

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760247

研究課題名（和文） 3次元集積構造によりビーム制御機能を有する共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器

研究課題名（英文） Terahertz oscillating resonant tunneling diode having beam shaping function using three-dimensionally integrated antenna structure

研究代表者

鈴木 左文（SUZUKI SAFUMI）

東京工業大学・総合理工学研究科・助教

研究者番号：40550471

研究成果の概要（和文）：3次元的にマイクロサイズの八木アンテナを集積した発振素子構造を提案し、その構造の放射パターンのシミュレーション、および、プロセスの研究を行った。シミュレーションよりアレイエレメントを3つ配置したときに19dBiの指向性が得られることが分かった。素子の作製プロセスの開発では薄膜基板を作製する条件や、誘電体厚膜を積層する条件などを求め、作製プロセスの確立を行った。

研究成果の概要（英文）：Terahertz oscillating resonant tunneling diode with three-dimensionally integrated micro size Yagi antenna array was proposed. The radiation pattern was calculated and fabrication process was studied. A high antenna gain of around 19 dBi was theoretically expected in the RTD oscillator integrated with three element Yagi antenna array. The conditions for fabrication of thin substrate and thick dielectric layer were experimentally studied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000円	480,000円	2,080,000円
2011年度	1,600,000円	480,000円	2,080,000円
年度			
年度			
年度			
総計			

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路・超高速電子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

1～数10テラヘルツ（THz）の周波数帯は光と電波の中間に位置し未開拓な周波数領域であるが、近年の研究により、この周波数資源を利用した様々な応用の可能性が示されてきている。コヒーレントなTHz帯の固体発振素子が実現すれば、大容量情報処理や、大容量通信、分析やイメージング（医療、化学、バイオテクノロジーなど）、計測などが期待され、新しい周波数資源の活用が活発に進むと

考えられる。特にその高い周波数をキャリア信号として用いたことによる大容量無線通信に期待が寄せられてきている。

THz帯のコヒーレントな半導体光源は、光と電波の中間に位置することから、光デバイスと電子デバイスの両分野から研究がなされてきた。光デバイスでは、量子カスケードレーザーのTHz発振が2002年に欧米で報告された。その後も活発に研究が行なわれているが、その動作温度は190k程度と低温であ

り、動作温度を上げる研究は行われているが大きな進展は今のところ報告されていない。電子デバイスでは、HBT や HEMT などの InP 系高速トランジスタ、タンネットなどにより動作周波数がサブ THz ~ THz 領域に延びてきている。また、超格子を用いたブロッホ振動素子などの量子効果デバイスも研究されている。

共鳴トンネルダイオード(RTD)は現在までに室温において、712GHz の基本波発振の報告があり、THz 光源の有力な候補である。そこで、我々は InP 系の RTD に着目し、層構造最適化により高周波発振に必要な不可欠な高電流密度化を行い、世界最高の電流密度  $18\text{mA}/\mu\text{m}^2$  を得るとともに、この構造の RTD に微細スロットを集積した発振素子において 831GHz の発振を  $1\mu\text{W}$  以上の出力で得た。また、出力は  $30\text{nW}$  と低いものの、ダイオード面積の微細化により、915GHz の発振も得ている。この発振周波数は今まで報告された室温固体電子デバイスの最高発振周波数である。

また、アンテナと RTD とのインピーダンスマッチングを改善して、出力を向上させるオフセット給電を新たに提案し、500GHz 帯で  $100\mu\text{W}$  の出力を実験で達成している。この周波数帯で動作する発振器は、高速トランジスタを用いたデバイスには存在しない。さらに素子をアレイ化しコヒーレントな出力合成がおこることを実験で示しており、アレイ素子の拡張を行うことにより  $1\text{mW}$  を超える発振出力も期待できる。

この様に、RTD は 1THz 程度の高周波での発振が可能であり、またアンテナ構造の最適化により mW クラスの出力期待でき、THz 帯を広くカバーしており、超高速無線通信などの THz 応用に有用なキーデバイスとなりうる。

