

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：16101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889043

研究課題名(和文) 光励起下におけるInAs量子ドット層の面内伝導特性の解明と光伝導アンテナへの応用

研究課題名(英文) Characterization of in-plane photoconductivity of InAs QDs layers and its application to photoconductive antenna

研究代表者

熊谷 直人 (Kumagai, Naoto)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・特任講師

研究者番号：40732152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：ピコ秒オーダーの超高速なキャリア緩和を持つInAs量子ドットのテラヘルツ波検出光伝導アンテナへの応用を検討するため、面内光伝導特性の評価を行ったところ、暗電流に比べて明瞭な光電流が確認された。さらに、光伝導アンテナ構造の作製を行い、同構造に対して、光伝導アンテナ動作に用いる波長1.5ミクロンのフェムト秒パルスレーザー、及びCWレーザーによる光励起を行い、その光電流を励起強度のピークパワー密度依存性で評価した。その結果、6桁もの広い励起ピークパワー密度領域で線形な光電流の増加を確認でき、このInAs量子ドットが光伝導アンテナへの応用に強く期待できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In-plane photoconductivity of InAs quantum dots layers with ultrafast carrier relaxation (~ps order) has been characterized in order to argue the application of the InAs QDs to THz detection photoconductive antenna (PCA). Compared to the dark current, the obvious photocurrent has been observed. We have fabricated the PCA structure using the InAs QDs, and measured the photocurrent under excitation by 1.5-micron fs pulse laser which is used for an actual PCA operation. The Peak power density dependence of the photocurrent has been characterized by the pulse and CW excitations. As a result, the linear increasing of photocurrent has been shown clearly in the range of 6 orders of magnitude. These results indicate that the InAs QDs is the promising material for the application to PCA.

研究分野：半導体結晶工学

キーワード：量子ドット 光伝導アンテナ テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

エピタキシャル成長された InAs 系量子ドットはレーザ、単一光子光源、太陽電池、赤外検出器、光スイッチなどの応用とその物性の両面において強く関心を持たれている。ドット層面内のキャリア伝導についてはドットへのトラップやドットのチャージによる散乱から、移動度の低下が知られており、伝導デバイスなどへの応用例は殆どなかった。しかしながら、実際の InAs 量子ドット層は GaAs などの基板上に 2 次元成長した InAs 濡れ層(WL)の上に島状 3 次元構造がドットとして形成され、いわば「2 次元電子系と 0 次元に閉じ込められた電子系が連続して繋がった系」である。この「2 次元+0 次元の繋がった系」として考えた際に、ドットで光吸収と再結合を担い、濡れ層を光励起キャリアの伝導層に出来れば、光励起時の面内伝導を光伝導スイッチへ応用することが期待できる。光伝導スイッチ材料には光吸収の大きさ、キャリアの高速緩和、面内の高移動度、低暗電流(高シート抵抗)が重要な特性であるが、このうち量子ドット層の面内光伝導特性についてはあまり調べられていない。

そこで、本研究では光伝導スイッチング応用に向けて、超高速なキャリア緩和を持つ InAs 量子ドット積層構造の光励起下における面内伝導に注目する。この量子ドットは GaAs 基板上に In_{0.35}GaAs 格子緩和層を形成し、その上に Er 添加 InAs 量子ドットを成長、In_{0.35}GaAs 層で埋め込んだ構造であり、元来は我々のグループで全光スイッチング素子への応用を目指し、提案・実現したものである。GaAs 基板上で InAs 量子ドットでありながら、一般的な量子ドットより長波長の 1.5 μ m 帯の光吸収、ピコ秒オーダーのキャリアの超高速緩和成分、高シート抵抗($\sim 10^7$ Ω /Sq.)を持つなど、レーザなどの光デバイス応用に向けた量子ドットとは大きく異なり、光伝導スイッチングに向けて期待できる特性を持つ。この量子ドットはさらに Er 添加濃度、成長条件の最適化や積層構造により緩和時間のサブピコ秒オーダーへの高速化やさらなる高シート抵抗化が見込まれることから、1.5 μ m 帯での良好な光伝導特性が実現できれば、光伝導アンテナへの応用が強く期待できる。1.5 μ m 帯励起による動作する光伝導アンテナ材料として、従来は InP 基板上の低温成長 InGaAs が用いられてきた。高価な InP 基板ではなく、GaAs 基板を用いて 1.5 μ m 帯動作の光伝導アンテナが可能となる。

