層の平均屈折  
率増大と, 結合量子井戸間の結合 (ミニバンド形成) によ  
るスペクトル広がり防止の兼ね合いから, AlAsSb 障壁層  
厚を 2 nm とした. 導波路構造も, 光閉じ込めの強い幅 1  
 $\mu\text{m}$  のハイメサ構造 (光導波層より十分低い位置まで側面  
をエッチングしたメサ構造) とした<sup>22)</sup>. 二光子吸収に対す  
るサブバンド間吸収の比を高めるため, ドナー密度を高  
めて素子長を 360  $\mu\text{m}$  に短縮した. また, 理論計算から, 二  
光子吸収が制御光パルスに瞬時に応答するのに対し,  
ISBT の飽和は制御光パルスのピークから 0.5~1 ps 遅  
れて最大になることが明らかになった. そこで, 信号光パ  
ルスの入射タイミングを制御光より 900 fs 遅らせた. これ  
らの対策を行った図4の光スイッチモジュールにより, 5  
pJ で 4.3 dB の Switching が実現された (図5)<sup>22)</sup>. 光論  
理演算などへの応用も検討が進められている<sup>23)</sup>.

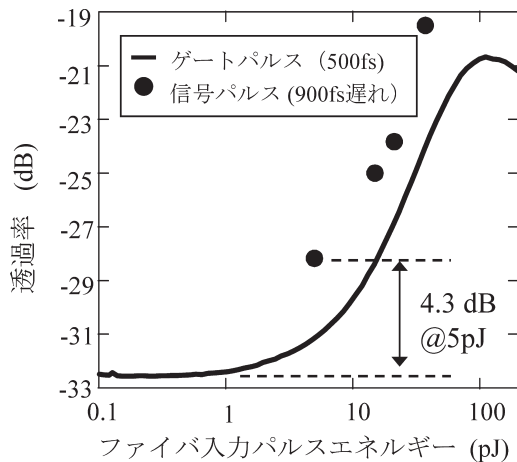


図5 特性改善後のSb系ISBT光スイッチの吸収飽和特性(実線)とスイッチング特性(黒丸)。

## 2.2 GaN/AlN系

サファイア基板上にMBEで窒化物半導体層を成長させると、高密度( $>10^{10} \text{ cm}^{-2}$ )の刃状転位が発生する。この転位は基板に垂直方向に伸びており、電子を捕獲して偏光子として作用するため、ISBTの生じるTMモードに対して大きな損失要因となっていた。そこで、GaN/AlN多層中間層<sup>24)</sup>により転位密度を低減した素子A<sup>25)</sup>を試作し、超高速の光変調を実証した。次いで、MOCVD成長GaN層上にMBEで量子井戸を成長させることでさらに転位を減らした素子Bにより、消光比10 dB以上の超高速光スイッチングを実現した<sup>20)</sup>。

図6(a)は、素子Aの1.5 Tb/s相当の4連光パルスに対する応答である<sup>26)</sup>。制御光は $1.7 \mu\text{m}$ 、信号光波長は $1.55 \mu\text{m}$ である。消光比は低いものの、“0”レベルと“1”レベルはきれいに区別できており、1 Tb/s以上でもパターン効果のない動作が可能であることが実証された。図6(b)は、素子Bのポンププローブ応答である<sup>20)</sup>。転位密度の低減により、150 pJの制御光入力で10 dB以上の消光比が実現されている。素子Aでは光ファイバピッグテール中の波長分散で制御光のパルス幅が広がっていたため、ゲート半値幅が350 fs程度あった。素子Bではピッグテール長を短縮し、ゲート半値幅を240 fs、回復時定数を110 fsに改善した。なお、バンド非放物線性のため、吸収ピークの長波長側でフェルミ面近傍の電子の冷却過程による遅い応答( $\sim \text{ps}$ )が顕著になることが知られている<sup>21,27)</sup>。素子A, Bとも吸収ピーク( $1.7\sim 1.75 \mu\text{m}$ )の短波長側で使用しているが、素子Bでは時定数2~3 psの遅い応答成分も観測され、500 Gb/s以上でパターン効果を生じた。素子Bでは転位発生抑制のため障壁層を薄層化しており、バルクGaN層への励起電子のリークが原因と考えられ

