

# 高精度半導体結晶成長制御技術による 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の実現

すぎやま ひろき<sup>†1</sup> すずき さふみ<sup>†2</sup>

杉山 弘樹 / 鈴木 左文

あさだ まさひろ<sup>†2</sup>

浅田 雅洋

NTTフォトニクス研究所<sup>†1</sup>  
東京工業大学<sup>†2</sup>

未開拓の周波数領域であるテラヘルツ (THz) 帯は、大容量無線通信やセキュリティ分野などへの応用が期待されています。NTTフォトニクス研究所は東京工業大学と共同で、コンパクトなテラヘルツ光源となる共鳴トンネルダイオード (RTD) テラヘルツ発振器の開発を進め、室温の固体素子として最高の 1 THzの基本波発振を初めて実現しました。

## 共鳴トンネルダイオードとは

共鳴トンネルダイオード (RTD: Resonant Tunneling Diode) は、1973年にIBM Thomas Watson研究所のRaphael Tsu博士と江崎玲於奈博士が提案した量子力学的な共鳴トンネル効果に基づく、二端子の半導体素子です<sup>(1)</sup>。その動作原理を表すRTDのエネルギーバンド構造と、電流-電圧特性を図1に示します。RTDでは、バンドギャップの大きい半導体からなる厚さが数nm程度の極めて薄い障壁層によって、バンドギャップの小さい量子井戸層\*を挟んだ二重障壁構造が重要な役割を果たします。なお、このような異なる半導体を積層した構造をヘテロ接合と呼び、周期律表のⅢ族原子とⅤ族原子の組み合わせからなるガリウムヒ素 (GaAs) のような化合物半導体によって形成されたものが広く用いられています。

図1(a)は電圧 (V) が印加されていない状態のRTDを示しています。量子井戸には共鳴準位と呼ばれるエネルギー準位が形成されています。

二重障壁を挟む領域は電極に接続され、高濃度の電子で満たされており、それぞれエミッタ、コレクタと呼ばれます。エミッタ側の電極に負の電圧を印加していくと、井戸内の共鳴準位と一致したエネルギーを持つエミッタ側の電子が障壁を透過し、コレクタ側に電流が流れます (図1(b))。これが共鳴トンネル効果です。さらに印加電圧を高くすると、エミッタ側の電子のエネルギーが共鳴準位よりも高くなり、障壁層を通過することができなくなって、電流

は減少します (図1(c))。そのため、図1(d)に示したように、ダイオードに印加する電圧の増加に対して電流が減少する、負性抵抗が現れます。電流の極大値 (ピーク電流:  $I_P$ )、極小値 (バレー電流:  $I_V$ )、負性抵抗の大きさを示す両者の比 (PV比:  $I_P/I_V$ ) は、RTDの性能を表す指標となります。

RTDの特徴である負性抵抗を応用した機能素子の中で、代表的なものが高周波発振器です。負性抵抗素子は外部共振器と接続することによって発振器を構成することが可能です。RTD