## 2. 研究の目的

背景に示したとおり、THz 帯には未だ未割り当ての広大な周波数帯域が広がっており、その広帯域性を用いた超高速無線通信が期待されている。RTD 発振素子はコンパクトで手軽な半導体素子であり、そのような応用に用いるのに最適なデバイスと考えられる。しかしながら、それらを実現するには、高い指向性のビームを高出力で放射する必要があるが、現状の RTD 発振器はアンテナゲインが低く、要求を満たしてはいない。これは、デバイスを集積している InP 基板の誘電率が高く出力は基板方向に放射されるため、基板と誘電率が近いシリコンレンズを介して出力取り出しており、その際の、微細なマウント位置のずれや、レンズ表面での出力反射などにより、指向性の劣化と発振出力を有効に

取り出せていないことが原因である。

そのため、3 次元的に集積したアンテナ構造によりシリコンレンズ無しで放射ビームを高指向性化した共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振素子を実現することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

シリコンレンズを使用するのは、InP 基板の高い誘電率で基板方向に出力放射してしまうためなので、まず InP 基板自体の  $10\mu\text{m}$  以下までの薄膜化が必要となる。この薄膜化構造に加え、スロットアンテナと RTD メサで構成される発振素子の直上に 3 次元的にマイクロサイズの八木アンテナを集積することによって指向性の向上を行う。八木アンテナのエレメントを 3 次元的に集積するため、高周波での誘電体損失が少なく、また、任意の形状に加工しやすい感光性 BCB と SU-8 を選択した。さらに、薄膜化した InP 基板を支える支持基板としてホワイトポリエチレン (HDPE) 板を張り付ける。上記提案構造に関して、シミュレーションとその作製プロセスに関して研究を行う。

(1)3 次元電磁界シミュレーター (HFSS) により解析を行い、ビームが鋭くなるような、八木アンテナのエレメント数やエレメント間隔、また、HDPE 板の厚さを算出する。誘電体の損失も含め計算を行い、また電極の微細形状も考慮し実際のデバイスに近いモデルを用いる。

(2)薄膜化された InP 基板は大変脆くなるため、基板が割れないようなプロセスを模索する。また、厚膜誘電体の堆積方法、及び、アレイエレメントの位置合わせについて試作を行いながら条件を算出していく。

## 4. 研究成果

(1)3 次元的にマイクロサイズの八木アンテナを集積した発振素子構造に関して、BCB の誘電損を含んだ放射パターンのシミュレーションを行ったところ、アレイエレメントを 3 つ、基板から高さ 20, 70, 170 $\mu\text{m}$  の位置に配置したときに放射電界がアレイエレメントのある方向に良く集中することが分かった (図 1)。この構造において、指向性は突端で約 19dBi 得られることが分かった。また、BCB は 1mm 以下でそれほど厚くないため、それによる損失は 1 割程度と小さい事が分かった。また、SU-8 を用いた場合、誘電損は若干上がるものの、10dBi 以上の指向性が得られることが分かった。従来のシリコンレンズを介して出力を取り出す方法では、レンズ表面

での反射等によって全出力の 1/10 程度しか有効に利用することが出来なかったが、この方法を用いることによって、5 割以上の出力が良い指向性で取り出せることを見出した。

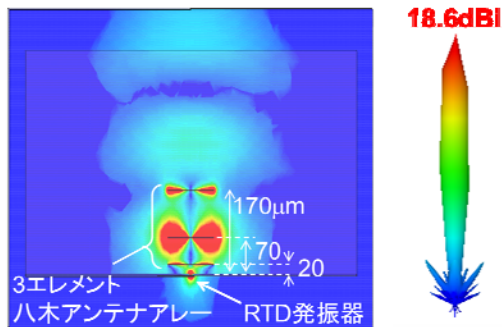


図 1 : 3 次元的に八木アンテナアレーを集積した RTD 発振素子の電界分布と放射パターン

(2) 厚さ 10 $\mu\text{m}$  以下に薄膜化された InP 基板は大変脆いため、薄膜化する前に個別に素子をダイシングにより切り分け、HDPE 薄板に貼り付けた後、InP 基板を薄膜化するプロセスを考案した(図 2)。プロセスの流れは、まず始めに、RTD 発振素子を集積した InP 基板に、感光性の BCB もしくは SU-8 を用い素子部分のみに四角く堆積するよう露光し厚膜の誘電体を形成する。次に、設計した高さに誘電体を形成したら八木アンテナエレメントを蒸着する。とを繰り返し、八木アンテナアレーを厚膜誘電体中に堆積したら、ダイシングソーにより 1 素子ごとに切り分けチップ化する。チップ化した素子の厚膜誘電体部と支持基板となる HDPE 板を張り付け、InP 基板を HCl によりエッチングし薄膜化する。裏面から電極を取り、ワイヤボンディングし完成する。

