

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04277

研究課題名（和文）二次元周期回折構造を有するプラズモニックTHzディテクタの研究

研究課題名（英文）Plasmonic THz Detector with 2D Periodic Diffraction Structure

研究代表者

佐藤 昭 (Satou, Akira)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：70510410

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：InGaAsチャネルHEMTベースのプラズモニックTHzディテクタに関して、金属ナノアンテナを新たに導入した二次元回折格子構造プラズモニックTHzディテクタにおけるプラズモン二次元流体的性質を活用したTHz波検出原理の解明を、シミュレーションおよびデバイス試作・検出測定評価によって行なった。プラズモンの二次元流体的性質によって、従来では成し得なかったチャネル幅方向偏光THz波の検出が可能であることを実証し、ナノアンテナ構造の設計によって検出感度の偏光特性を制御できることを示した。これにより、プラズモン二次元流体的性質を活用したプラズモニックTHzディテクタの素子設計論の創出を果たした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によって、これまでほとんど理解が進んでいなかった二次元プラズモンの二次元流体的性質の一端が解明され、THzディテクタ応用への有用性が示された。今後は、二次元プラズモンを用いたTHz発振デバイス・変調デバイス・偏波変換デバイスなどにおける有用性の研究にも広がっていくと期待できる。加えて、本研究成果によってプラズモニックTHzディテクタの高機能化・高性能化の見通しが得られたため、今後は室温動作・集積化可能で高感度・低雑音・高速応答可能なディテクタの実現につながり、THz無線通信・イメージングの産業化が飛躍的に進むと見込まれる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a novel plasmonic THz detector, based on an InGaAs-channel HEMT, with a two-dimensional diffraction-grating structure (metallic nano-antennas) and conducted simulations and THz detection measurement for fabricated devices to reveal its THz detection mechanism that utilizes two-dimensional natures of the two-dimensional plasmons. We demonstrated that THz waves with polarization in the channel-width direction can be detected by the two-dimensional natures of the plasmons, which cannot be accomplished by conventional plasmonic THz detectors, and we showed that the polarization characteristic of the detector responsivity can be controlled by the design of the nano-antennas. With this, we created the device design principle of plasmonic THz detectors that utilize plasmonic two-dimensional natures.

研究分野：テラヘルツ波デバイス

キーワード：プラズモン テラヘルツ検出

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 波を用いた無線通信・イメージング応用のため、室温動作・集積化可能で高感度・低雑音・高速応答可能な半導体検出デバイス (ディテクタ) が渴望されている。しかし、従来の電子走行型・電子遷移型ディテクタでは全ての要件を満たすことは未だ実現していない。

このような背景から申請者は、従来型ディテクタと全く異なる二次元プラズモン励起を動作原理とする THz 波ディテクタ (プラズモニック THz ディテクタ) の研究を行ってきた。同ディテクタでは、二次元電子チャンネル内プラズモンが有する流体非線形性による光整流効果を検出原理とする。独自の非対称二重回折格子構造を有する InGaAs チャンネル高電子移動度トランジスタをベースにしたディテクタ (図 1) では、サブ波長構造の金属回折格子によって THz 電磁波-二次元プラズモン変換を実現する。さらに、二重回折格子の非対称配置によって巨大な光整流電流が生成されるとともに、回折格子をゲート電極として用いてチャンネル内電子密度分布を制御することにより光電流-光電圧変換が果たされ、高い検出感度が実現される。

一方、同ディテクタではチャンネル幅方向、すなわち回折格子に平行な方向に偏光を持つ THz 波の検出ができず、また実用化にはさらなる高感度化も必要である。これらの課題を克服するためには、THz 電磁波-二次元プラズモン結合やプラズモン非線形性をより深く理解し、それらの性質を極限まで活用する必要がある。これまでは、チャンネル長さ方向にのみ振動・伝搬するプラズモンの一次元的な性質しか考えられておらず、チャンネル幅方向の振動・伝搬をも含めたプラズモンの二次元流体的性質の理解および積極的活用については、ほとんど進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究では、従来の非対称二重回折格子構造プラズモニック THz ディテクタの片方の格子をゲート電極として残しつつ、新たにチャンネル幅方向にも周期回折構造を持たせた金属二次元周期回折構造 (図 2) を導入することで、①チャンネル幅方向偏光を持つ入射 THz 波と幅方向振動プラズモンの結合を果たし、プラズモンの電界分布の二次元的広がりを介して長さ方向振動を誘起することで、幅方向偏光 THz 波の検出が可能であること、ならびに②幅方向振動が加わることによって発現する新たな流体非線形項を活用することにより、光整流電流を増大せしめ、検出感度の向上を果たせることを実証する。二次元流体モデルに基づくシミュレータを用いて上記のプラズモン二次元流体的性質を活用した THz 波検出原理を解明するとともに、同構造を有するディテクタの試作・検出測定により検出原理を実験的に実証する。もって、プラズモン二次元流体的性質を活用したプラズモニック THz ディテクタの素子設計論を創出する。