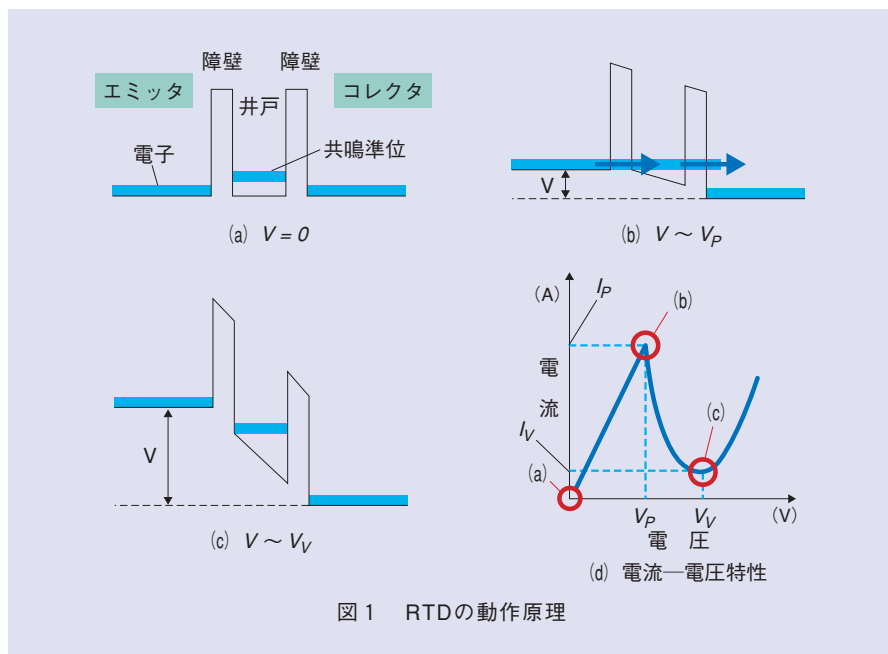


図1 RTDの動作原理

\* 量子井戸層: 井戸形のポテンシャル障壁によって電子や正孔を閉じ込める層。量子力学に基づき、層内に離散的なエネルギー準位が形成されます。

では、電子が0.1 ps台という極めて短い時間で二重障壁を通過でき、高い電流密度で比較的小さい寄生容量の充電が可能であるため、ほかの半導体素子では到達困難なテラヘルツ (THz) 帯での発振動作の可能性が早い時期から指摘されていました。THz帯は、大容量無線通信システムや、セキュリティ用途のイメージングなどの利用が期待されており、そこをカバーするコンパクトな室温固体光源として、RTD テラヘルツ発振器の実現が待たれていました。しかし、1984年に低温 (200 K) で初めて18 GHz発振が確認され<sup>(2)</sup>、1991年に室温での712 GHz発振が報告された後<sup>(3)</sup>、発振周波数最高値の更新がしばらく途絶えていたことが示すように、発振器の高周波化にはさまざまな課題を克服する必要があります。その1つは、nmオーダーの極めて薄い半導体を積層して、高電流密度とPV比を両立できる高品質結晶を形成する材料技術です。さらに、この材料技術をベースに、高性能のRTDを形成し、共振器と組み合わせて、発振器を設計、作製する技術が必要となります。今回、NTTフォトニクス研究所の強みである半導体結晶材料技術と、東京工業大学が培ってきたRTD発振器設計・作製技術が連携することによって、単一の固体素子による室温発振周波数としては最高の1.04 THzを実現することができました<sup>(4)</sup>。本稿では、成果の鍵となった高精度制御半導体結晶成長制御技術と、RTDテラヘルツ発振器の実現について紹介します。

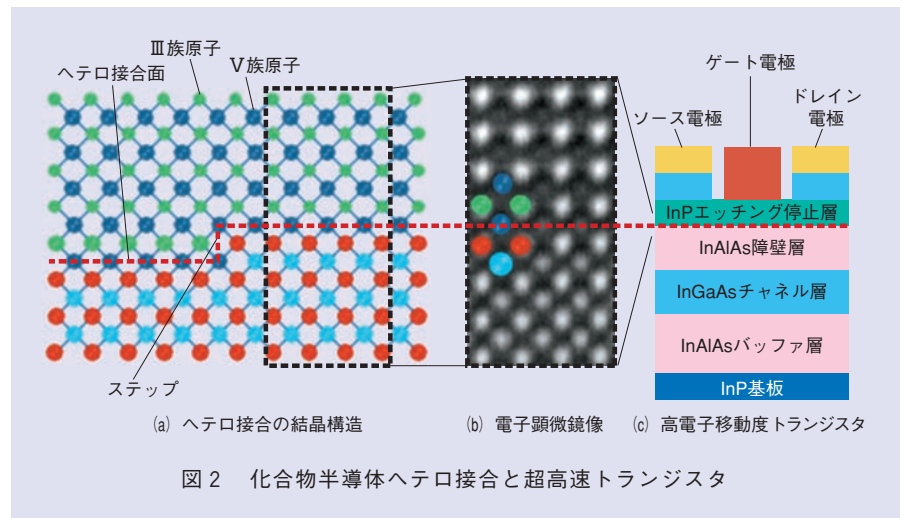
### 高性能デバイスを支える高精度半導体結晶成長制御技術

図2(a)は、異なるIII-V族化合物半導体を積層したヘテロ接合の原子レベルの模式図です。上層、下層各々の半導体は、III族およびV族原子が周期的に規則正しく並んだ結晶構造からなり、ヘテロ接合を境にして構成原子が切り替わっている様子が分かります。RTDの二重障壁構造のような、半導体中で電子や正孔が感じるエネルギーの空間分布、つまりバンドエネルギー構造は、このようなヘテロ接合によって形成されます。トランジスタ、レーザ、フォトダイオードなどの通信ネットワークを支える半導体デバイスでは、このヘテロ接合を利用して性能を引き出しています。

