

窒化物半導体量子ナノ構造と光細線導波路を利用した低エネルギー動作 超高速光デバイスの研究開発 (061403007)

Optical device with ultra-high speed and low operation energy utilizing nitride semiconductor
nano quantum structure and optical micro-waveguide

研究代表者

飯塚紀夫 株式会社東芝 研究開発センター

Norio Iizuka Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

研究分担者

吉田春彦[†] 真名垣暢人[†] 中野義昭^{††} 清水大雅^{††} 種村拓夫^{††} 肥後昭男^{††} 杉山正和^{†††}

Haruhiko Yoshida[†] Nobuto Managaki[†] Yoshiaki Nakano^{††} Hiromasa Shimizu^{††}

Takuo Tanemura^{††} Akio Higo^{††} Masakazu Sugiyama^{†††}

[†]東芝 研究開発センター ^{††}東京大学 先端科学技術研究センター ^{†††}東京大学 工学系研究科

[†]Corporate Research & Development Center, Toshiba ^{††}Research Center for Advanced Science and Technology, The university of Tokyo ^{†††}School of Engineering, The university of Tokyo

研究期間 平成 18 年度～平成 20 年度

概要

窒化物半導体量子構造中のサブバンド間遷移(ISBT)を利用した超高速光スイッチの動作エネルギー低減を目標として研究を行った。結晶欠陥に起因する伝播損失を低減するために SiN をクラッドとする新規構造を開発するとともに、導波路を細線化することで問題となってくる結合損失を低減するためのスポットサイズ変換構造の検討を行った。また、窒化物半導体量子井戸層を結晶性に優れる有機金属気相成長(MOVPE)法で作製するための研究も行った。これらの取り組みにより、動作エネルギーを 10 pJ 程度にまで低減できる目処をつけるとともに、導波型デバイスとの集積化可能性も示すことができた。さらに、MOVPE 法で作製した量子井戸構造で光通信波長帯の ISBT 吸収を実現し、MOVPE 法のみによる結晶成長でもスイッチの作製ができる見通しを得た。

Abstract

The reduction of operation energy is reported for ultra-fast optical switches utilizing intersubband transition (ISBT) in quantum structure of nitride semiconductors. A novel structure with SiN-cladding layer was realized for the propagation loss due to crystal defects to be suppressed. Moreover, structures for spot-size conversion to the narrow waveguide were investigated for decreasing the coupling loss. In addition, the technology for metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) was developed for the growth of quantum well structure. Then, it is concluded that the operation energy may be reduced to be as low as 10 pJ and the ISBT optical switches can be realized with MOVPE.

1. まえがき

超高速大容量フォトニックネットワークの実現のためには高速で動作する全光スイッチが必要とされる。このスイッチの有力な動作原理の一つが窒化物半導体量子構造中のサブバンド間遷移(ISBT)である。しかしながら、従来 ISBT スwitchは消費動作エネルギーが大きいことや結晶成長に際し、分子線エピタキシー(MBE)法と有機金属気相成長(MOVPE)法を併用しなくてはならないことなどが課題であった。本研究はこれらの課題を克服することを目標に行われた。動作エネルギー低減のためにはスイッチの断面積の低減が有効であるが、これを実現するため、SiN を上部クラッドとする新規な、かつ、低損失のスポットサイズ変換(SSC)構造を開発した。また、MOVPE 成長技術の研究をすすめ、MBE 法を用いずに ISBT スwitchを実現できる目処をつけた。

2. 研究内容及び成果

2. 1. スポットサイズ変換付きスイッチの試作

本研究で最初に試作したスポットサイズ変換付きスイッチの模式図を図 1 に示す。厚さ方向には三段の階段構造、横方向には直線的なテーパ構造の SSC 構造を有している。サファイア基板上に MOVPE 法で AlN 下部クラッドを成長し、続いて MBE (分子線エピタキシー) 法で GaN 層、

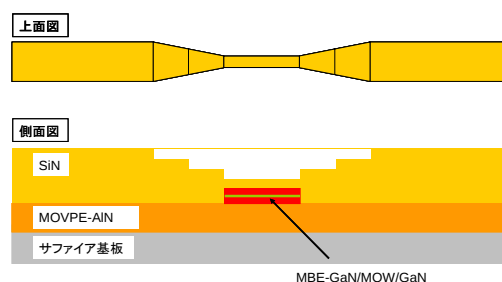


図 1 試作した階段型テーパ SSC 付きスイッチの模式図

n-GaN/AlN 多重量子井戸 (MQW) 構造、及びその上部に GaN 層を成長した。次にスイッチ部以外の部分の MQW 構造をエッチングにより除去し、その後スパッタ法で SiN を堆積した。この SiN 層は上部クラッド層となるものであり、これは本研究において初めてデバイス適用の可能性が示されたオリジナル構造である。この後、ドライエッチングを 3 回繰り返すことで、高さ方向の階段構造を作製し、さらに同じくドライエッチングで横方向のテーパ構造付き細線導波路を作製した。

この試料を評価した結果、長さ 80 μm のスイッチ長に対して、ISBT 吸収波長 1.48 μm 、吸収半値全幅 110 meV、

吸収強度 16 dB という値が得られ、また、25 pJ の入射光パルスに対して 5 dB の吸収飽和が観測できた。今回の試料ではスイッチ以外の部分では MQW を除去してあるので、チップ全体の長さは一定に保ったまま、スイッチ自体の長さは小さくできる。また、MQW 以外の部分では吸収が生じないのでこの部分を利用して将来的には、フィルタ、合分波器などの導波型素子との集積化が期待できる。