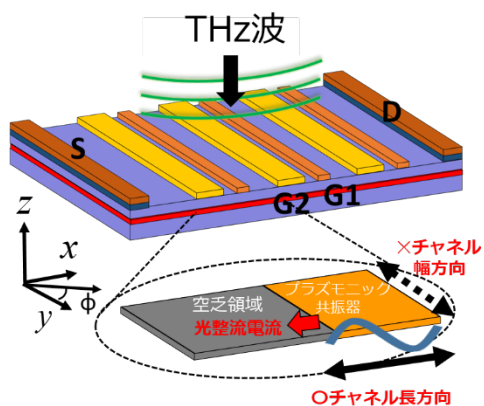


図 1. 従来型の一次元回折格子構造プラズモニック THz ディテクタの模式図と動作原理。

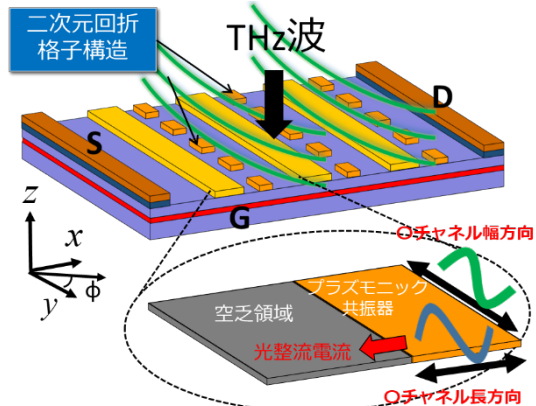


図 2. 本研究で提案する二次元回折格子構造プラズモニック THz ディテクタの模式図と動作原理。

3. 研究の方法

本研究では、二次元周期回折構造を導入したプラズモニック THz ディテクタにおける、①プラズモン二次元流体的性質を活用したチャンネル幅方向直線偏光 THz 波の検出、ならびに②新規非線形性発現による光整流電流増大効果の、二次元流体モデルに基づくシミュレータによる解析と試作・検出測定による実証を行ない、それらの物理原理を明らかにする。具体的には以下に示す項目を実施する。

第一に、二次元流体方程式と三次元マクスウェル方程式を連成させたモデルに基づくシミュレータを開発する。本モデルでは、二次元周期回折構造と二次元電子チャンネルが完全に平面であると仮定することで、 x - y 平面での二次元フーリエ変換・逆変換を用いてこれらの偏微分方程式系を線形方程式系に帰着する。市販の三次元電磁界シミュレータよりも計算時間が短く効率的な解析が可能であり、任意形状の二次元周期回折構造を解析することができる。図 3 に本モデルを示す。

マクスウェル方程式

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = -4\pi e \{ [N^{(ch)} - N_0] \delta(z) + [N^{(M)} - N_{M0}] \delta(z-d) \}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \left[\mathbf{J}^{(ch)} \delta(z) + \sigma_{M0} \mathbf{E} \Big|_{z=d} \delta(z-d) \right] + \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

流体力学方程式

$$\mathbf{J}^{(ch)} = -e N^{(ch)} \mathbf{v}^{(ch)}$$

$$\frac{\partial N^{(ch)}}{\partial t} + \nabla_{xy} \cdot (N^{(ch)} \mathbf{v}^{(ch)}) = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \right) \mathbf{v}^{(ch)} + (\mathbf{v}^{(ch)} \cdot \nabla_{xy}) \mathbf{v}^{(ch)} = -\frac{e}{m} \mathbf{E} \Big|_{z=0}$$

