光制御型 InAlAs/InP タイプ II 共鳴トンネルダイオードの
分子線エピタキシャル成長と評価*大内 一浩*¹・河村 裕一*¹・井上 直久*¹

(受理2002年12月2日, 掲載決定2003年2月1日)

Molecular Beam Epitaxial Growth and Characterization of an Optically
Controllable InAlAs/InP Type II Resonant Tunneling Diode

Kazuhiro OUCHI, Yuichi KAWAMURA and Naohisa INOUE

Research Institute for Advanced Science and Technology, Osaka Prefecture University,
1-2 Gakueh-cho, Sakai, Osaka 599-8570, Japan

(Received December 2, 2002, Accepted February 1, 2003)

An InAlAs/InP type II resonant tunneling diode (RTD) integrated with an InGaAsP optical absorption layer was grown by gas-source molecular beam epitaxy (GS-MBE), and its light input dependence of the negative differential resistance (NDR) characteristic was studied. An InGaAs/GaAs semiconductor laser lasing at 1.02 μm was used as an input light source, which was irradiated through the window of the top electrode. It was found that the valley current increases with increasing the input light intensity. In addition, the Plateau region of the NDR characteristic of the InAlAs/InP type II RTD disappears with increasing the input light intensity.

1. はじめに

半導体二重障壁構造を用いた共鳴トンネルダイオード (RTD) は, 超高速スイッチング動作が可能であり, 電子デバイスのみならず, 光デバイスにおいても光論理素子や光メモリ素子などに応用出来る¹⁻³⁾. RTD は面発光レーザとの集積化も容易であり, 将来の超並列光情報処理システムへの応用が期待される. 最近, RTD における負性抵抗特性 (NDR) を光入力で制御することが試みられている^{4,7)}. 我々は, これまでにタイプ II バンド構造を有する InAlAs/InP 系において RTD を分子線成長法 (MBE) により作製し, 明瞭な負性抵抗特性 (NDR) を観測することに成功している⁸⁾. InAlAs/InP タイプ II 構造においては電子に対する InAlAs 障壁層が正孔にとっての量子井戸層となる. このことを利用して

NDR 特性を光入力により制御出来れば, 新しい機能を有した光スイッチング素子を実現出来る可能性がある. 今回, この InAlAs/InP タイプ II RTD 構造に InGaAsP 光吸収層を積層した光制御型 InAlAs/InP タイプ II RTD を MBE で作製し, 共鳴トンネル特性の光制御可能性について検討したので, その結果を報告する.

2. 実 験

光制御型 InAlAs/InP タイプ II RTD はガスソース分子線成長法 (GS-MBE) を用いて n 形 (100) InP 基板上に作製した. 比較のため, InGaAsP 光吸収層の無い InAlAs/InP タイプ II RTD も作製し, NDR 特性の比較を行った. Fig. 1 に作製した RTD のエネルギーバンド構造を示す. Fig. 1 において, (a) が光吸収層のない通常の RTD であり, (b) が光吸収層を集積化した光制御型 RTD である. この構造は, InP 基板の上に, Si ドープ n 型 InP 層 (0.5 μm), 第 1 の InAlAs 障壁層 (70 Å), InP 量子井戸層 (65 Å), 第 2 の InAlAs 障壁層 (70 Å),

* 平成14年10月18日 第43回真空に関する連合講演会で発表

*¹ 大阪府立大学先端科学研究所 (〒599-8570 大阪府堺市学園町 1-2)

Fig. 1 Energy band diagram of InAlAs/InP type II resonant tunneling diodes without and with InGaAsP layer.

InGaAsP 光吸収層 ($0.3 \mu\text{m}$)、Si ドープ n 型 InP 層 ($1.0 \mu\text{m}$) を順次積層した構造となっている。成長温度は 500°C 一定とした。InP 層の成長速度は $1.45 \mu\text{m/h}$ 、InAlAs 層の成長速度は $2.5 \mu\text{m/h}$ 、InGaAsP 層の成長速度は $2.0 \mu\text{m/h}$ である。各層での成長中断時間は 20 秒とした。これは原料ガスである AsH_3 と PH_3 の切り替えに必要な時間である。図に示したように、コレクタ側の InAlAs 障壁層の横に光吸収層となる InGaAsP 層を積層した構造となっており、InAlAs 障壁層と InGaAsP 光吸収層の荷電子帯のトップは一致するようにしている。これにより InGaAsP 層で生成された正孔はコレクタ側の InAlAs 障壁層に蓄積され、InP 量子井戸層内の電子との相互作用が生じることになる。今回の実験では、この正孔と電子の相互作用が NDR 特性に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的としている。RTD 素子は、直径 $350 \mu\text{m}$ のハイメサ構造とし、上部 InP 層の上に光入力用の窓付きリング状電極を形成した。電極には AuGeNi/Au を用いている。制御光の光源としては波長 $1.02 \mu\text{m}$ の GaInAs/GaAs 半導体レーザを用いて NDR 特性に対する入力光強度依存性を検討した。

3. 結果と考察

Fig. 2 は InGaAsP 光吸収層が無い場合の InAlAs/InP タイプ II RTD の 80 K における電流・電圧特性を示している。他方、Fig. 3 は InGaAsP 光吸収層が集積化された構造の InAlAs/InP タイプ II RTD の 80 K における

Fig. 2 I-V characteristic of the InAlAs/InP type II RTD Without InGaAsP layer.