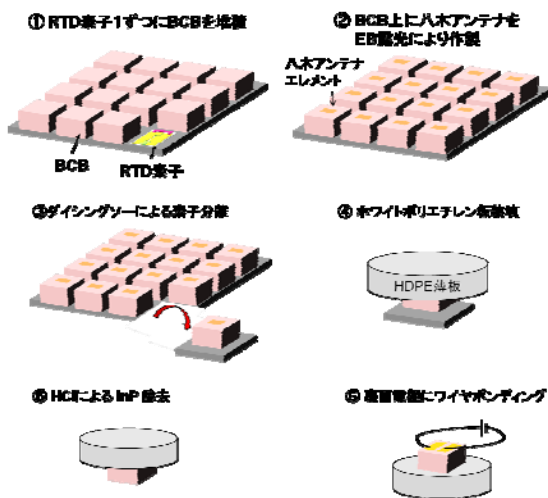


図 2 : マイクロサイズ八木アンテナの 3 次元集積プロセス

提案したプロセスの各行程における作製条件を実験的に求めた。まず BCB の堆積では BCB を素子の直上のみに堆積することによって、基板の縁でのレジストの盛り上がりを防ぎ、また、ダイシング時に BCB にダイシングソーの刃が当たらないようになるため、BCB の剥離が防げることが分かった。また厚膜の BCB では基板上的位置合わせマークが読めなくなってしまうが、この様に部分的に堆積することによって、マーク上に BCB が無く位置合わせが容易になり、八木アンテナエレメントをズレ無く形成出来ることが分かった。また、SU-8 を用いた場合は、一度に堆積できる厚さが 100 $\mu\text{m}$  以上まで可能なため、指向性が若干犠牲になるが、作製がより容易になることが分かった。図 3 に発振素子に厚膜 BCB と八木アンテナエレメントを形成した時の実際の素子の写真と、HDPE 板に貼り付けた後に InP をエッチングし裏面電極を形成したときの素子の写真を示す。若干基板に割れが生じているが裏面電極の形成が行われており、素子の作製プロセスの確立が出来たといえる。

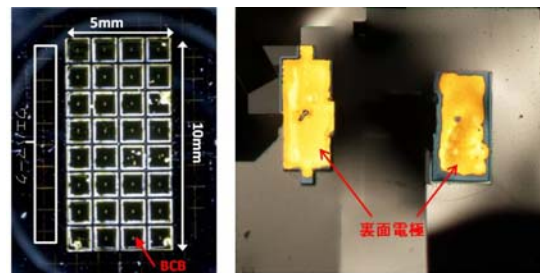


図 3 : 厚膜 BCB と八木アンテナエレメントを形成した時の素子(左) 形成された裏面電極(右)

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件)

- A. Teranishi, S. Suzuki, K. Shizuno, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Estimation of Transit time in Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diodes with Graded Emitter and Thin Barriers", Trans. Electron. IEICE of Japan, vol. E95-C, No. 3, pp. 401-407, Mar. 2012. 査読有
- A. Teranishi, K. Shizuno, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Fundamental Oscillation up to 1.08 THz in Resonant Tunneling Diodes with High-Indium Composition Transit

Layers for Reduction of Transit Delay”, IEICE Electron. Express, vol. 9, no. 5, pp. 385-390, Mar. 2012. 査読有

M. Shiraishi, H. Shibayama, K. Ishigaki, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “High Output Power ( $\sim 400\mu\text{W}$ ) Oscillators at around 550GHz Using Resonant Tunneling Diodes with Graded Emitter and Thin Barriers”, Appl. Phys. Express, vol. 4, 064101, 2011. 査読有

M. Asada and S. Suzuki, “Terahertz Oscillators Using Electron Devices – an Approach with Resonant Tunneling Diodes” (invited), IEICE Electron. Express, vol. 8, no.14, pp.1110-1126, July 2011.