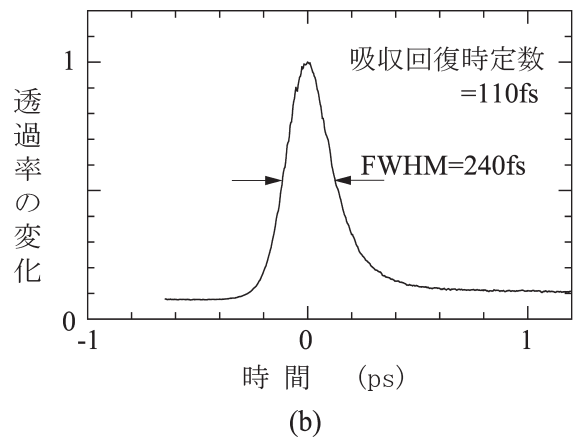
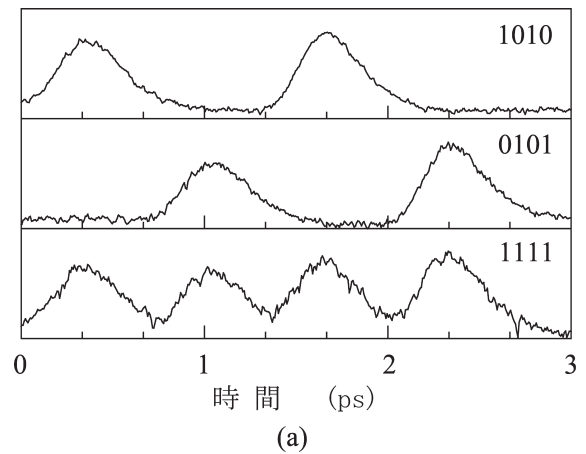


図6 GaN系ISBT光スイッチの超高速動作。(a)素子Aの1.5 Tb/s相当の光変調特性、(b)素子Bの超高速光ゲート特性。

る<sup>28)</sup>。まだ転位による損失が5 dB程度残っており、導波路への光閉じ込めも弱い。これらの点を改善することで、低エネルギーで超高速動作可能な光スイッチが実現できるものと期待される。

## 2.3 CdS/ZnSe/BeTe系

GaAs基板と格子整合するZnMgBeSeをクラッド層に用いることで、高品質の光導波路層を成長させることができる。塩素系ドライエッチングにより、図7のようなハイメサ型光導波路が作製された<sup>21,29)</sup>。エッチング側壁は十分に平滑であり、導波路長が1 mm程度の試料においてはTE偏波に対する伝播損失は測定限界以下( $<0.1 \text{ dB}$ )であった<sup>30)</sup>。ハイメサ構造であることに加え、コア層(多重量子井戸層)とクラッド層の屈折率差を大きくできるため、比較的強い光閉じ込めが得られる。クラッド層を $3 \mu\text{m}$ と厚くしているため、GaAs基板による二光子吸収も抑制される。これらの結果、図8に示すように、10 pJで5.1 dBの消光比が実現された<sup>21)</sup>。Sb系に近いスイッチングエネルギーでGaN系に近い高速性を実現できている。

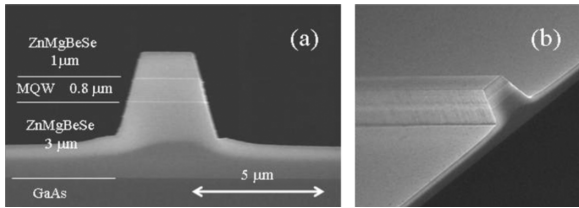


図7 II-VI族ISBTハイメサ光導波路の(a)断面および(b)側壁の走査電子顕微鏡写真。

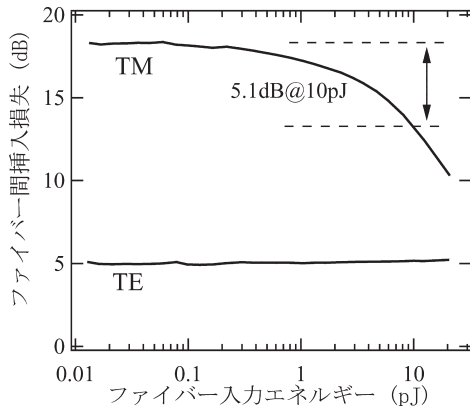


図8 II-VI族ISBT光スイッチの吸収飽和特性。

この測定に用いた光導波路のコア幅は  $4.3 \mu\text{m}$  であるが、 $3 \mu\text{m}$  程度まで狭コア幅化した光導波路においても同様な測定を行った結果、同じ入力パルスエネルギーに対して消光比が  $2\sim 3 \text{ dB}$  増大することが確認された。 $1 \mu\text{m}$  程度まで狭コア幅化することにより、さらなるスイッチングエネルギーの低減が期待できる。