時間領域では摂動、
空間領域では級数展開

面内電界に関する線形方程式系

$$\mathbf{A} \times \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{E}_{1,k_x,k_y}^{(ch)} \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{1,k_x,k_y}^{(g)} \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{1,k_x,k_y}^{(na)} \\ \vdots \end{bmatrix} = \mathbf{B} \times \mathbf{E}^{(in)}$$

\mathbf{A} : $2(N^{(ch)}+N^{(g)}+N^{(na)}) \times 2(N^{(ch)}+N^{(g)}+N^{(na)})$ 行列
 \mathbf{B} : $2(N^{(ch)}+N^{(g)}+N^{(na)}) \times 2$ 行列
 $\mathbf{E}^{(in)}$: 入射THz波の電場
 $N^{(l)}$: 級数展開のカットオフ

$\mathbf{E}(t, x, y, z)$ & $\mathbf{H}(t, x, y, z)$: 電場 & 磁場
 $N_{ch}(t, x, y)$: 電子密度
 $\mathbf{J}_{ch}(t, x, y)$: 電流密度
 $\mathbf{v}_{ch}(t, x, y)$: 電子速度

図 3. 二次元回折格子構造プラズモニック THz ディテクタのシミュレーションモデル.

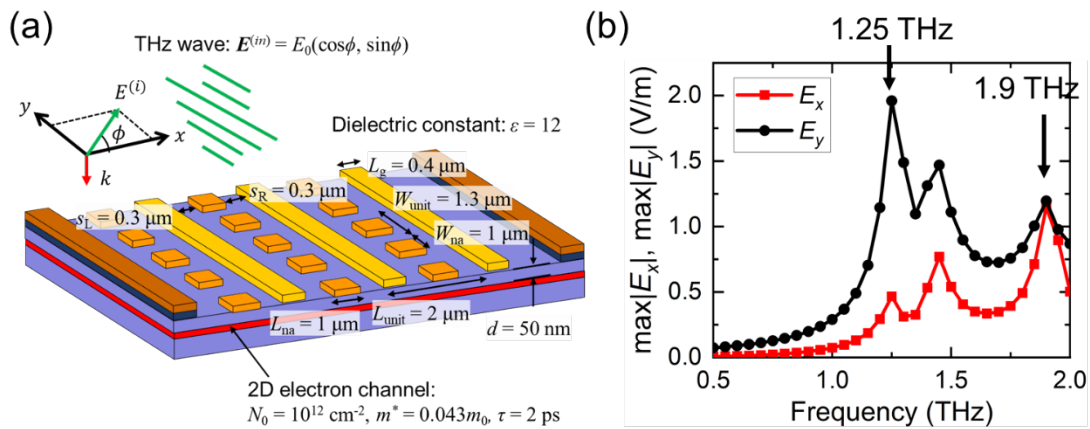


図 4. (a) 二次元回折格子構造プラズモニック THz ディテクタの模式図とシミュレーションに用いた構造パラメータ, (b) y 方向偏光を持つ THz 波を入射した場合のチャンネル内振動電界強度の周波数特性.

第二に、開発したシミュレータを用いて、図 2 に示す長方形型の二次元周期回折構造（金属ナノアンテナ）について入射 THz 波に対するプラズモンの線形応答を解析することで、幅方向振動電場—長さ方向振動電場の振幅比で定める結合効率の形状および構造パラメータ、入射 THz 波偏光状態（構造に対する偏光の向きおよび直線偏光／楕円偏光の別）および周波数への相関を理論的に明らかにし、結合効率を決める要因を同定する。さらに、新規流体非線形性項によって生じる光整流電流の解析を行なう。

第三に、長方形型の二次元周期回折構造（図 2）を有するプラズモニック THz ディテクタを試作する。InP 系 HEMT デバイスプロセス技術をベースとし、電子ビームリソグラフィーによる二次元周期回折構造作製法を確立する。

第四に、直線偏光 THz 波の偏光方向を変化させてディテクタに入射し検出測定を行なうことで、幅方向偏光 THz 波と幅方向振動プラズモンの結合およびプラズモン二次元電界分布を介した長さ方向振動誘起による検出を実証する。