この試料において、飽和エネルギーに関して大幅な改善は得られなかったが、試作プロセスの問題と、階段型という構造上の問題により挿入損失が大きくなっていることが原因であることが解析によりわかった。そこで次にこれを克服する技術開発を行った。

2. 2. スポットサイズ変換構造の改良

ビーム伝播法や有限差分時間領域法によるシミュレーションを行った結果、上段を三角形、下段を細線付きテーパー構造をする二段テーパー構造を用いると、比較的簡便な試作プロセスでかつ低挿入損失の SSC 構造が得られることがわかった。これを実験的に検証するため、SiN/AlN の二層構造からなる導波路を試作した。

図 2(a)に二段テーパー型 SSC 付き導波路の細線部の断面を示す。導波路幅は 1.73 μm であった。図 2(b)はこの二段テーパー SSC 部の鳥瞰 SEM 像である。また、この試作に際してエッチング条件などのデバイス試作プロセスの見直しも行った。この二段テーパー型導波路の挿入損失を評価したところ、4.9 dB と良好な結果が得られた。このことは、二段テーパー型 SSC の可能性を示唆するものと考えている。

この結果と 2.1.で述べたスイッチの特性とから、二段テーパーでスイッチを試作した場合の 10 dB の吸収飽和を与えるエネルギーとして 12.5 pJ と見積もることができる。さらに素子作製条件を改良し、導波路幅をさらに狭くするなどすれば 10 pJ 程度にまでこれを低減することは容易であると思われる。

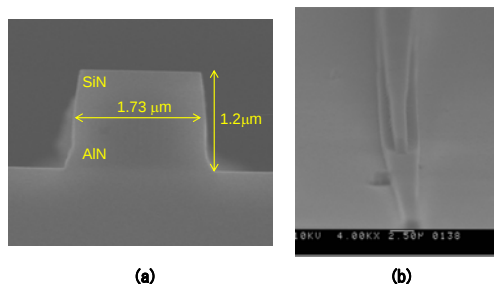


図 2 二段テーパー SSC 付きスイッチの SEM 像

2. 3. MOVPE 成長での光通信波長 ISBT の実現

本研究着手以前には、光通信波長帯の ISBT は窒化物半導体においては MBE 法を用いた場合でしか実現できていなかった。このために、これまでの研究開発においては、サファイア基板上に貫通転位の比較的少ない窒化物結晶を成長できる MOVPE を用いて良質な結晶テンプレートである AlN クラッド層をまず形成し、その後 MBE チャンバに基板を移して量子井戸および上部クラッド層を形成するという複雑なプロセスを用いざるを得なかった。従って、MOVPE により 1.5 μm 帯に十分な吸収係数を有する GaN/AlN 量子井戸を成長する技術を開発することは、過剰な光導波損失の低減を図ることに加え、プロセスの簡略化、さらには超高速光スイッチの民生応用という実用化の観点で大きなメリットをもたらすものである。

MOVPE により 1.5 μm 帯に十分な吸収係数を有する GaN/AlN 量子井戸を成長するためのポイントは、(1)成長温度を 830°C まで下げることで、(2)量子井戸成長の下地を AlN クラッド層に対し緩和させ、格子定数を量子井戸層の平均値に近づけること、(3)III 族原料 ((CH₃)₃Ga) のパルスインジェクションにより GaN 井戸層における十分な電子濃度を確保すること、である。このような成長法改善の結果、図 3 に示すように吸収ピーク波長 1.52 μm 、半値幅 113 meV という良好な ISBT 吸収を観測することに成功した。

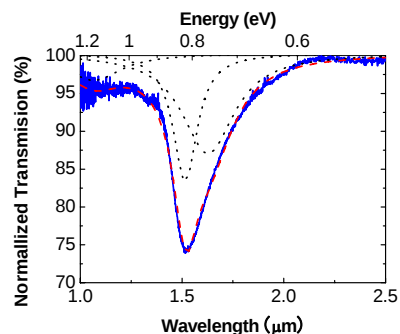


図 3 MOVPE で成長した MQW の ISBT スペクトル

3. むすび

スポットサイズ変換構造と集積化することで、窒化物半導体光スイッチの動作エネルギーを 10 pJ 程度にまで低減できる目処がつけるとともに、他の導波型デバイスとの集積化可能性をしめした。また、MOVPE のみによる結晶成長でもスイッチ構造が実現できる見通しをつけた。これらの成果により、窒化物半導体スイッチの新たな展望を開くことができたと確信する。

【誌上発表リスト】

- [1] T. Shimizu, C. Kumtornkittikul, N. Iizuka, N. Suzuki, M. Sugiyama, and Y. Nakano, "Fabrication and measurement of AlN cladding AlN/GaN multiple-quantum well waveguide for all-optical switching devices using intersubband transition," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46 No.10A pp6639-6642 (平成 19 年 10 月 9 日)
- [2] N. Iizuka, H. Yoshida, N. Managaki, T. Shimizu, S. Hassanet, M. Sugiyama, and Y. Nakano, "Saturation of intersubband absorption in GaN/AlN-based waveguide integrated with spot-size converter," 2008 IEEE LEOS Annual Meeting, WV6 (平成 20 年 11 月 12 日)
- [3] J. -S. Yang, H. Sodabanlu, I. Waki, M. Sugiyama, Y. Nakano, and Y. Shimogaki, "Low temperature metal organic vapor phase epitaxial growth of AlN by pulse injection method at 800 °C," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46 no.38 ppL927-L929 (平成 19 年 9 月 28 日)

【申請特許リスト】

- [1] 真名垣暢人、半導体量子ドット、その製造方法、光スイッチ、半導体レーザ、および検出器、日本、平成 19 年 6 月 28 日
- [2] 吉田春彦、光結合デバイス、日本、平成 20 年 8 月 29 日