

GaN系サブバンド間遷移を用いた超高速光制御デバイス

Ultrafast Optical Switching Devices Utilizing Intersubband Transition in GaN Quantum Wells

飯塚 紀夫 金子 桂 鈴木 信夫

IIZUKA Norio

KANEKO Kei

SUZUKI Nobuo

毎秒テラビット(Tb/s, T: 10^{12})を超える超高速大容量光通信ネットワークへの応用を目的に,窒化物半導体量子井戸中のサブバンド間遷移(ISBT)を利用した光制御デバイスの研究開発を行っている。これまでに光通信波長でのISBTを実現し,サブピコ秒(ps, p: 10^{-12})の光応答を実証した。更に,導波構造において,世界に先駆けてISBTを観測することができた。実験で得られたパラメータに基づいて導波構造でのシミュレーションを行い,1 Tb/sの速度での動作が,1 W以下の平均消費パワーで可能であることを示した。これらの結果から,デバイスの実現可能性が実証できた。

Optical switches are being developed utilizing the intersubband transition (ISBT) in nitride semiconductor quantum wells, for application to future ultrafast network systems. So far, the ISBT has been achieved at optical communication wavelengths and optical responses within a picosecond have been demonstrated. Moreover, the ISBT has been observed for a waveguide structure.

Simulations were carried out utilizing the parameters obtained from the experiments. The results suggest that operation at 1 Tb/s could be achieved with a power consumption of less than 1 W. These results confirm the possibility of realizing optical switching devices.

1 まえがき

インターネットの普及と今後予想される発展に伴い,光通信ネットワークの高速大容量化が必須なものになっている。(財)光産業技術振興協会が策定した光情報通信ロードマップ¹⁾によれば,2010年ころには幹線系では40 Tb/sレベルの容量が必要となると予想されている。これを実現するには,現在の主流技術であるDWDM(高密度波長分割多重)を推進していくことに加えて,波長チャンネル当たりの伝送容量を数100 Gb/s以上にまで引き上げることが必要になると考えられる。

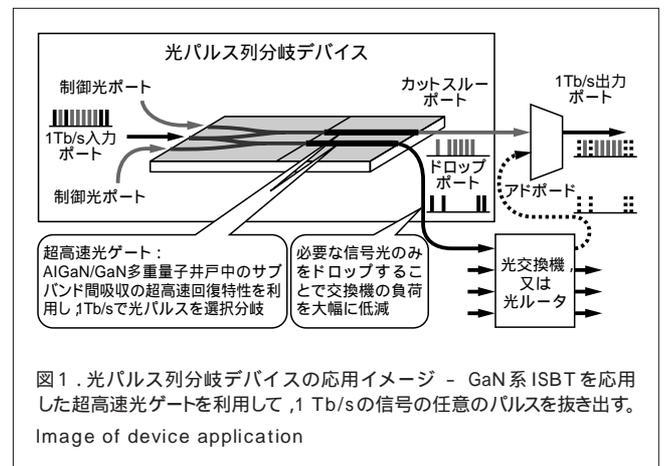
このような高速の信号処理では,現在用いられている,光信号を電気信号に変換してから処理を行い再び光信号に変換して伝送するという,いわゆる“O-E-O(Optical-Electrical-Optical)”方式では対応困難で,“全光処理”が必要になる。これを実現するキーデバイスの一つが全光ゲートスイッチである。当社では,このようなゲートスイッチの動作原理として,超高速の光応答特性を持つ,窒化物半導体量子井戸中のISBTという現象を応用することを世界に先駆けて提案した²⁾。現在,この現象について他の研究機関の注目も集まっているなかで³⁾⁴⁾,当社では,デバイスの早期実現を最優先課題として研究開発を行っている。

ここでは,この全光スイッチの応用イメージと動作原理について述べた後,作製した量子井戸のISBT特性を報告し,

光通信波長に対応可能なこと,及び超高速光応答が可能なことを示す。続いて実際の素子構造に近い,リッジ型導波路でのISBTを実験的に確認できたことを報告する。更に,光ゲートスイッチに応用した場合の,計算シミュレーションによる動作特性予測について述べ,ISBTを応用した超高速光制御素子の実現可能性を示す。

