

平成18年度 学術創成研究費 研究終了報告書(事後評価用)

平成18年3月31日

ふりがな	いとう ひろまさ		所属研究機関・ 部局・職	東北大学・電気通信研究所・教授				
研究代表者 氏名	伊藤 弘昌							
研究課題名 (英訳名)	フォノン工学 (Phonon Engineering)							
研究経費 (千円未満切 捨)	年度	研究経費(千円)		使用内訳(千円)				
		交付額	支出額	設備備品	消耗品費	旅費	謝金等	その他
	平成13年度	84,100	84,104	64,410	19,177	403	101	13
	平成14年度	107,100	107,100	38,330	67,524	360	225	661
	平成15年度	72,800	72,800	24,214	43,884	989	484	3,229
	平成16年度	58,500	58,500	15,338	40,826	1,423	36	877
	平成17年度	57,500	57,500	15,457	38,543	1,762	0	1,738
	総計	380,000	380,004					
研究組織(研究代表者及び研究分担者)								
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担(研究実施計画に対する分担事項)					
伊藤 弘昌	東北大学・電気通信研究所・教授	応用量子光学	フォノン・ポラリトン, ラマン増幅・分光の研究, 統括					
須藤 建	(財)半導体研究振興会・主任研究員	半導体工学	フォノン・ポラリトン, ラマン増幅・分光の研究					
小山 裕	東北大学・大学院工学研究科・教授	半導体工学	フォノン・ポラリトン, ラマン増幅・分光の研究					
四方 潤一	東北大学・電気通信研究所・助教授	応用量子光学	フォノン・ポラリトン, ラマン増幅・分光の研究					
田邊 匡生	東北大学・大学院工学研究科・助手	半導体工学	フォノン・ポラリトン, ラマン増幅・分光の研究					
ピョートル・プロトカ	(財)半導体研究振興会・主任研究員	半導体工学	無フォノン電子デバイスの研究					
倉林 徹	(財)半導体研究振興会・主任研究員	半導体工学	無フォノン電子デバイスの研究					
真壁 浩樹	(財)半導体研究振興会・研究員	半導体工学	無フォノン電子デバイスの研究					
計 8 名								

当初の研究目的

未踏破の周波数領域であるテラヘルツ (THz) 帯には、固体中のフォノンや生体等を構成する分子の固有振動、分子間相互作用等に関連したエネルギー準位が数多く存在し、基礎科学、応用ともに重要な位置付けにある。本研究は、これまでに開発してきた THz 帯フォノンを用いた波長可変 THz パラメトリック分光装置によって生体試料を含めた THz 帯の物性情報を収集するとともに、THz 帯フォノンをアクティブに制御・活用した小型・高性能の THz デバイスを創出し、THz 帯の超高速光通信や物質制御等に応用することにより、THz 帯の科学を大きく発展させ、情報通信から環境・生体センシングなどの応用分野をも含んだ新たな学際領域の創成を目指す研究である。

研究成果の概要

研究目的に対する研究成果を必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。

【フォノンを制御・活用したテラヘルツ (THz) 波発生デバイス】

(1) 強誘電体中のフォノン・ポラリトンを用いた THz 波発生デバイス

LiNbO₃ 結晶中のフォノン・ポラリトンを用いた THz 波パラメトリック発振器 (周波数可変性 0.7-3THz) を独自に開発している。さらに高効率化を図るため、擬似位相整合を用いた光波-THz 波間の位相制御と THz 波の伝搬損失の抑制を検討し、**周期分極反転 LiNbO₃ (PPLN) 結晶**を用いた表面放射型 THz 波発生デバイスを独自に設計・製作し、その動作を実証した。さらに、小型で超高速制御が可能な励起光源として、**超高速光通信デバイス** (1.5μm 帯の半導体レーザ、ファイバ光増幅器) に基づく波長可変 2 波長光源システムを独自に開発し、kW クラスの高ピーク出力をもつピコ秒光パルスを得た。この 2 波長を PPLN-THz 波発生デバイス中で差周波混合することにより、1-3THz 領域で周波数可変な**高繰り返し (>1MHz)**のピコ秒パルス THz 波発生に成功した (図 1)。また、この 2 波長光源システムを連続波 (CW) 動作させることにより、**狭線幅 (~1MHz)**の周波数可変 **CW-THz 波発生**にも成功した。