4. 研究成果

二次元流体方程式と三次元マクスウェル方程式を連成させ、二次元フーリエ変換・逆変換に基づくシミュレータの開発を行なった。行列要素の計算に時間がかかることが判明したため、スーパーコンピュータ上で並列計算するプログラムを作成した。金属ナノアンテナを有するプラズモニック THz ディテクタに THz 波を垂直入射した場合の二次元プラズモンモード励起のシミュレーションを行なった。シミュレーションに用いたデバイスパラメータを図 4(a) に示す。シミュレーションの結果、入射波の周波数がチャンネル長方向・幅方向プラズモンのモード周波数と一致する場合、幅方向モード・長方向モードの結合が強く起こり、それぞれの電界強度がほぼ同等になることを示した（図 4(b)）。

また、新規流体非線形性項によって生じる長さ方向の光整流電流の式を導出したところ、幅方向モードと長さ方向モードを掛け合わせた項がゼロにならずに残り、なおかつ他の項と同程度の大さきであることを確認した。現在、光整流電流の計算ができるようにシミュレータの拡張を完了しており、二次元回折格子構造導入による光整流電流増大の解析を進めている。

次に、金属ナノアンテナを有する二次元回折格子構造プラズモニック THz ディテクタの試作を行ない、電子ビームリソグラフィーによるデバイス作製法を確立した。ナノアンテナサイズお

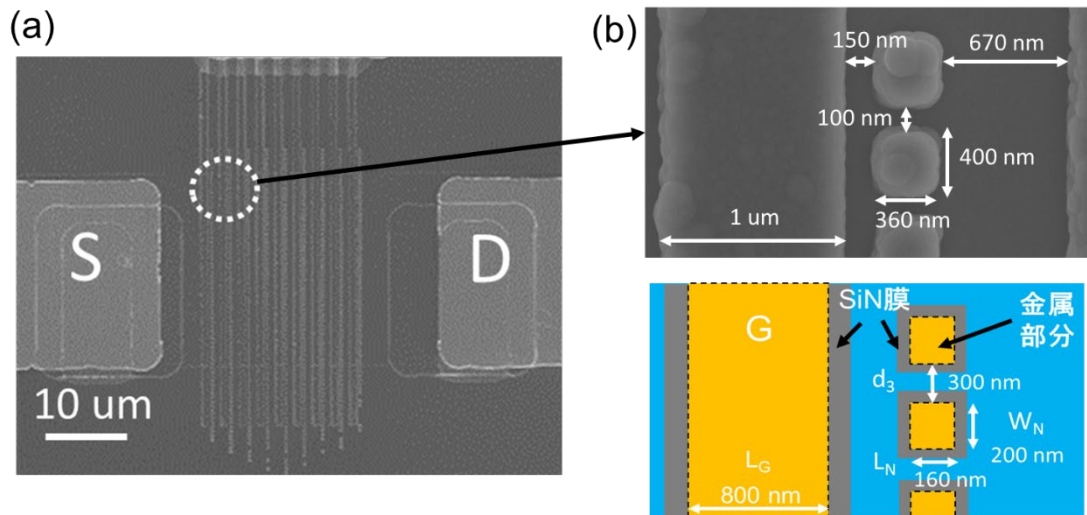


図 5. (a)試作した二次元回折格子構造プラズモニック THz デテクタの走査電子顕微鏡像 (全体)、(b) 走査電子顕微鏡像 (拡大) と設計パラメータ.