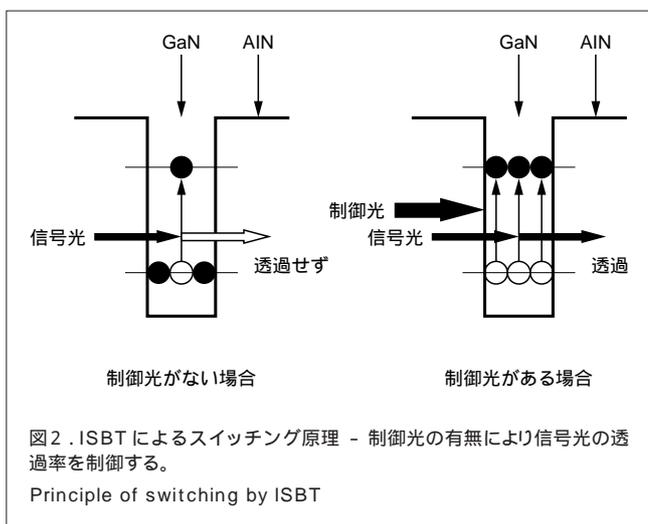
2 応用イメージと動作原理

スイッチングは,信号光を別の光(制御光)で制御することで行われる。応用イメージを図1に示す。信号光の任意の



パルス成分を二つの出力ポートのどちらかに振り分けて取り出す“光パルス列分岐デバイス”のイメージ図である。制御光1のパルス列に対応する信号光のパルス列がドロップポートから取り出される。図中、超高速光ゲートの部分に高速応答性に優れた窒化物半導体のISBTを応用する。

図2はこのISBTによるスイッチング原理の説明図である。半導体量子井戸中にはサブバンドとよぶ量子化されたエネルギー準位が存在する。ここで規定準位である第1サブバンドと励起準位である第2サブバンドとのエネルギー差が、信号光や制御光の波長に対応するように設計されている。ここに信号光を入射すると第1準位の電子が励起され、信号光は吸収される。しかし、ここに強い強度を持った別の光(制御光)が入射されて、十分な量の電子が励起されていれば、信号光は吸収されずに透過できる。このように制御光の有無で信号光の透過率(吸収率)を制御できる。



超高速応答を実現するためには、励起された電子が再び基底準位に戻り、光吸収が可能になるまでの時間(吸収回復時間)が短いことが必要である。窒素ガリウム(GaN)量子井戸とヒ化インジウムガリウム(InGaAs)量子井戸について、吸収回復時間を見積もった計算結果を図3に示す⁽⁵⁾。GaNの吸収回復時間は、光通信で用いられている波長(1.55 μm)においてもpsを切っており、InGaAsの場合に比べて約1けた短い値となっている。これは電子の有効質量や光学フォノンエネルギーなどの材料パラメータの違いに起因するものである。この短い吸収回復時間がGaN系ISBTの最大の特長であり、psを切る回復時間は1 Tb/sの信号に対応できることを示唆するものである。

このように優れた特長を持つGaN系ISBTであるが、井戸層と障壁層との格子定数差が大きいことなどから、結晶品質の良い量子井戸や導波デバイス構造の作製が困難であると

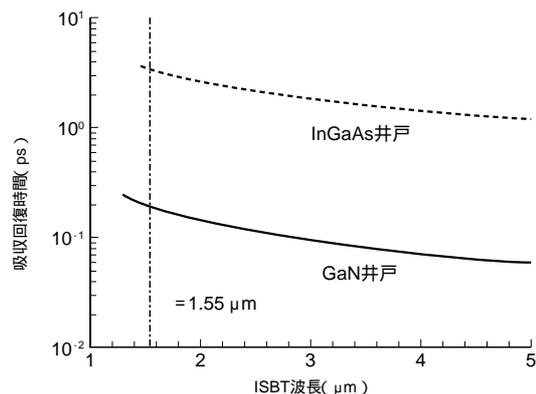


図3 . GaN量子井戸とInGaAs量子井戸との吸収回復時間の比較 - GaN井戸(実線)の場合のほうが1けた程度、吸収回復時間が短く、光通信波長でもサブpsの応答が可能である。
Comparison of absorption recovery times of GaN and InGaAs quantum wells

いう技術課題がある。当社では、結晶成長条件やデバイス作製条件を高精度に最適化し、この課題を克服している。

3 量子井戸の作製とISBT特性

試料はc面サファイアを基板とし、有機金属気相成長法(MOCVD)や分子線エピタキシー(MBE)を用いたエピタキシャル成長法により作製した。井戸層は厚さが1.3 ~ 4.5 nmのGaNで、電子を供給するためにSiを $0.5 \sim 8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の濃度でドーピングした。障壁層は窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)又は窒化アルミニウム(AIN)とした。この量子井戸構造を30 ~ 200周期積層した。