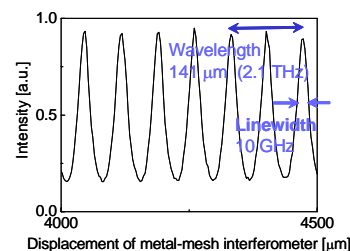
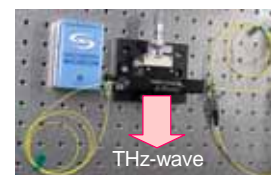


図 1 PPLN-THz 波発生モジュールと THz 波長の測定例

(2) 半導体中のフォノン・ポラリトンを用いた THz 波発生デバイス

また、半導体結晶中でのフォノン・ポラリトンを用いた THz 波発生の研究も独自に展開してきており、本プロジェクトでは材料探索とデバイス構造の検討を進めた。図 2 に示すように、GaP 結晶中で近赤外のナノ秒光パルスを差周波混合することにより、**0.2-7.5THz の広帯域周波数可変性**をもつ**高出力 (ピーク出力 1.5W)**のコヒーレント THz 波発生 (**線幅 1.5GHz = 0.05cm⁻¹**) に成功し、さらに**半導体レーザ励起 CW-THz 波発生**を実証した。また、GaP 以外の半導体結晶として GaSe や ZnGeP₂ を用いた THz 波発生も検討した。GaSe は複屈折性を有することから、THz 波が励起光源である近赤外光と同じ光軸上に発生させることが可能であり、THz 領域に存在する自由キャリア、不純物および光学フォノンに起因する吸収の低減により THz 波の発生効率を向上する。さらに、GaP については導波路構造を含むエネルギー閉込めにより、THz 波の発生出力の向上を見出した。

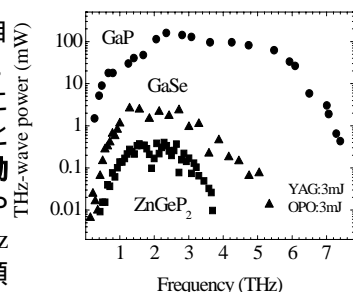


図 2 半導体中の差周波混合による THz 波発生特性

(3) フォノンを制御した無フォノン衝突テラヘルツ電子デバイス

独自に開発してきたトンネル走行時間効果 (TUNNETT) ダイオードは、フォノン衝突を介さないバリスティック電子輸送に基づく超高速発振が可能な電子デバイスであり、急峻な不純物分布を持たせた極薄のトンネル注入層とナノメートル精度で制御された走行層を持つ GaAs 結晶より構成される。この微細構造を実現するには、本研究グループが独自に有する原子レベルの膜厚制御性と低温での不純物高濃度添加成長技術 (GaAs の分子層エピタ

研究成果の概要 つづき

キシ)がキーテクノロジーとなる。本プロジェクトでは、TUNNETT ダイオードの THz 帯室温連続発振を目指して、微細走行層を実現するナノオダの薄膜成長技術の確立と共振器構造の最適化を検討した。図 3 に作製した TUNNETT 発振器の構造と検討した共振器のラインナップを示す。図 4 に示すように、基本波による室温連続波 (CW) 発振の記録を数回にわたって更新し、**室温 CW で世界最高レベルの 706GHz (基本波) の高周波発振**を実現し、0.8 mW (320GHz) の高出力化を実現した。また新たな知見として、TUNNETT ダイオードの走行層の厚みを制御することにより、出力の最適化が達成できることが分かった。

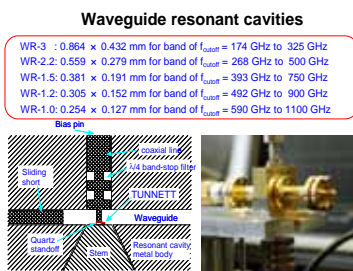


図 3 TUNNETT 発振器の構造と検討した共振器

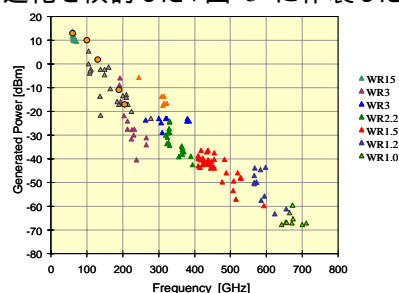


図 4 TUNNETT 発振器の基本波発振周波数と出力

【フォノン THz 波発生デバイスの分光応用】

フォノン THz デバイスを創出するとともに、これを用いて従来データベースが不足してきた固体・液体試料の THz 帯物性情報を収集することを骨子の 1 つとしている。そこで、上記の周波数可変 THz 波発生デバイスおよびフーリエ分光器を用いて、固体材料を中心に **THz 帯スペクトルデータの収集**を系統的に進めた。その中で、分子のマクロな構造 (分子の側鎖や骨格、分子間相互作用等) に関連した THz 帯に固有の振動ピーク、さらには分子中欠陥によるピーク (図 5 中の矢印) を新たに見出し、分子軌道計算等を用いて振動モードの帰属を検討した。