S. Suzuki, K. Karashima, K. Ishigaki, and M. Asada, “Heterodyne Mixing of Sub-Terahertz Output Power from Two Resonant Tunneling Diodes Using InP Schottky Barrier Diode”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 50, 080211, 2011. 査読有

H. Sugiyama, A. Teranishi, S. Suzuki, and M. Asada, “High Uniformity InP-Based Resonant Tunneling Diode Wafers with Peak Current Density of over  $6 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  Grown by Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy”, J. Crystal Growth, vol. 336, pp. 24-28, 2011. 査読有

浅田雅洋、鈴木左文、「電子デバイスによるテラヘルツ光源」電気学会論文誌A(基礎・材料共通)vol.131-A, pp.21-25, 2011.

M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature Terahertz Oscillation of Electron Devices”, J. Institute of Electrical Engineers of Japan, vol.131-A, pp.21-25, 2011.

H. Sugiyama, S. Suzuki, and M. Asada”, Room-Temperature Resonant Tunneling Diode Terahertz Oscillator Based on Precisely Controlled Semiconductor Epitaxial Growth Technology”, NTT Technical Review, vol.9, no.10, Oct. 2011 (online journal). Japanese version: 杉山弘樹、鈴木左文、浅田雅洋, 「高精度結晶成長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」, NTT 技術ジャーナル, vol.23, no.7, pp.12-17, 2011年7月.

M. Shiraishi, S. Suzuki, A. Teranishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Fundamental Oscillation of up to 915 GHz in Small-Area InGaAs/AlAs Resonant

Tunneling Diodes with Planar Slot Antennas”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 49, 020211, 2010. 査読有

K. Karashima, R. Yokoyama, M. Shiraishi, S. Suzuki, S. Aoki, and M. Asada, “Measurement of Oscillation Frequency and Spectral Linewidth of Sub-Terahertz InP-Based Resonant Tunneling Diode Oscillators Using Ni-InP Schottky Barrier Diode”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 49, 020208, 2010. 査読有

K. Hinata, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Sub-Terahertz Resonant Tunneling Diode Oscillators with High Output Power ( $\sim 200\mu\text{W}$ ) Using Offset-Fed Slot Antenna and High Current Density”, Appl. Phys. Express vol.3, 014001, 2010. 査読有

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, 242102(1-3), 2010. 査読有

S. Suzuki, K. Sawada, A. Teranishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Fundamental oscillations at  $\sim 900\text{GHz}$  with low bias voltages in RTDs with spike-doped structures,” Electron. Lett., vol.46, pp.1006-1007, 2010. 査読有

H. Sugiyama, H. Yokoyama, A. Teranishi, S. Suzuki, and M. Asada, “Extremely High Peak Current Densities 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(1-6), 2010. 査読有

[学会発表](計20件)

(1)M. Asada and S. Suzuki “Room-Temperature Terahertz Oscillation of Resonant Tunneling Diodes and Preliminary Experiments on Wireless Communication Application” (invited), Japan-Korea Joint Workshop, S2-3, Nagoya, Dec. 19, 2011.

(2)K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, and M. Asada, “Wireless Data Transmission at  $\sim 560 \text{ GHz}$  with Direct Modulation of RTD Oscillator”, Int. Symp. Terahertz Nano-Science & Workshop on Int. Terahertz Research Network, 28-P-06, Osaka, Nov. 28,