これらの試料の透過スペクトルの例を図4に示す⁽⁶⁾。なお、測定に際しては、ISBTが可能な、井戸層に垂直な電界成分

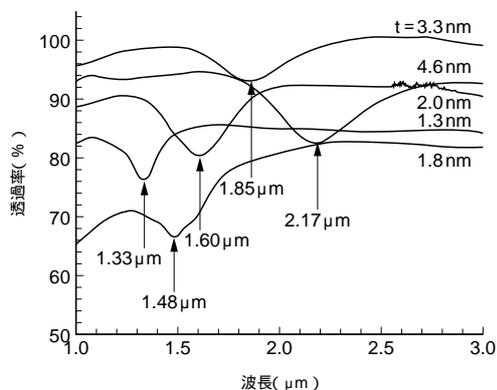


図4 . ISBT スペクトルの例 - 井戸層の厚さ(t)を変えるなどして任意の波長のISBTが実現できる。
Examples of ISBT spectra

を持つ偏波を、プリュースター角で入射した。図から井戸層厚や障壁の構造を変えることで、光通信で用いられる1.3 ~ 1.6 μmの波長帯を含む近赤外領域の波長でのISBTが実現できることがわかる。このように材料系を変えることなく構造パラメータを変えるだけで対応波長が選択できることもISBTの特長である。波長1.33 μmと1.48 μmのスペクトル形状についての解析から、作製した試料には±1原子層分の厚さ変動があることがわかっている。スペクトルから吸収係数の大きさを計算すると、波長1.33 μmの場合でも25,000 cm⁻¹あり、デバイス化に十分な大きさを持つことがわかった。

次に高速応答特性について述べる。図5は、波長4.6 μmにISBT吸収のピークを持つ試料の吸収回復特性を表す図である⁷⁾。波長4.5 μm、パルス幅130フェムト秒(fs, f: 10⁻¹⁵)、繰り返し1 kHzの、井戸層に垂直な電界成分を持つ偏波のパルスレーザーをプリュースター角で入射し、ポンプ・プローブ法で測定を行った。図は、プローブ光の吸収変化を、プローブ光のポンプ光に対する遅延時間の関数としてプロットしたものである。0.5 ps以内で吸収はほぼ回復しており、この試料の高速応答性がわかる。挿入図はこれを対数プロットしたもので、これから吸収回復時間(吸収変化が1/e:自然対数の底)になるまでの時間を求めると150 fsとなった。これによって、GaN量子井戸中のISBTは、当初の予測どおり非常に高速な現象であることが実証された。

次に、消費パワーの目安を与える吸収飽和強度の測定結果について述べる。波長1.48 μmにISBT吸収ピークを持つ試料について、その吸収係数の変化を入力パルス光(波長

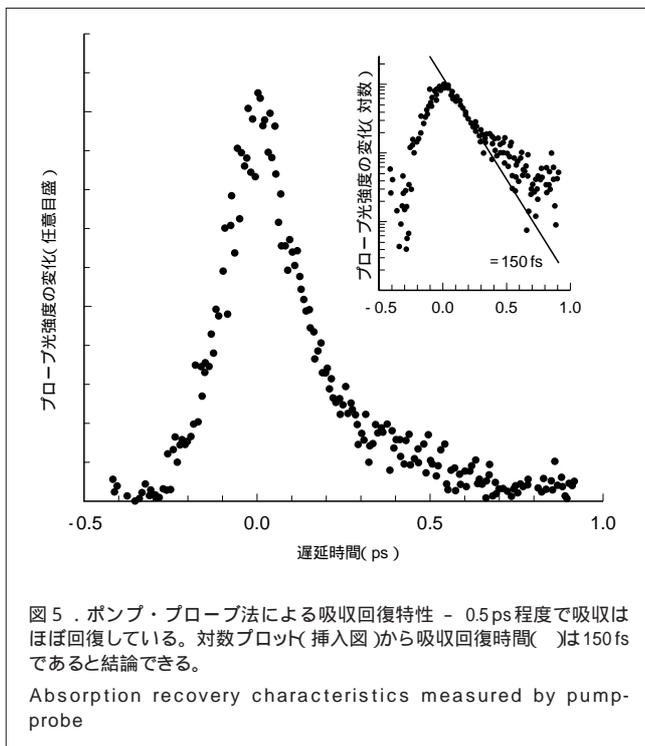


図5 . ポンプ・プローブ法による吸収回復特性 - 0.5 ps程度で吸収はほぼ回復している。対数プロット(挿入図)から吸収回復時間(τ)は150 fsであると結論できる。