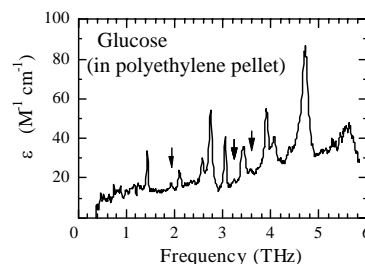


図 5 フォノン THz 波発生デバイスによる THz 分光測定例

【ラマン THz デバイスと分光応用】

THz 帯には赤外活性かつラマン活性な振動モードが多い点に着目し、THz 波の吸収が大きい極性液体試料の THz 帯振動計測を目的として、低損失な光波 (近赤外光) を用いたラマン THz デバイスの研究開発を行った。ここでは、複雑な相互作用のために理論解析が困難な液体試料の THz 帯振動モードについて、構造 (振動の対称性) に応じたスペクトル解析能力が高く、実験的に帰属に対する知見を与えるコヒーレント反ストークスラマン (CARS) 分光法と、自然ラマンスペクトルと同じスペクトル形状を与え、位相整合の必要ない利点をもつ誘導ラマン散乱 (SRS) 分光法を開発した。

(1) THz-CARS デバイス

パラメトリック光波長変換による広帯域波長可変光源と低周波計測用光フィルタリングを検討し、THz 帯の CARS (THz-CARS) 分光システムを開発した。これを用いて**液体試料**の計測を行い、**30-1700cm⁻¹ (0.9-51THz)**の超広帯域にわたる振動スペクトルを取得した。さらに偏光特性を利用して振動の対称性に基づくスペクトル解析を行うとともに、水溶液試料において**分子の THz 帯振動を高感度に検出**することに成功した (図 6(a))。さらに、コヒーレントな相互作用に基づく CARS 分光や SRS 分光では測定が困難になる**粉末試料**に対し、後方散乱型 CARS 分光により、高感度な THz 帯振動計測が可能であることを見出した (図 6(b))。また、本デバイスを強誘電体超格子構造に応用し、**周期に依存した特異な共鳴**を新たに検出し、その解析よりフォノン・ポラリトンを介した擬位相整合カスケード非線形効果であることを見出した。

(2) THz-SRS デバイス

THz 帯の SRS (THz-SRS) デバイスとして、ナノ秒光パルス (ポンプ光) と低雑音の CW レーザダイオード光 (信号光) を用いた**高分解能のラマン増幅分光システム**を構築した。これを液体試料の THz 帯振動分光に応用し、シャープな振動スペクトルを得ることに成功した (図 7)。また **GaP-AlGaP 導波路**に閉じこめたフォノン励起に基づき、**高い増幅率 (CW 励起で 4.2dB, パルス励起で 20dB)** および時間ゲート機能をもつラマン増幅器を実現した。さらに、光通波長帯 (1.5μm) への展開を図るため、新材料系の **Si および GaP-GaAs 導波路**についても検討を行った。