2011. 査読有

- (3)M. Asada and S. Suzuki, "THz Oscillating Resonant Tunneling Diode and Its Basic Properties for Wireless Communications" (Invited), Int. Symp. Terahertz Nano- Science & Workshop on Int. Terahertz Research Network, 28-1-07, Osaka, Nov. 28, 2011.
- (4)S. Kaburaki, S. Suzuki, and M. Asada, "Intensity Modulation of Sub-Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diode by Irradiation of 1.55- $\mu$ m Laser", IEEE Photonics Conference (IPC 11), ThS-2, Arlington/VA, Oct. 13, 2011. 査読有
- (5)H. Shibayama, S. Suzuki, M. Shiraishi, M. Asada, "Dependence of Output Power on Slot Antenna Width in Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diodes", Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2011), W5.46, Huston, Oct. 5, 2011. 査読有
- (6)K. Ishigaki, K. Karashima, M. Shiraishi, H. Shibayama, S. Suzuki, M. Asada, "Direct Modulation of THz-Oscillating Resonant Tunneling Diodes", Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2011), W5.14, Huston, Oct. 5, 2011. 査読有
- (7)S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Terahertz Oscillation of InGaAs/AlAs Resonant Tunneling Diodes at Room Temperature" (Invited), Topical Workshop on Heterostructure Materials (TWHM), 7-1, Gifu, Japan, Aug. 30, 2011.
- (8)M. Asada and S. Suzuki, "Terahertz Oscillation of Resonant Tunneling Diodes at Room Temperature" (invited), Electron Dynamics in Semiconductors, Opto- electronics and Nanostructures (EDISON 17), Th1.1, Santa Barbara/CA, Aug. 11, 2011.
- (9)M. Asada and S. Suzuki, "Room-Temperature THz Oscillation of Resonant Tunneling Diodes" (invited), Int. Symp. Microwave/ Terahertz Science and Applications (MTSA 2011), T1-3, Nanjing, China, June 21, 2011.
- (10)A. Teranishi, K. Shizuno, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Fundamental Oscillation up to 1.08 THz in Resonant Tunneling Diodes with High Indium Composition Transit Layers", Int. Conf. Indium Phosphide & Related Materials (IPRM 2011), P-09, Berlin, May 24, 2011. 査読有
- (11)M. Shiraishi, H. Shibayama, K. Ishigaki, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "High Output Power (~400  $\cdot$  W) Oscillators at Around 550 GHz Using Large Area RTD and Optimized Antenna Structure", Int. Conf. Indium Phosphide & Related Materials (IPRM 2011), P-29, Berlin, May 24, 2011. 査読有
- (12)M. Asada and S. Suzuki, "THz Oscillators Using Resonant Tunneling Diodes Int. Conf. Semiconductor Integrated Circuits and Technology" (Invited), 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT-2010), I-10-10, Shanghai, Nov. 2, 2010.
- (13)S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "1.04 THz Fundamental Oscillation of Resonant Tunneling Diode at Room Temperature", European Optical Society (EOS) Annual Meeting, Terahertz Science and Technology, TOM02, Paris, Oct. 26, 2010. 査読有
- (14)S. Suzuki and M. Asada, "Terahertz Oscillating InGaAs/AlAs Resonant Tunneling Diodes" (Invited), Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), I-3-1, Tokyo, Sept. 23. 2010.
- (15)K. Karashima, M. Shiraishi, K. Hinata, S. Suzuki and M. Asada, "Heterodyne Detection of Output of Sub-THz RTD Oscillator Using InP-SBD Detector and RTD Local Oscillator", Int. Conf. Infrared & Millimeter Waves and Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2010), Th-P76, Rome, Sept. 9, 2010. 査読有
- (16)S. Suzuki, A. Teranishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Increase of Fundamental Oscillation Frequency in Resonant Tunneling Diode with Thin Barrier and Graded Emitter Structures", Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Tu-C1.2, Rome, Sept. 7, 2010. 査読有
- (17)M. Asada and S. Suzuki, "THz Oscillators Using Resonant Tunneling Diodes at Room Temperature" (Invited Keynote), Int. Conf. Infrared & Millimeter Waves and Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2010), Tu-C1.1, Rome, Sept. 7, 2010.
- (18)S. Suzuki, K. Sawada, A. Teranishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Fundamental Oscillations at ~900 GHz

with Low Bias Voltages in RTDs Having Spike-Doped Structures”, Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2010), 3A-3, Tokyo, June 30, 2010. 査読有

(19)M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature Oscillation of Resonant Tunneling Diodes in Terahertz Range” (Invited), Int. Symp. Compound Semicond. (ISCS 2010), FrE1-6, Takamatsu, Japan, June 4, 2010.

(20)S. Suzuki, K. Hinata, M. Shiraishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “RTD Oscillators at 430-460 GHz with High Output Power (~200  $\mu$ W) Using Integrated Offset Slot Antennas”, Indium Phosphide and Related Compounds (IPRM 2010), WeB2-5, Takamatsu, June 2, 2010. 査読有

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada\\_Lab.html](http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada_Lab.html)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 左文 (SUZUKI SAFUMI)

東京工業大学・総合理工学研究科・助教

研究者番号：40550471