Absorption recovery characteristics measured by pump-probe

1.48 μm、パルス幅130 fs、繰り返し1 kHz)エネルギー密度の関数としてプロットしたものを図6に示す。入力エネルギーが増大するにつれ吸収が減少しており、吸収飽和の傾向が明瞭に見えている。

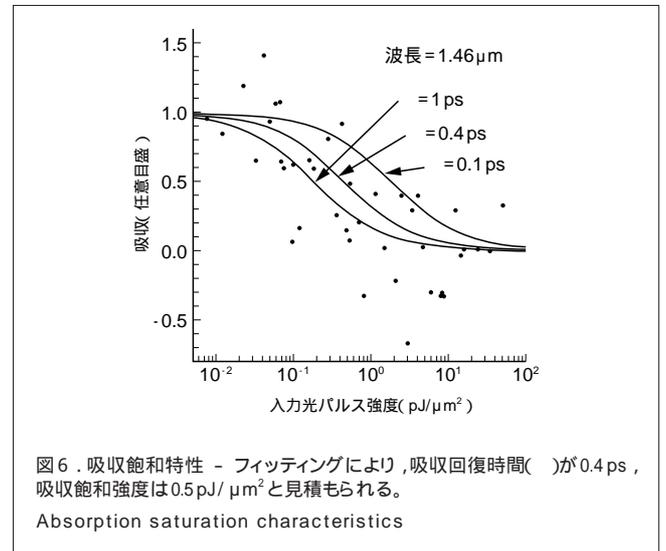


図6 . 吸収飽和特性 - フィッティングにより、吸収回復時間(τ)が0.4 ps、吸収飽和強度は0.5 pJ/μm²と見積もられる。
Absorption saturation characteristics

このデータを基に、理論式によるフィッティングを行い、吸収回復時間と吸収飽和強度(吸収が1/2になる入力パワー)を見積もった。吸収回復時間が0.1, 0.4, 1 psの場合についての計算結果を図中に実線で示してある。回復時間を0.4 psと仮定した場合に、実験結果ともっとも良い一致が得られた。このことから光通信波長帯においてもサブpsの応答特性を持つことが確認できた。また、計算結果から、吸収飽和強度を求めると、0.5 pJ/μm²となった。典型的な単一モード光導波路の断面積はμm²のオーダーなので、1 Tb/sの信号に対してデバイスの平均消費パワーはワットのオーダーになると推定できる。

4 導波構造での特性

続いて、実際に導波構造を作製し、ISBTの観測を試みた。試料は波長1.6 μmに吸収ピークを持つ、30周期から成る量子井戸構造をGaNガイド層及びAlNクラッド層で挟んだ、幅4 μmのリッジ導波路である。この導波路の一端に先球ファイバを用いて光パルスを入力した。まず、井戸に平行な電界成分を持つ偏波(ISBTが起こりえない偏波)に対して他端から赤外カメラで観察し、光導波を確認した。次に出力光パワーの偏波依存性を調べたところ、井戸に垂直な偏波と平行な偏波との比が14.5 dBと、明白な偏波依存性が見られた。このことから、導波構造においてもISBTが観測できたと結論できる。導波構造でのGaN系ISBTの観測は当社以外にはまだ報告例はない。

以上に紹介した実験データなどを基に、光ゲートスイッチの動作特性をシミュレーションにより予測した。デバイスの層構造は、井戸層へのドーピングが $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で10周期から成る量子井戸が、GaN ガイド層及び AlN クラッド層に挟まれたものを仮定した。導波路形状はリッジ型で、長さ(L)が 300, 500, 750 μm の3通りについて計算を行った。入力パルスは波長 1.55 μm 、幅 250 fs のガウス型パルスとし、GaN 井戸層への光閉じ込め係数などの基本導波モードに関するパラメータは有限要素法により求めた。また、パルスの伝播(でんぱ)特性は一次元時間領域有限差分(FDTD)法により解析した⁸⁾。

図7に、制御光がある場合とない場合との信号光の消光比を実線で、伝播損失を破線で示した。この結果から、消光比 10 dB 以上かつ伝播損失 10 dB 以下の特性が、1 pJ 程度の入力パルスエネルギーで実現できることがわかる。1 Tb/s の信号に換算すると入力パワーは 1 W となる。試料作製技術を向上し層厚の変動を抑制すること、デバイス構造の最適化により量子井戸への光閉じ込めを向上することなどの対策により、この入力パワーは更に低減できると考えている。