Fig. 3 I-V characteristic of the InAlAs/InP type II RTD With InGaAsP layer.

電流・電圧特性を示したものである。どちらの場合も基板側がエミッターとなる条件で電圧を印加している。2つの図から明らかなように、どちらの場合においてもピーク・バレー比が約 3 程度の明瞭な NDR 特性が観測される。このことは InGaAsP 光吸収層の集積化が共鳴トンネル特性にほとんど影響を与えていないことを示している。光吸収層を積層した方のピーク電圧が高くなっているが、これは主に光吸収層に印加された電圧によるものと思われる。また RTD ではしばしば観測されるピークとバレーの間のプラトー領域も両方の構造で観測されている。このプラトー領域が生じるメカニズムに関しては、量子井戸層内の電子の量子準位とエミッター側のバリアの近傍に形成される電子の量子準位の相互作用によるものであるというモデルが提案されている⁹⁾。

Fig. 4 はレーザの入力光強度を 10 mW から 80 mW まで変化させた場合の InGaAsP 光吸収層を集積化した

Fig. 4 Input light intensity dependence of the I-V Characteristic of the InAlAs/InP type II RTD With InGaAsP layer.

光制御型 RTD における NDR 特性の光入力依存性を示したものである。Fig. 4 において第一に特徴的なことは、共鳴点でのピーク電流値は光入力に対する依存性を示していないことである。このことは共鳴トンネル時間が量子井戸内の電子と InAlAs 層内の正孔の再結合時間より短いため、正孔が共鳴電流成分にほとんど影響を与えないためであると考えられる。一方、ピークを超えたバレー電流成分（非共鳴電流成分）は入力光強度の増加に伴い増加している。これは以下のように説明出来る。すなわち、共鳴点を過ぎた状態においては、第一の InAlAs 障壁層を透過した電子の InP 井戸層内の滞在時間が増大し、第 2 の InAlAs 障壁層内に蓄積した正孔との再結合割合が増大する。この電子・正孔の再結合割合の増大はバレー電流（非共鳴電流）を増加させる。Fig. 4 で特徴的な第 2 の点は、共鳴ピークの高電圧側にみられるプラトー領域が入力光強度の増加につれて減少し、80 mW の光入力では完全に消滅していることである。

このプラトー領域の光入力依存性については、現在そのメカニズムの詳細を検討中であるが、おそらく正孔の存在により InP 井戸層内の電子状態が変化し、量子井戸層内の電子の量子準位とエミッター側のバリアの近傍に形成された電子の量子準位の相互作用が変化したことにより起因しているものと考えられる。以上の結果から、コレクター側に InGaAsP 光吸収層を集積化することにより、NDR 特性におけるバレー電流を制御出来ることが明らかとなったが、ピーク電流の制御は不十分であることがわかった。

4. ま と め

InGaAsP 光吸収層を積層した光制御型 InAlAs/InP タイプ II 共鳴トンネルダイオードを作製し、NDR 特性の入力光強度依存性を測定した。その結果、共鳴ピーク電流値は変化せず、バレー電流値が入力光強度とともに増大することが観測された。またプラトー部分が光入力により消滅することが明らかとなった。

〔文 献〕

- 1) Y. Kawamura, H. Asai, S. Matsuo and C. Amano: IEEE J. Quantum electron. 28, p. 308 (1992).
- 2) Y. Kawamura, H. Asai and H. Iwamura: Electron. Lett., 30, p. 225 (1994).
- 3) H. Sakata, K. Utaka and Y. Matsushima: Electron. Lett., 20, p. 1714 (1994).
- 4) P. England, J. E. Golub, L. T. Florez and J. P. Harbison: App. Phys. Lett., 58, No. 9, p. 887 (1991).
- 5) T. Inata, Y. Nakata and S. Muto: Semicond. Sci. Technol., 7, B465 (1992).
- 6) T. S. Moise, Y.-C. Kao, L. D. Garrett and J. C. Campbell: Appl. Phys. Lett., 66, No 9, p. 1104 (1995).
- 7) D.-F. Guo: IEE Proc.-optoelectron. 148, No. 2, p. 121 (2001).
- 8) Y. Kawamura and H. Iwamura: Jpn. J. Appl. Phys., 31, p. L1733 (1992).
- 9) P. Zhao, H. L. Cui, D. Woolard, K. L. Jensen and F. A. Buot: J. Appl. Phys., 87, no. 3, p. 1337 (2000).