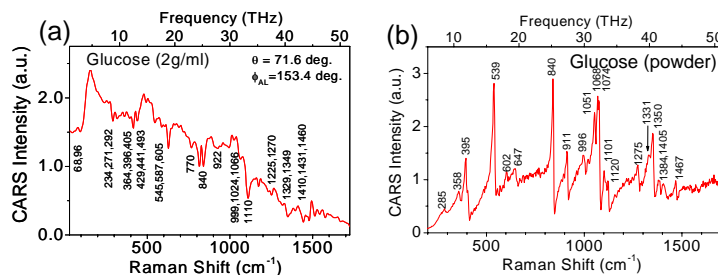


図 6 THz-CARS 分光測定例 (a) 溶液試料 (b) 粉末試料

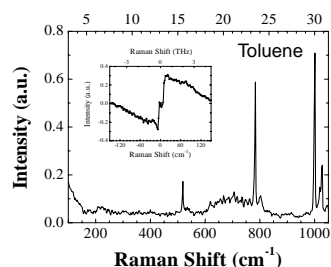


図 7 THz-SRS 分光測定例

特記事項

この研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。

【研究の背景】

西澤潤一博士により 1963 年、結晶や化合物の分子振動やフォノンを励起することによりテラヘルツ (THz) 帯の電磁波を発生する方法が世界に先駆けて提案された。この提案は 1979 年の西澤・須藤による**半導体ラマンレーザ**の実現を経て、1983 年にその発振波を用いて周波数 12.1 THz で 3 W という高出力のコヒーレント THz 波発生が実現される。その後、東北大学を中心とする本研究グループにおいて独自の研究が展開され、1991 年には須藤・西澤により半導体 GaP を用いた光導波路型ラマンレーザ、1998 年にはラマン増幅器が開発された。一方、強誘電体を用いたアプローチとして、1996 年に川瀬・伊藤により **LiNbO₃ 結晶を用いた THz 波パラメトリック発振器** (周波数可変性 1.0-2.0THz, ピーク出力 3mW) が開発され、1998-1999 年には四方・伊藤により LiNbO₃ の低温特性および MgO: LiNbO₃ の検討による THz 波の高出力化 (ピーク出力 50mW)・周波数可変域の広帯域化 (0.7-3.1THz) が達成され、2000 年には川瀬・四方・伊藤により光注入型 THz 波パラメトリック発生器 (ピーク出力 300mW, 線幅 97MHz) が開発された。また、1958 年に西澤により提案された **TUNNETT ダイオード** は、その製造方法として蒸気圧制御温度差液相成長技術を経て GaAs 分子層エピタキシャル成長法を採用することにより、基本波の室温連続発振で 322GHz を実現し、THz 帯に到達する可能性を十分に秘めていることが分かった。THz 波の新しい応用展開として、2000 年に西澤により **THz 波照射による癌の診断・治療の提案** がなされ、THz 波の医学・生化学等への応用が示された。

【学術創成研究の成果】

このように、コヒーレント THz 波光源と応用分野の開拓において先駆的な研究を行ってきた東北大学を中心とする仙台の研究グループにより、THz 帯のフォノンを焦点とした新しい THz デバイスの創出と応用に関する先導的研究により、新しい学際分野「フォノン・テラヘルツ工学」の創成を目的とした学術創成研究「フォノン工学」プロジェクトを展開し、以下の特筆すべき成果を得た：

世界最高性能のフォノン THz デバイスの創出

- **半導体 GaP 結晶** のフォノン・ポラリトンを用いた差周波 THz 波発生により、0.2-7.5 THz という世界に類を見ない広帯域にわたって単色の THz 波を周波数可変に発生させることに成功し、ピーク出力 1.5 W の高出力と狭線幅 1.5GHz (0.05cm⁻¹) を実現した。さらに、半導体レーザ励起による連続波 (CW) の THz 波発生にも成功した。
- **強誘電体 LiNbO₃ 結晶** のフォノン・ポラリトンを用いた差周波 THz 波発生では、周期分極反転結晶による擬似位相整合と超高速光通信デバイスとの融合により、1-3THz 域の周波数可変性をもち 1MHz 以上の超高繰り返しパルス動作 (線幅 10GHz) から CW-THz 波発生 (線幅 ~ 1MHz) まで可能な、世界に類を見ない小型・高機能な THz 波発生デバイスが実現した。
- **TUNNETT ダイオード** は室温連続発振において基本波の高周波極限の記録を度々更新し、最終的に世界最高レベルの 706GHz に到達し、320GHz 動作では 0.8mW の高出力を実現した。
- **半導体ラマン増幅器** は高い増幅率 (CW 励起で 4.2dB, パルス励起で 20dB) を実現した。フォノン共鳴に基づく増幅のバンド幅は約 20GHz であり、WDM 光通信応用では 10THz 当り 500 チャンネルの超高密度が可能であり、さらにパルス励起では時間ゲート機能の付加も可能である。

新たな THz 帯振動スペクトルのデータベース構築と新しい知見

- 創出したフォノン THz 波発生デバイスとラマン THz デバイスにより、これまでデータが不足してきた有機分子・生体関連分子 (固体・液体試料) や無機固体材料の **THz 帯振動スペクトル** について、新しいデータベースの構築を行った。
- そこで、数々の **新しい THz 帯共鳴** が見出された。これは主にマクロな分子構造に帰属すると考えられ、分子の機能に深く関与した新たな指紋領域としての THz 帯スペクトルの応用展開の可能性を秘めている。また、周期構造や微小領域中でのフォノンの特異な挙動についても新たな知見を得た。