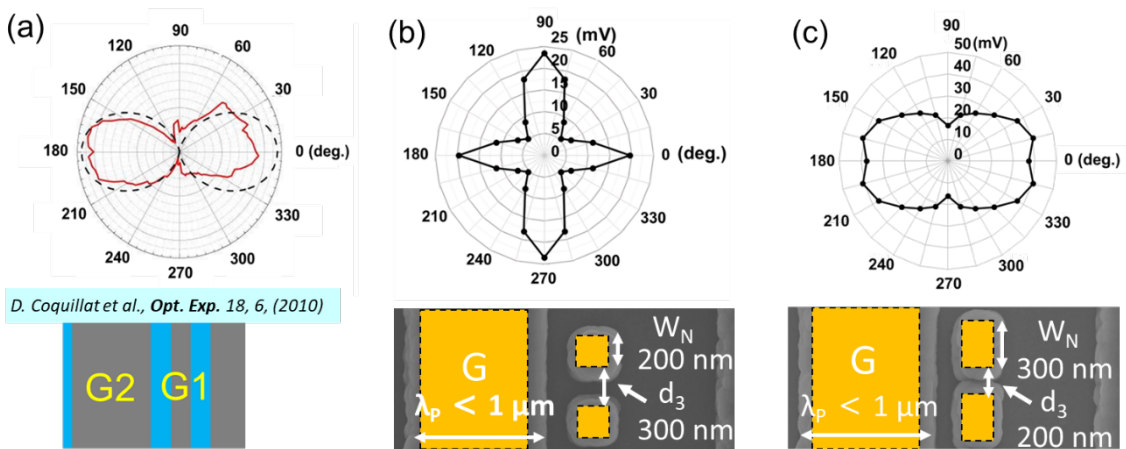


図 6. (a)従来型一次元回折格子構造ディテクタにおけるテラヘルツ波入射時の出力起電圧—偏光特性、(b)(c)ナノアンテナサイズの異なる二次元回折格子構造ディテクタにおける偏光特性.

よび間隔の寸法誤差は 20 nm 程度以下に抑えられることが分かった. 図 5 に, 走査電子顕微鏡で撮像した試作デバイスを示す. 図 5(b)の像に付した測長結果と, ゲート電極形成後に堆積させた SiN パッシベーション膜の膜厚~100 nm を考慮すると, 高精度で設計通りのデバイスの作製に成功したと言える.

次に, 試作したディテクタを用いて直線偏光 THz 波 (0.8 THz) に対する検出測定を行なった. 理化学研究所所有の光注入型 THz 波パラメトリック発生器 (injection-seeded THz-wave Parametric Generator; is-TPG) によって中心周波数は 0.8 THz, 包絡線パルス幅約 100 ps, パルス繰返し周期 5 ms, 平均パワー0.5~3 W の準パルス CW THz 光を生成し, THz レンズと ITO ミラーを用いてステージ上のディテクタに垂直に入射させた. ディテクタから出力されたパルス光起電圧信号は, 広帯域 RF 増幅器を介してオシロスコープで観測した. なお, ディテクタにはドレイン電圧無印加, ゲート電圧をしきい値付近まで印加して, 室温下にて測定を行なった. 直線偏光の入射波に対し, 二つのワイヤグリッドポーラライザを用いて 0-90 度まで偏光角の調節を行なうことで, 出力ピークの入射 THz 波に対する偏光特性を測定した.

新しく導入した二次元回折構造の影響を考えるため, 従来型一次元回折格子構造ディテクタとの偏光特性の比較を行なった. 図 6(a)に, 従来型一次元回折格子構造ディテクタの偏光特性[既報: Coquillat *et al.*, *Opt. Exp.* 18, 6024 (2010)]を示す. 入射 THz 光偏光がチャンネル長方向の場合にピークを持ち, チャンネル幅方向の場合にほとんど出力がほぼゼロとなる八の字型の特性であることが分かる. 対して, 本研究で試作した二種類の二次元回折格子構造ディテクタにおいては八の字型とは異なる偏光特性を持つことが確認された(図 6(b), (c)). これは, プラズモニック THz ディテクタにおいて偏光特性が金属ナノアンテナによって制御できる可能性を, 世界で初めて実証した結果である. 図 6(b)においては, 入射 THz 波の偏光方向がチャンネル長方向とチャンネル幅方向に一致するとき, 出力光電圧が極大となる十字型の特性が示されており, チャンネル幅方向の偏光の場合に, その方向に励起されたプラズモンがナノアンテナを介してチャンネル長方向プラズモンを励起し, 出力起電圧が生じたためと考えられる. 図 6(c)においては, より八の字型に