### 3. 今後の課題

ISBT光スイッチの実用化には、高速性を保ったまま、 $1 \text{ pJ}$  で  $10$  数  $\text{dB}$  以上の消光比を実現する必要がある。また、オン時の挿入損失も数  $\text{dB}$  以内に抑える必要がある。最もスイッチングエネルギーの低い  $\text{Sb}$  系でも、まだ  $1$  桁以上の改善が必要である。サブバンド間吸収の飽和光強度  $I_s$  は式(2)で与えられる<sup>31)</sup>。

$$I_s = \frac{nc_0\epsilon_0\hbar^2}{2\mu_{21}^2\tau_{\text{ISB}}\tau_{\text{ph}}} \quad (2)$$

ここで、 $\mu_{21}$  は遷移双極子モーメント、 $\tau_{\text{ph}}$  は位相緩和時間、 $c_0$  は真空中の光速、 $n$  は屈折率である。 $\mu_{21}$  はおおむね井戸幅に比例し、材料依存性は小さい。パルス幅  $t_p$  が  $\tau_{\text{ISB}}$  に比べて十分に長い場合は、飽和パルスエネルギーは  $I_s$  と  $t_p$  と面積  $A$  の積で与えられるので、 $t_p$  を狭めればスイッチングエネルギーを低減できる。しかし、 $t_p$  が  $\tau_{\text{ph}}$  より短くなると光パルスのパワースペクトルと吸収スペクトルのオーバーラップが悪くなり、スイッチングエネルギー

は急増する。スイッチングエネルギーは  $t_p \sim \tau_{\text{ISB}}$  で最小になり、その値は  $A/\tau_{\text{ph}}$  に比例する。一般にサブバンド間緩和時間  $\tau_{\text{ISB}}$  が短い材料は  $\tau_{\text{ph}}$  も短いので、応答時間とスイッチングエネルギーは反比例することになる。ISBT以外の損失要因抑制とともに、導波路断面積の微細化がスイッチングエネルギー低減の鍵となる。理論上は、 $\text{GaN}$  系でも過剰導波損を抑制できれば、光細線導波路(断面： $0.8 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ )で  $1 \text{ pJ}$  以下のスイッチングが可能との計算結果が得られている<sup>32)</sup>。いずれの材料系についても、平滑で垂直な側面をもつ低損失の微細光導波路の開発、入出力用モードサイズ変換器の集積化などの研究を進めていく必要がある。

偏波依存性はISBTの本質的な課題である。量子細線や量子ドットによる偏波無依存化の可能性がないわけではないが、細線やドットの横方向の幅を厚さと同程度( $\sim 2 \text{ nm}$ )にする必要があり、現実には困難である。当面は、偏波依存性があることを前提とした使い方を考えていく必要がある。OTDMの実用化には安定な同期も欠かせない。微細光集積回路にパルス光源も集積化できれば、偏波を固定でき、ローカルに同期をとることも可能になる。これらの課題が解決できれば、光ラベル(ヘッダー)処理用光スイッチ、 $100 \text{ Gb/s}$  以上の光3R中継器用光変調素子などへの応用が進むものと期待される。

$\text{InGaAs/AlAsSb}$  系、 $\text{GaN}$  系、II-VI族、いずれにおいても、サブバンド間遷移光スイッチの超高速動作が実証された。実用化にはスイッチングエネルギーや挿入損失を大幅に低減する必要があり、今後、ナノフォトニクス技術との融合を推進していく必要がある。小型・低消費電力で安定な半導体超高速光スイッチが開発できれば、光信号処理技術に大きな変革をもたらされるものと期待される。