【学術創成研究の波及効果】

このように本プロジェクトでは、THz 領域の科学技術において世界をリードする研究成果を得た。先駆的な医学分野への応用研究として、文部科学省リーディングプロジェクト「未踏光学 (テラヘルツ光学) 開発・創生プロジェクト」では、フォノン・ポラリトンを用いた周波数掃引型 THz 光源・分光装置が実用化し、TUNNETT は低雑音で小型・簡便な THz イメージング用光源としての研究が展開されている。また、これらのデバイスはすべて室温で動作し、次世代の THz 帯通信への展開も期待される。

研究成果の発表状況

この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について、3頁以内に収めて記入してください。

【学術論文】

1. Y. Sasaki, Y. Avetisyan, H. Yokoyama, and H. Ito, "Surface-emitted terahertz-wave difference-frequency generation in two-dimensional periodically poled lithium niobate," *Opt. Lett.*, Vol. 30, No. 21, pp. 2927-2929 (2005).
2. Y. Sasaki, H. Yokoyama and H. Ito, "Surface-emitted continuous-wave terahertz radiation using periodically poled lithium niobate," *Electron. Lett.*, Vol. 41, No. 12, pp.712-713 (2005).
3. 四方潤一, 鈴木要, 伊藤弘昌, "光波を用いた生体分子のテラヘルツ・センシング," *光技術コンタクト*, Vol. 43, No. 4, pp. 34-42 (2005).
4. P. E. Powers, R. A. Alkuwari, J. W. Haus, K. Suizu and H. Ito, "Terahertz generation with tandem seeded optical parametric generators", *Opt. Lett.*, Vol. 30, No. 6, pp. 640-642 (2005).
5. K. Suto and J. Nishizawa, "Widely frequency-tunable terahertz wave generation and spectroscopic application," *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 26, pp. 937-952 (2005).
6. T. Tanabe, Y. Kozawa, K. Suto, J. Nishizawa, and Y. Oyama, "Observing the stimulated Raman gain spectra of solutions using an infrared pump pulse with narrow linewidth and a low-noise cw probe laser," *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 26, pp. 881-892 (2005).
7. K. Suto, T. Sasaki, T. Tanabe, K. Saito, J. Nishizawa, and M. Ito, "GaP THz-wave generator and THz spectrometer using Cr:Forsterite lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, 123109 (2005).
8. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, T. Sasaki, H. Yasuda, and Y. Oyama, "Terahertz-wave generation using GaSe crystals with different carrier densities," *Inst. Phys. Conf. Series: Compound Semiconductors*, Vol. 184, pp. 85-88 (2005).
9. J. Nishizawa, P. Plotka, H. Makabe and T. Kurabayashi, "290-393 GHz CW fundamental-mode oscillation from GaAs TUNNETT diode," *Electron. Lett.*, Vol.41, No. 7, pp. 441-442 (2005).
10. J. Nishizawa, P. Plotka, H. Makabe and T. Kurabayashi, "GaAs TUNNETT Diodes Oscillating at 430-655 GHz in CW Fundamental Mode", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, No. 9, pp. 597-599 (2005).
11. Y. Sasaki, H. Yokoyama, and H. Ito, "Dual-wavelength optical-pulse source based on diode lasers for high-repetition-rate, narrow-bandwidth terahertz-wave generation," *Opt. Expr.*, Vol. 12, No. 14, pp. 3066-3071 (2004).