ヘテロ接合を実際に作製するには、基板となる半導体の上に原料を供給して結晶を成長させます。NTTフォトニクス研究所では、有機金属化合物と水素化合物の原料を水素キャリアガスと混合させて基板上に供給し、分解、

反応させることによって結晶成長を行う有機金属気相成長法 (MOVPE: Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy) を主に用いて、将来のネットワークを支える最先端の半導体素子の開発を行っています。ヘテロ接合の形成には、境界面での供給原料の切替が必要となります。この切替の際に、境界面付近で各半導体層の構成原子が相互に混ざり合うことのない、原子レベルで急峻な組成分布を形成することは、半導体素子の高性能化や長期的な信頼性を確保する観点から非常に重要となります。

また、図2(a)中に示したステップと呼ばれる原子レベルの段差 (1分子層高さに相当) によって、電子が半導体中を走行する際に散乱を受けるため、このような段差を低減して平坦化することも重要になります。我々は原子レベルで制御された高品質のヘテロ接合を形成可能な結晶成長技術の開発に取り組んでいます。その一例として、NTTが開発を進めているインジウムリン (InP) 基板上に形成した高電子移動



動度トランジスタ（HEMT: High Electron Mobility Transistor）内のヘテロ接合の電子顕微鏡像とトランジスタ層構造を図2(b), (c)にそれぞれ示します。輝点が個々の原子に対応しており、原子レベルで急峻な組成分布が実現できていることが分かります。なお、NTTは、このHEMTを用いて120 GHz帯大容量無線通信システムの開発を進めています<sup>(5)</sup>。

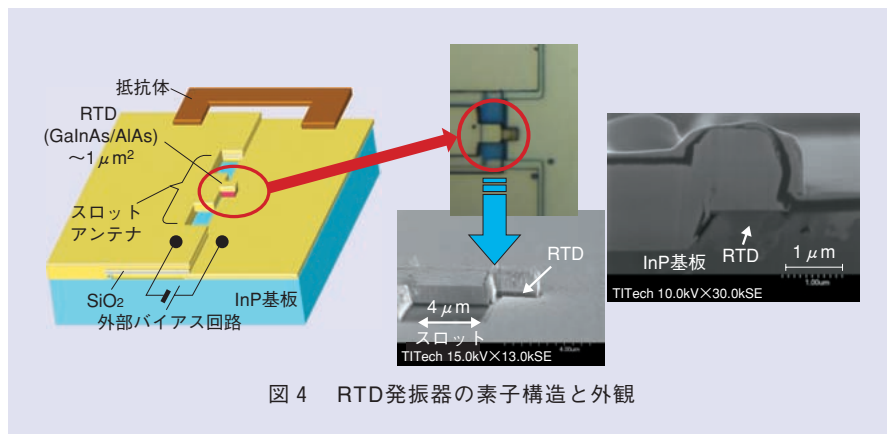
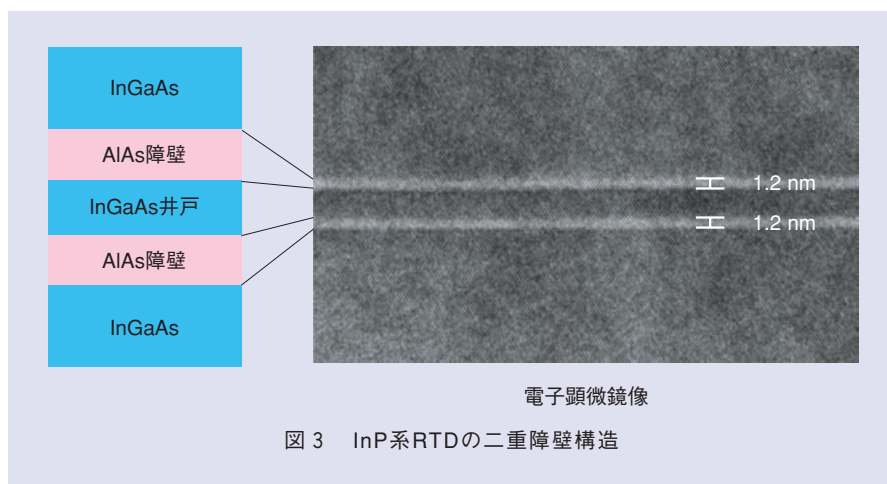
我々はRTD発振器の材料として、InP基板上に成長した、電子の輸送特性に優れたインジウムガリウムヒ素（InGaAs）と、高い障壁高さを形成できるアルミニウムヒ素（AlAs）を用いました。RTDテラヘルツ発振器実現のためには、 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ を上回る高いピーク電流密度とPV比が必要となります。また、ピーク電流密度は障壁層の厚さに指数関数的に依存するため、1分子層以下の精度で約1 nmのAlAs障壁厚さを制御しなくてはなりません。高PV比化のためには、前述のヘテロ接合における原子レベルの組成急峻性化と平坦化が必要です。我々は、結晶成長条件の最適化によってこれらをクリアしてきました<sup>(6)</sup>。実際に我々が作製した二重障壁構造の断面電子顕微鏡像を図3に示します。厚さが約1.2 nm（約4.4分子層相当）の障壁層が均一に形成できていることが分かります。また、直径3インチ（約76 mm）のウエハにわたって、厚さのばらつきが約±0.1分子層という膜厚均一性が極めて良好な結晶を作製することが可能となっており、十分な実用性を確保しています。