本研究の一部は、NEDO技術開発機構から委託を受け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) S. Noda: "Ultrafast interband-resonant light modulation by intersubband-resonant light in quantum wells," *Femtosecond Technology: From Basic Research to Application Prospects*, eds. T. Kamiya, F. Saito, O. Wada and H. Yajima (Springer, Berlin, 1999) pp. 222-233.
- 2) B. Sung, H. C. Chui, M. M. Fejer and J. S. Harris, Jr.: "Near-infrared wavelength intersubband transitions in high indium content  $\text{InGaAs/AlAs}$  quantum wells grown on  $\text{GaAs}$ ," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 818-820.
- 3) T. Akiyama, N. Georgiev, T. Mozume, H. Yoshida, A. V. Gopal and O. Wada: "Nonlinearity and recovery time of

- 1.55  $\mu\text{m}$  intersubband absorption in InGaAs/AlAs/AlAsSb coupled quantum wells,” *Electron. Lett.*, **37** (2001) 129–130.
- 4) C. Gmachl, H. M. Ng, S.-N. G. Chu and A. Y. Cho: “Intersubband absorption at  $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$  in well- and modulation-doped GaN/AlGaN multiple quantum wells with superlattice barriers,” *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 3722–3724.
  - 5) K. Kishino, A. Kikuchi, H. Kanazawa and T. Tachibana: “Intersubband transition in  $(\text{GaN})_m/(\text{AlN})_n$  superlattices in the wavelength range from 1.08 to 1.61  $\mu\text{m}$ ,” *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 1234–1236.
  - 6) N. Iizuka, K. Kaneko and N. Suzuki: “Near-infrared intersubband absorption in GaN/AlN quantum wells grown by molecular beam epitaxy,” *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 1803–1805.
  - 7) D. Hofstetter, S.-S. Schad, H. Wu, W. J. Schaff and L. F. Eastman: “GaN/AlN-based quantum-well infrared photodetector for 1.55  $\mu\text{m}$ ,” *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 572–574.
  - 8) A. Helman, M. Tchernycheva, A. Lusson, E. Warde, F. H. Julien, Kh. Moumanis, G. Fishman, E. Monroy, B. Daudin, Le Si Dang, E. Bellet-Amalric and D. Jalabert: “Intersubband spectroscopy of doped and undoped GaN/AlN quantum wells grown by molecular-beam epitaxy,” *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 5196–5198.
  - 9) R. Akimoto, Y. Kinpara, K. Akita, F. Sasaki and S. Kobayashi: “Short-wavelength intersubband transitions down to 1.6  $\mu\text{m}$  in ZnSe/BeTe type-II superlattices,” *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 580–582.
  - 10) T. Asano, S. Noda, T. Abe and A. Sasaki: “Near-infrared intersubband transitions in InGaAs/AlAs quantum wells on GaAs substrate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 1285–1291.
  - 11) T. Asano, S. Yoshizawa and S. Noda: “Carrier relaxation dynamics in an ultrafast all-optical modulator using an intersubband transition,” *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 4509–4511.
  - 12) J. Kasai, T. Mozume, H. Yoshida, T. Shimoyama, A. V. Gopal and H. Ishikawa: “Optical quality improvement of InGaAs/AlAs/AlAsSb coupled double quantum wells grown by molecular beam epitaxy,” *Phys. Stat. Sol. (c)*, **1** (2004) 368–371.
  - 13) N. Suzuki, N. Iizuka and K. Kaneko: “Calculation of near-infrared intersubband absorption spectra in GaN/AlN quantum wells,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 132–139.
  - 14) R. Akimoto, K. Akita, F. Sasaki and T. Hasama: “Sub-picosecond electron relaxation of near-infrared intersubband transitions in  $n$ -doped  $(\text{CdS}/\text{ZnSe})/\text{BeTe}$  quantum wells,” *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 2998–3000.
  - 15) B. K. Ridley: “Electron-phonon interactions in 2D systems,” *Hot Carriers in Semiconductor Nanostructures: Physics and Applications*, ed. J. Shah (Academic Press, Boston, 1992) pp. 17–51.