12. 田邊匡生, 佐々木哲朗, 須藤建, "半導体によるテラヘルツ波の発生," *オプトロニクス*, Vol. 23, pp. 127-134 (2004).
13. 須藤建, 田邊匡生, 西澤潤一, 佐々木哲朗, "半導体結晶を用いたテラヘルツ電磁波光源の開発とその応用," *日本金属学会誌 までりあ*, Vol. 43, pp. 304-311 (2004).
14. S. Saito, J. Nishizawa, K. Suto, and T. Kimura, "The Structure and Maximal Gain of CW-Pumped GaP-AlGaP Semiconductor Raman Amplifier With Tapers on Both Sides," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol. 16, pp. 48-50 (2004).
15. S. Saito, K. Suto, T. Kimura, and J. Nishizawa, "80-ps and 4-ns Pulse-Pumped Gains in a GaP-AlGaP Semiconductor Raman Amplifier," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol. 16, pp. 395-397 (2004).
16. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, and T. Sasaki, "Characteristics of Terahertz-wave generation from GaSe crystals," *Journal of Physics D: Applied Physics* 37, pp. 155-158 (2004).
17. 西澤潤一, 倉林徹, "分子層エピタキシャル成長とそのテラヘルツデバイスへの展開," *日本金属学会誌 までりあ*, Vol. 43, pp. 504-514 (2004).
18. T. Suhara, Y. Avetisyan, and H. Ito, "Theoretical analysis of laterally emitting terahertz-wave generation by difference-frequency generation in channel waveguides," *IEEE J. Q. Electron.*, Vol. 39, No.1, pp. 166-171 (2003).
19. J. Shikata, K. Kawase, and H. Ito, "The generation and linewidth control of terahertz waves by parametric processes," *Electron. Commun. Jpn.: Part 2*, Vol. 86, No. 5, pp. 52-65 (2003).
20. K. Kawase, J. Shikata and H. Ito, "Widely tunable THz-wave generation using nonlinear optics," in *Solid-State Mid Infrared Laser Sources*, eds. I. T. Sorokina and K. L. Vodopyanov, Springer-Verlag, Berlin/Heiderberg, pp.397-423 (2003).
21. T. Tanabe, K. Suto, T. Saito, T. Kimura, Y. Oyama, and J. Nishizawa, "Characteristics of time-gated Raman amplification in GaP-AlGaP semiconductor waveguides," *J. Appl. Phys.*, Vol. 93, pp. 43-46 (2003).
22. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, T. Kimura, K. Saito, "Frequency Tunable High Power Terahertz Wave Generation from GaP," *J. Appl. Phys.*, Vol. 93, pp. 4610-4615(2003).
23. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, K. Saito, T. Kimura, "Frequency-tunable terahertz wave generation via excitation of phonon-polaritons in GaP," *J. Phys. D*, Vol. 36, pp. 953-957 (2003).
24. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, K. Saito, T. Kimura, "Tunable Terahertz Wave Generation in the 3- to 7-THz region from GaP," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 237-239 (2003).
25. T. Tanabe, T. Kimura, T. Ohtani, K. Suto and J. Nishizawa, "Raman spectra of GaPAs-GaP heterostructure waveguides," *Mat. Sci. Semiconductor Process.*, Vol. 6, pp. 445-447 (2003).