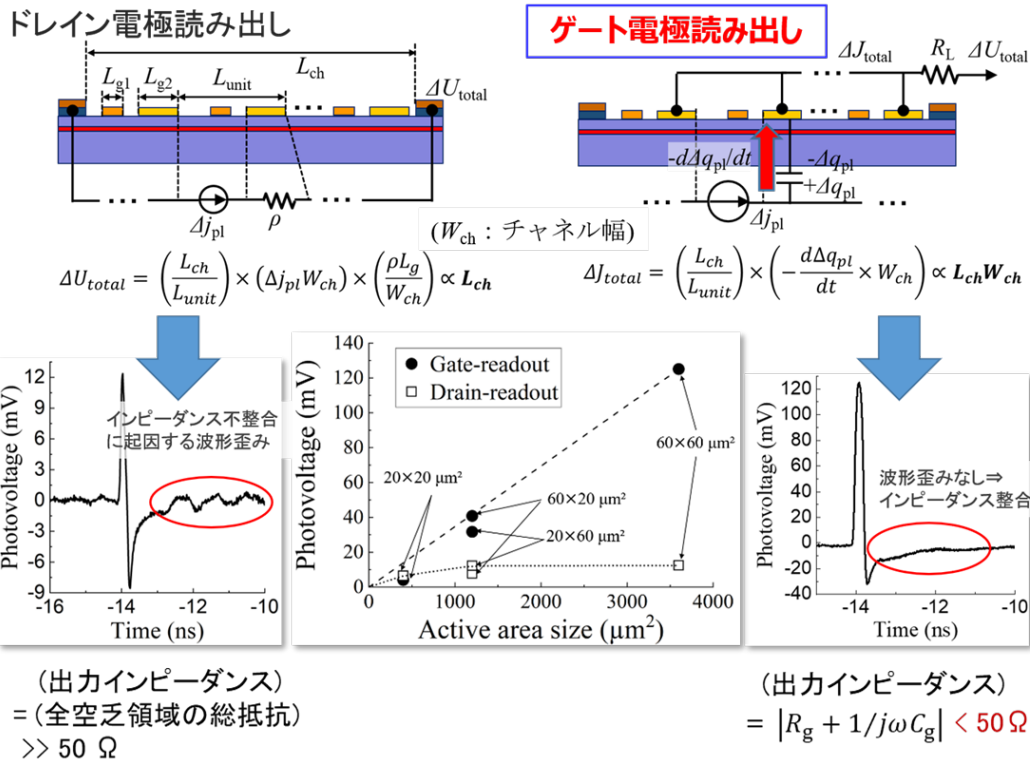


図7. プラズモニック THz デテクタにおける出力光起電圧信号のドレイン電極読み出し方式およびゲート電極読み出し方式の比較 (上段), それぞれの方式においてテラヘルツパルス検出測定したときの出力光起電圧信号波形および出力ピークのデバイス・アクティブ領域面積依存性 (下段).

近い特性が示されているが, 図 6(c)のデバイスにおいては, ナノアンテナのチャネル幅方向の間隔が図 6(b)の間隔よりも狭いためと考えられる. すなわち, 幅方向のナノアンテナ間隔に対するナノアンテナ幅の割合が高くなるほど, 従来型一次元回折格子構造デテクタの偏光特性に近づく傾向を示すと言える. このことは, ナノアンテナ構造の設計によって偏光特性を自由に制御できる可能性を示唆している.

今後, ナノアンテナサイズ・形状と偏光特性の定量的関係や, チャネル幅方向振動プラズモンに由来する流体非線形性の活用可能性を明らかにすることで, 二次元回折格子構造プラズモニック THz デテクタの高機能化・高性能化の実現が見込まれる.

また, 当初予期していなかった成果として, 従来のドレイン電極からの出力起電圧読み出しに代わり, ゲート電極からの出力起電圧読み出し (図 7) を考案し, デテクタ・アクティブ領域面積に比例した起電圧が得られることと, 後続の 50Ω 接続システムとのインピーダンス整合が得られることを理論的に明らかにし, 二次元回折格子構造プラズモニック THz デテクタを用いて実験的に実証した (図 7). この成果によって, 超高速 THz 無線通信に求められる高感度性・データ高忠実度性を達成する見通しを得た.

さらに, 従来の二重回折格子構造プラズモニック THz デテクタを用いたゲート電極からの出力起電圧読み出し方式において, ゲート電極に正のバイアス電圧を印加したとき, 出力起電圧が桁違いに大きくなる現象を発見した. これは, ゲート電極・チャネル間に存在する InAlAs バリア層と InGaAs チャネル層のヘテロ界面において, 正バイアス印加によってポテンシャル・バリア厚が薄くなり, 非線形トンネル電流整流効果がプラズモン流体非線形性整流効果に重畳された結果であると考えられ, デテクタ感度の飛躍的な向上につながる大きな発見である. 今後は, 非線形トンネル電流整流効果とプラズモン流体非線形性整流効果との相乗効果の解明や, 整流効果を最大化するようなゲート電極・チャネル間の層構造の検討を進める.