## RTDテラヘルツ発振器の実現

東京工業大学が研究を進めてきたRTD発振器の素子構造と顕微鏡写真を図4に示します<sup>(7)</sup>。この発振器は最先端の半導体微細加工技術を駆使して作製されており、外部共振器として作用するスロットアンテナに、面積が $1 \mu\text{m}^2$ 以下に微細化されたRTDを集積しています。アンテナの両端に金属-絶縁体-金属の層構造による反射器を配置してスロットアンテナに高周波を閉じ込めます。また、抵抗体を並列に接続し、外部バイアス回路による寄生発振を防ぐなど、さまざまな工

夫が施されています。発振周波数はRTDの容量を含むアンテナとRTD全体の共振によって決まりますので、アンテナ長やダイオードの面積等の構造パラメータの最適化が高周波発振の鍵となります。

NTTと東京工業大学は2007年度より連携して、RTDテラヘルツ発振器実現に向け、高ピーク電流密度化等の素子の高性能化の研究を進めてきました。今回THz発振を実現したRTDテラヘルツ発振器のエネルギーバンド構造を図5に示します。障壁層を1.2 nmとして、電子が二重障壁構造の通過にかかる走行時間を短縮しました。また、



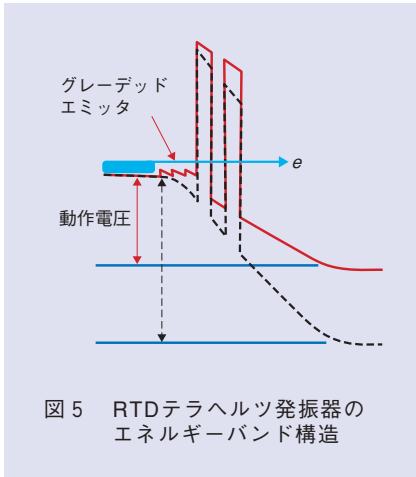


図5 RTDテラヘルツ発振器のエネルギーバンド構造

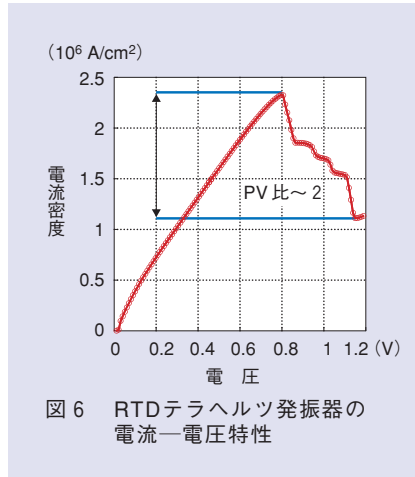


図6 RTDテラヘルツ発振器の電流-電圧特性

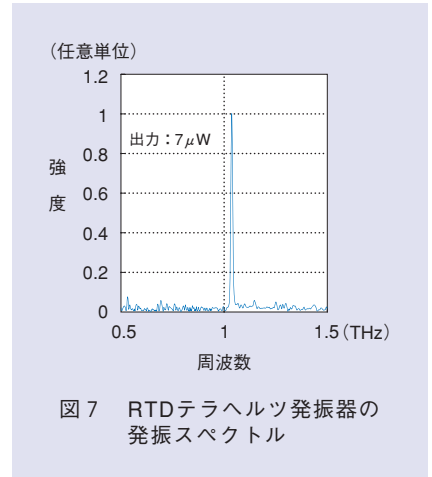


図7 RTDテラヘルツ発振器の発振スペクトル

赤線で示したようにエミッタ側からバリアに向かって階段状のポテンシャル分布を持つようInGaAsの組成を変化させたグレーデッドエミッタ構造を導入し、点線で示した導入前と比較して動作電圧を低減させました。これによって、 $\Gamma$ -L谷間散乱と呼ばれる半導体の電子構造に由来する電子の減速効果を抑制し、コレクタの通行にかかる時間を短縮させます。

また、RTDテラヘルツ発振器の電流-電圧特性を図6に示します。ピーク電流密度としてこれまでに報告されている中で最高の $2.4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ と、PV比2を実現しました。この結果は、極めて薄い均一な障壁層と、高品質のヘテロ接合が形成できていることを示しています。さらに、このRTDを用いた発振器の発振スペクトルを図7に示します。ここまで述べたさまざまな工夫の結果、単体の固体素子による室温の発振周波数としては過去最高の1.04 THzを出力 $7 \mu\text{ W}$ で得ることができました。

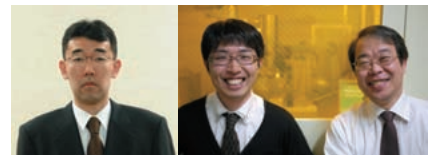
## まとめ

本稿ではNTT、東京工業大学、双方の技術の強みを生かしたRTDテラヘルツ発振器の実現について紹介しました。THz帯は、未開の周波数領域として、大容量無線通信システムや、セキュリティ用途の利用が期待されており、この周波数帯で室温動作するコンパクトな固体光源素子の実現が待たれていました。今回の成果であるRTDテラヘルツ発振器は、それを実現する有望な素子の1つであり、我々は今後もさらなる高周波化、高出力化を進めていきます。

## 参考文献

- (1) R. Tsu and L. Esaki: "Tunneling in a finite superlattice," Appl. Phys. Lett., Vol. 22, No.11, pp. 562-564, 1973.