研究成果の発表状況

この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について、3頁以内に収めて記入してください。

26. S. Saito, T. Kimura, T. Tanabe, K. Suto, Y. Oyama, and J. Nishizawa, "Fabrication and Characteristics of GaP-AlGaP tapered semiconductor Raman amplifiers," J. Lightwave Technol., Vol. 21, pp. 170-175 (2003).
27. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, K. Saito, and T. Kimura, "Frequency-tunable terahertz wave generation via excitation of phonon-polaritons in GaP and beam properties," Inst. Phys. Conf. Series: Comp. Semiconduct., Vol. 176, pp. 193-196 (2003).
28. T. Tanabe, K. Suto, and J. Nishizawa, "Terahertz lattice vibration utilized for semiconductor devices," Metals Materials and Processes, Vol. 15, pp. 219-224 (2003).
29. P. Plotka, J. Nishizawa, T. Kurabayashi, and H. Makabe, "240-325-GHz GaAs CW fundamental-mode TUNNETT diodes fabricated with molecular layer epitaxy," IEEE Trans. Electron Devices, Vol.50, No.4, pp. 867-873 (2003).
30. J. Nishizawa, T. Kurabayashi, P. Plotka, H. Kikuchi, T. Hamano, "Growth Rate Reduction in Self-Limiting Growth of Doped GaAs by Molecular Layer Epitaxy," Mat. Sci. Semiconduct. Process., Vol. 6, pp. 429-431 (2003).
31. Y. Sasaki, Y. Avetisyan, K. Kawase, and H. Ito, "Terahertz-wave surface-emitted difference frequency generation in slant-stripe-type periodically poled LiNbO₃ crystal," Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 18, pp. 3323-3325 (2002).
32. 谷内哲夫, 四方 潤一, 伊藤 弘昌, "非線形光学効果による広帯域波長可変テラヘルツ電磁波放射," レーザ研究, Vol. 30, No.7, pp.365-369 (2002) .
33. K. Karino, J. Shikata, K. Kawase, H. Ito, and I. Sahashi, "THz-wave parametric generation characteristics of MgO:LiNbO₃," Electron. Commun. Jpn.: Part 2, Vol. 85, No. 4, pp. 22-29 (2002).
34. 四方 潤一, 川瀬 晃道, 伊藤 弘昌, "テラヘルツ波の発生と制御 (招待論文)," 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J85-C, No. 2, pp. 52-63 (2002) .
35. K. Kawase, J. Shikata, H. Ito, "Terahertz wave parametric source (Topical Review)," J. Phys. D, Vol. 35, No. 3, pp. R1-R14 (2002).
36. J. Shikata, K. Kawase, T. Taniuchi, and H. Ito, "Fourier-transform spectrometer with a terahertz-wave parametric generator," Jpn. J. Appl. Phys., Part I, Vol. 41, No. 1, pp. 134-138 (2002).
37. K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, "Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability," Appl. Phys. Lett, Vol. 80, No. 2, pp. 195-197 (2002).
38. J. Nishizawa, T. Kurabayashi, P. Plotka, H. Kikuchi, and T. Hamano, "Self-Limiting Growth of GaAs with doping by Molecular Layer Epitaxy Using Triethyl-gallium and AsH₃," J. Crystal Growth, Vol.244, pp. 236-242 (2002).
39. J. Nishizawa, H. Makabe, F. matsumoto, P. Plotka, and T. Kurabayashi, "Oscillation frequency control of 60 GHz-band TUNNETT diodes," Electron. Lett., Vol. 38, No. 13, pp. 660-661 (2002).
40. J. Nishizawa, P. Plotka, and T. Kurabayashi, "Ballistic and tunneling GaAs static introduction transistor nano-devices for THz electronics," IEEE Trans. Electron. Devices, Vol. 49, No. 7, pp. 1102-1111 (2002).
41. K. Kawase, J. Shikata, K. Imai, and H. Ito, "Transform-limited, narrow-linewidth, terahertz-wave parametric generator," Appl. Phys. Lett., Vol. 78, No. 19, pp. 2819-2821 (2001).
42. Y. Avetisyan, Y. Sasaki, H. Ito, "Analysis of THz-wave surface-emitted difference-frequency generation in periodically-poled lithium niobate waveguide," Appl. Phys. B, Vol. 73, pp. 511-514 (2001).
43. H. Ito, "Periodically poled LiNbO₃ OPO for generating mid IR to terahertz waves," Ferroelectrics, Vol. 253, pp. 95-104 (2001).

他 20 編

【国際会議】(は招待講演)

- H. Ito, "DAST crystal: Looking to the Future" (*invited*), International Symposium on Frontiers in Organic Photonics, I-1, Sendai, Japan (2006).
- K. Suizu, A. Nawahara, T. Yamashita, and H. Ito, "Random frequency accessible broad tunable THz-wave source using phase-matched DAST crystal DFG" (*invited*), Photonics West 2006, 6103-10, San Jose, USA (2006).
- H. Ito, "Novel Tunable THz sources and their Applications" (*invited*), Mid-Infrared Coherent Sources (MICS 2005), Barcelona, Spain (2005).
- J. Nishizawa, K. Suto, T. Tanabe, and T. Sasaki, "Development of high-power widely frequency-tunable terahertz-waves using phonons in semiconductors" (*invited*), The International workshop on terahertz technology 2005 (TeraTech '05), Osaka, Japan (2005).
- H. Ito, Y. Sasaki, Y. Suzuki and H. Yokoyama, "Surface-emitted continuous THz-wave generation from PPLN" (*invited*), Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2005), CTuBB1, Baltimore, USA (2005).
- H. Ito, H. Minamide, and Y. Sasaki, "Tunable monochromatic tera-photonics sources towards CW operation" (*invited*), Optical Terahertz Science and Technology (OTST), No. MC1, Orland, USA (2005).
- K. Suto and J. Nishizawa, "Widely Frequency-Tunable Terahertz Wave Generation and Spectroscopic Application" (*plenary, invited*), 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW 2004/THz 2004), Karlsruhe, Germany (2004).