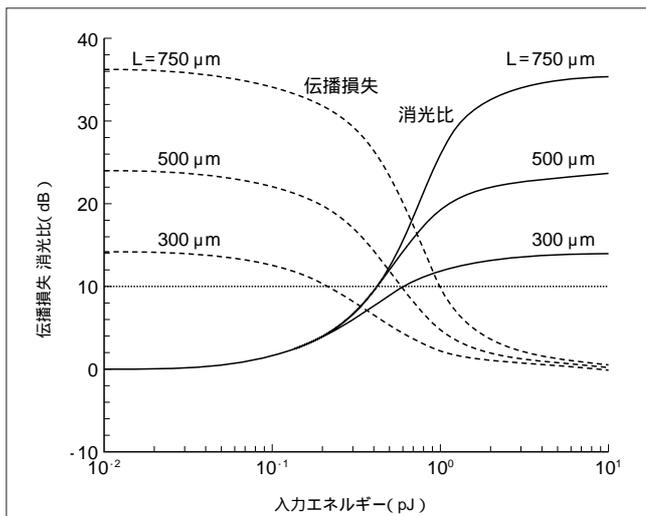


図7. 光ゲートスイッチの動作シミュレーション結果 - 1 pJ の入力エネルギーで 10 dB 以上の消光比(実線)と 10 dB 以下の伝播損失(破線)が両立できることがわかる。

Results of gate switch operation simulations

5 あとがき

GaN 量子井戸中の ISBT について、その特性とデバイス応用可能性について報告した。光通信波長帯での ISBT が実現でき、サブ ps の光応答特性を実証した。また、リッジ導波

構造を作製し ISBT の観測を行った。更に、光ゲートスイッチの動作特性をシミュレーションし、1 Tb/s の信号に対し 1 W 程度のパワーで動作可能であることを示した。これらの結果から、GaN 量子井戸中の ISBT を応用した、超高速光制御素子の実現が可能であると結論できる。

謝 辞

図5に示したポンプ・プローブ実験に際しご協力をいただいた、京都大学工学部の野田進教授、浅野卓博士に謝意を表します。また、この研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から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ったものである。

文 献

- (1) (財)光産業技術振興協会編. 光テクノロジーロードマップ報告書 - 情報通信分野 - (2002年改定版). 2002.
- (2) Suzuki, N.; Iizuka, N. Feasibility on ultrafast nonlinear optical properties of 1.55- μm intersubband transition in AlGaIn/GaN quantum wells. Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, 36, 8A, 1997, p. L1006 - L1008.
- (3) Gmachl, C. et al. Intersubband absorption at $\sim 1.55 \mu\text{m}$ in well- and modulation-doped GaN/AlGaIn multiple quantum wells with superlattice barriers. Appl. Phys. Lett. 77, 23, 2000, p.3722 - 3724.
- (4) Kishino, K.; Kikuchi, A. "AlGaIn/GaN heterojunction devices grown by improved RF-plasma molecular beam epitaxy". 2001 MRS fall meeting. Boston, MA, 2001, p.169.
- (5) Suzuki, N.; Iizuka, N. AlGaIn/GaN intersubband transitions for Tb/s 1.55- μm optical switches. Proc. SPIE. 3283, 1998, p.614 - 621.
- (6) 飯塚紀夫,ほか. GaN/AlN量子井戸の作製とサブバンド間遷移の光応答特性. 電子情報通信学会技術研究報告. 102, 119, 2002, p.21 - 24.
- (7) Iizuka, N. et al. Ultrafast intersubband relaxation ($\leq 150 \text{ fs}$) in AlGaIn/GaN multiple quantum wells. Appl. Phys. Lett. 77, 5, 2000, p.648 - 650.
- (8) Suzuki, N., et al. FDTD simulation of femtosecond optical gating in nonlinear optical waveguide utilizing intersubband transition in AlGaIn/GaN quantum wells. IEICE Trans. Electron. E83-C, 6, 2000, p.981 - 988.



飯塚 紀夫 IIZUKA Norio

研究開発センター 個別半導体基盤技術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。日本物理学会、応用物理学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



金子 桂 KANEKO Kei

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー。光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



鈴木 信夫 SUZUKI Nobuo, D. Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術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 Discrete Semiconductor Technology Lab.