  - 16) T. Asano, S. Noda and K. Tomoda: “Pump and probe measurement of intersubband relaxation time in short-wavelength intersubband transition,” *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 1418–1420.
  - 17) A. V. Gopal, H. Yoshida, A. Neogi, N. Georgiev, T. Mozume, T. Shimoyama, O. Wada and H. Ishikawa: “Intersubband absorption saturation in InGaAs-AlAsSb quantum wells,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **38** (2002) 1515–1520.
  - 18) J. D. Heber, C. Gmachl, H. M. Ng and A. Y. Cho: “Comparative study of ultrafast intersubband electron scattering times at  $\sim 1.55 \mu\text{m}$  wavelength in GaN/AlGaN heterostructures,” *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 1237–1239.
  - 19) J. Hamazaki, S. Matsui, H. Kunugita, K. Ema, H. Kanazawa, T. Tachibana, A. Kikuchi and K. Kishino: “Ultrafast intersubband relaxation and nonlinear susceptibility at 1.55  $\mu\text{m}$  in GaN/AlN multiple-quantum wells,” *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1102–1104.
  - 20) N. Iizuka, K. Kaneko and N. Suzuki: “Sub-picosecond all-optical gate utilizing GaN intersubband transition,” *Opt. Express*, **13** (2005) 3835–3840 (<http://www.opticsexpress.org>).
  - 21) 秋本良一: “II-VI 族半導体量子井戸のサブバンド間遷移を利用した超高速光スイッチ”, *オプトロニクス*, **24**, No. 6 (2005) 155–159.
  - 22) 石川 浩: “次世代フォトニックネットワーク用超高速光スイッチ”, *オプトロニクス*, **24**, No. 6 (2005) 120–124.
  - 23) M. Naruse, T. Miyazaki, F. Kubota, H. Yoshida and H. Ishikawa: “Ultrafast all-optical NOR gate based on intersubband and interband modulation operating at communication wavelengths,” *Opt. Fiber Commun. Conf. 2005*, Vol. 5 (OSA, 2005) pp. 89–91.
  - 24) A. Kikuchi, T. Yamada, S. Nakamura, K. Kusakabe, D. Sugihara and K. Kishino: “Improvement of crystal quality of RF-plasma-assisted molecular beam epitaxy grown Ga-polarity GaN by high-temperature grown AlN multiple intermediate layers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L330–L333.
  - 25) N. Iizuka, K. Kaneko and N. Suzuki: “Sub-picosecond modulation by intersubband transition in ridge waveguide with GaN/AlN quantum wells,” *Electron. Lett.*, **40** (2004) 962–963.
  - 26) N. Iizuka, K. Kaneko and N. Suzuki: “Ultrafast all-optical modulation by GaN intersubband transition in a ridge waveguide,” *LEOS 2004 Annual Meeting* (IEEE, 2004) pp. 665–666.
  - 27) J. Hamazaki, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi and K. Kishino: “Intersubband relaxation dynamics in GaN/AlN multiple quantum wells studied by two-color pump-probe experiments,” *Phys. Rev. B*, **71** (2005) 165334.
  - 28) N. Iizuka, K. Kaneko and N. Suzuki: “Time-resolved characterization of all-optical switch utilizing GaN intersubband transition,” *Int. Quantum Electronics Conf. 2005 and the Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics 2005* (Tokyo, 2005) pp. 1279–1280.
  - 29) R. Akimoto, B. S. Li, K. Akita and T. Hasama: “Ultrafast all-optical switching devices based on intersubband transitions in II-VI quantum wells,” *Proceedings, 30th European Conf. on Optical Commun.*, Vol. 4 (KPRC, Stockholm, 2004) pp. 912–915.
  - 30) K. Akita, R. Akimoto, B. S. Li, T. Hasama, T. Iida and Y. Takanashi: “Fabrication and characterization of waveguide for all optical switching device based on intersubband transition in II-VI based quantum well,” *Int. Quantum Electronics Conf. 2005 and the Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics 2005* (Tokyo, 2005) pp. 1277–1278.
  - 31) K. L. Vodopyanov, V. Chazapis, C. C. Phillips, B. Sung and J. S. Harris, Jr.: “Intersubband absorption saturation study of narrow III-V multiple quantum wells in the  $\lambda = 2.8\text{--}9 \mu\text{m}$  spectral range,” *Semicond. Sci. Technol.*, **12** (1997) 708–714.
  - 32) N. Suzuki, N. Iizuka and K. Kaneko: “Simulation of ultrafast GaN/AlN intersubband optical switches,” *IEICE Trans. Electron.*, **E88-C** (2005) 342–348.

(2005年8月10日受理)