研究成果の発表状況

この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について、3頁以内に収めて記入してください。

K. Suto and J. Nishizawa, "Developments of terahertz wave generation technologies" (*invited*), International Conference on Micro- and Nanoelectronics 2003 (ICMNE 2003), Moscow, Russia (2003).
 J. Nishizawa and K. Suto, "Terahertz wave generation and light amplification using Raman effect" (*invited*), Twelfth International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices (IWPSD 2003), Chennai, India (2003).
 J. Nishizawa and K. Suto, "Developments of Terahertz wave region and its future" (*plenary, invited*), 11th IEEE International Conference on Terahertz Electronics (THz 2003), Sendai, Japan (2003).
 K. Kawase, K. Imai, H. Minamide, J. Shikata and H. Ito, "Injection-seeded THz-wave parametric generator" (*invited*), IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS2002), No. WU-1, Glasgow, UK (2002).
 H. Ito, T. Taniuchi, and K. Kawase, "Tunable Tera-Hertz Wave Generation and its Application" (*invited*), The Fifth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2002), No. J-1, Tokyo, Japan (2002).

1. J. Shikata, Y. Suzuki, H. Minamide, and H. Ito, "Widely-tunable, confocal coherent anti-Stokes Raman spectrometer for THz-frequency modes in biomolecules," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2006), JTuD55, Long Beach, USA (2006).
2. T. Tanabe, A. Kenmochi, Y. Oyama, K. Suto, and J. Nishizawa, "Attenuated total reflection spectroscopy of liquids using GaP terahertz spectrometer," The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2005), Williamsburg, USA (2005).
3. J. Nishizawa, K. Suto, T. Sasaki and T. Tanabe, "Frequency-tunable terahertz wave generation from GaP using Cr:forsterite laser," The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2005), Williamsburg, USA (2005).
4. J. Shikata, Y. Suzuki, H. Sagayama, T. Sato, H. Minamide, and H. Ito, "Rapidly tunable coherent anti-Stokes Raman spectrometer for terahertz-frequency modes in biomolecules and symmetric analysis," International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), CWM4-5, Tokyo, Japan (2005).
5. J. Nishizawa, K. Suto, T. Sasaki, and T. Tanabe, "Performance of spectroscopic measurement using widely frequency-tunable terahertz-wave pumped at 1 or 1.2 μm region," International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Tokyo, Japan (2005).
6. J. Shikata, S.-L. Zhao, Y. Suzuki, Y. Sasaki, H. Ito, and Y.-Y. Zhu, "Optical generation and detection of THz polariton via quasi-phase-matched cascade nonlinear processes," Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2005), CWM7, Baltimore, USA (2005).
7. Y. Sasaki, Y. Suzuki, H. Yokoyama and H. Ito, "Surface-emitted THz-wave generation from two-dimensional PPLN," Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2005), CTuBB3, Baltimore, USA (2005).
8. K. Saito, T. Tanabe, Y. Oyama, K. Suto, T. Kimura, and J. Nishizawa, "Terahertz-wave absorption in GaP crystals with different carrier densities," The 2nd International Symposium on Point Defect and Nonstoichiometry (ISPN 2005), Kaohsiung, Taiwan (2005).
9. A. Kenmochi, T. Tanabe, Y. Oyama, K. Suto, and J. Nishizawa, "Terahertz-wave generation from GaSe crystals and its crystallinity," The 2nd International Symposium on Point Defect and Nonstoichiometry (ISPN 2005), Kaohsiung, Taiwan (2005).
10. T. Tanabe, A. Kenmochi, Y. Oyama, K. Suto, J. Nishizawa, "Dependence of crystallinity on terahertz wave output power from GaSe," The International workshop on terahertz technology 2005 (TeraTech '05), Osaka, Japan (2005).
11. Y. Sasaki, Y. Suzuki, H. Yokoyama, and H. Ito, "Surface-emitted terahertz-wave from PPLN optical waveguide," The Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW 2004/ THz 2004), M5.4, Karlsruhe, Germany (2004).
12. T. Tanabe, K. Suto, Y. Kozawa, J. Nishizawa, Y. Oyama, "Stimulated Raman gain spectroscopy of solutions by nanosecond pulsed and cw probe IR laser," 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW 2004/THz 2004), Karlsruhe, Germany (2004).
13. J. Shikata, S.-L. Zhao, T. Matsumoto, Y. Suzuki, Y. Sasaki, and H. Ito, "New phonon resonance in periodically poled lithium niobate," The 8th International Symposium on Ferroic Domains and Micro- to Nano-scopic Structures (ISFD-8), S08-Thp06, Tsukuba, Japan (2004).
14. J. Shikata, T. Matsumoto, S.-L. Zhao, Y. Suzuki, and H. Ito, "Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy for THz-frequency modes of biomolecules in aqueous solution," Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2004), CThT36, San Francisco, USA (2004).