- (2) T. C. L. G. Sollner, P. E. Tannenwald, D. D. Peck, and W. D. Goodhue: "Quantum Well Oscillators," Appl. Phys. Lett., Vol. 45, No.12, pp. 1319-1321, 1984.
- (3) E. R. Brown, J. R. Söderström, C. D. Parker, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, and T. C. McGill: "Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant tunneling diodes," Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No.20, pp. 2291-2293, 1991.
- (4) S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama: "Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature," Appl. Phys. Lett., Vol. 97, No.24, p. 242102, 2010.

- (5) T. Kosugi, H. Sugiyama, K. Murata, H. Takahashi, A. Hirata, N. Kukutsu, Y. Kado, and T. Enoki: "A 125-GHz 140-mW InGaAs/InP composite-channel HEMT MMIC power amplifier module," IEICE Electron. Express, Vol. 6, No. 24, pp. 1764-1768, 2009.
- (6) H. Sugiyama, H. Yokoyama, A. Teranishi, S. Suzuki, and M. Asada: "Extremely High Peak Current Density of over  $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  in InP-Based InGaAs/AlAs Resonant Tunneling Diodes Grown by Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, 051201, 2010.
- (7) M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto: "Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillators," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 6, pp. 4375-4384, 2008.



(左から) 杉山 弘樹/ 鈴木 左文/  
浅田 雅洋

今後も究極の半導体結晶成長技術とRTD発振器技術を追求し、テラヘルツエレクトロニクスにさらなるブレークスルーをもたらしていきたいと考えています。

## ◆問い合わせ先

NTTフォトリクス研究所  
テラビットデバイス研究部  
TEL 046-240-2778  
FAX 046-240-2872  
E-mail sugiyama.hiroki@lab.ntt.co.jp