本研究では, 金属ナノアンテナを新たに導入した二次元回折格子構造プラズモニック THz デテクタにおけるプラズモン二次元流体的性質を活用した THz 波検出原理の解明を, シミュレーションおよびデバイス試作・テラヘルツ検出測定評価によって行なった. チャネル幅方向偏光を持つ入射 THz 波と幅方向振動プラズモンとの結合によって, プラズモンの電界分布の二次元的広がりを介して長さ方向振動を誘起することで, 幅方向偏光 THz 波の検出が可能であることを実証し, ナノアンテナ構造の設計によってデテクタ出力起電圧, すなわち感度の偏光特性を制御できることを示した. これによって, 当初の目的である, 二次元回折格子構造プラズモニック THz デテクタの素子設計論の創出を果たしたと言える. さらに, 出力起電圧をゲート電極から読み出すことによって, デテクタ・アクティブ領域面積に比例した起電圧, ならびに 50Ω 接続システムとのインピーダンス整合が得られること, ゲート電極・チャネル間に存在する非線形トンネル電流整流効果によってデテクタ感度が飛躍的に向上することを実証し, 当初の予定を大幅に超えてプラズモニック THz デテクタの高機能化・高性能化への見通しを得た.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Taku Saito
2. 発表標題 Gate Electrode as an Output Port of a Grating-Gate Plasmonic THz Detector
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/THz Science and Applications (MTSA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根来拓海
2. 発表標題 格子ゲート構造プラズモニックTHz検出素子におけるゲート電極からの光起電圧出力に関する検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤琢
2. 発表標題 格子ゲート構造プラズモニックTHzディテクタのゲート電極からの光電流出力に関する検討
3. 学会等名 電子通信情報学会2019年電子デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaya Suzuki
2. 発表標題 Introduction of 2D Diffraction Grating into Grating-Gate Plasmonic THz Detector for Controlling Its Polarization Characteristics
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Satou
2. 発表標題 THz Devices Based on Transistors Incorporated with 2D Plasmonic Metamaterial Structures
3. 学会等名 A3 MM Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Suzuki
2. 発表標題 Coupling of 2D Plasmons in Grating-Gate Plasmonic THz Detector to THz Wave with Lateral Polarization
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Suzuki
2. 発表標題 2D Diffraction Grating for Controlling Polarization Characteristics of Grating-Gate Plasmonic THz Detector
3. 学会等名 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木雅也
2. 発表標題 格子ゲート構造プラズモニックTHzディテクタの偏光特性制御のための二次元ナノアンテナ導入
3. 学会等名 電子通信情報学会2018年電子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤琢
2. 発表標題 二次元ナノアンテナ導入による格子ゲート構造プラズモニックTHzディテクタの偏光特性制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiichi Otsuji
2. 発表標題 Introduction of 2D Nanoantennas to Grating-Gate Plasmonic THz Detector for Controlling Its Polarization Characteristics
3. 学会等名 Optical Terahertz Science and Technology 2019 (OTST 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Negoro
2. 発表標題 Gate-Readout of Photovoltage from a Grating-Gate Plasmonic THz Detector
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Negoro
2. 発表標題 A Novel Grating-Gate Plasmonic THz Detector with Photovoltage Gate-Readout for Use in High-Speed Wireless Communications
3. 学会等名 78th Device Research Conference (DRC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木悠真
2. 発表標題 二次元回折構造プラズモニックTHz検出素子におけるプラズモン・ポラリトンのモード解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤昭
2. 発表標題 二次元プラズモンを用いたTHzディテクタの新展開
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木悠真
2. 発表標題 二次元回折格子構造金属ナノアンテナを有するプラズモニック THz検出素子におけるプラズモン・ポラリトンのスペクトル解析
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第75回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 根来拓海
2. 発表標題 格子ゲート構造高電子移動度トランジスタを用いたTHz検出におけるゲート電極からの光起電圧出力に関する研究
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第75回学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------