2. 研究の目的

上述の超高速キャリア緩和をもつ InAs 量子ドット積層試料について、光励起下における InAs 量子ドット層の面内伝導特性を明らかにし、通信波長帯の波長 1.5 μ m を励起光として動作するテラヘルツ検出用光伝導アンテナへの応用を検討する。InAs 量子ドット層の面内光伝導の詳細や光伝導デバイスへの応

用例はこれまでになく、InAs 量子ドット層の新しい切り口とその応用展開を図る。

3. 研究の方法

(1) 1.5 μ m CW 光励起による面内光伝導評価
まずは初期的な光電流評価を行うために、既に我々のグループで成長済の InAs 量子ドット層の 20 層積層した試料のうち、InAs 量子ドットに Er をドーブしたもの、およびアンドーブ試料にストライプ電極を設け、電極間にファイバーアンプ 1.5 μ m の CW レーザを励起光として照射し、励起光下での電流-電圧を測定し、電流の励起光強度依存性をしらべた。

(2) キャリア緩和時間の高速化

サブピコ秒へのキャリア緩和時間の高速化を図るため、歪緩和 InGaAs 層の In 組成と量子ドット層及び In GaAs 層の成長温度に対するキャリア緩和時間をポンプ・プローブ法を用いた透過率変化の時間分解測定により、直接的に評価を行う。InGaAs 層の In 組成はおよそ 0.25 から 0.4 まで変え、セ長温度は 430 $^{\circ}$ C から 490 $^{\circ}$ C まで変化させた。

(3) 光伝導アンテナ構造の作製と光電流評価
InAs 量子ドット積層試料を用いて、光伝導アンテナ構造の作製を行う。成長した試料表面にフォトリソグラフィプロセスを用いて、ダイポール型電極を作製する。電極にメサ加工を施し、メサ加工の有無による暗電流抑制の効果を評価する。作製した光伝導アンテナ構造に対し、光伝導アンテナ動作と同じ、1.5mm のフェムト秒パルスレーザを励起光として照射し、光電流の評価を行う。光電流測定はソースメータを用いて行い、積算時間内の平均として DC 的に光電流を測定する。励起パルスのピークパワーに対する、光電流のピーク値を求め、CW 励起による光電流との比較を行う。

(4) 光電流の周波数特性の評価

光電流の周波数特性は入力される THz の電界と応答関数の相互相関関数で表すことができ、キャリアの緩和時間プロファイルが応答関数にあたることから、この相互相関関数のフーリエ変換から光電流のパワースペクトルを得る。つまり、キャリア緩和時間プロファイルのフーリエ変換から感度曲線の周波数依存性を得ることができる。緩和時間プロファイルには独立したドットの緩和時間 τ_1 、非発光で緩和の速いドットの緩和時間 τ_2 、発光による非常に遅い緩和 τ_3 を持つドットの 3 種類が存在すると仮定し、緩和時間プロファイル $s(t)$ を

$$s(t) = n_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + n_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + n_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right)$$

と表すことができる。ここで、規格化の際には $n_1+n_2+n_3=1$ である。これら 3 成分で緩和時間プロファイルをフィッティングし、フーリエ変換の結果から、早い成分、遅い成分の周波数特性への寄与を検討した。

4. 研究成果

(1) 1.5 μm CW レーザ励起による光電流

図 1. に Er ドープ及びアンドープ InAs 量子ドット積層試料について、バイアス 15V 印加時の光電流の励起光強度依存性を示す。ストライプ間の励起光スポット外を流れる暗電流の寄与を考慮し、スポット照射域のみの光電流を見積もった結果である。両者とも暗電流に対して明瞭な光電流と励起強度に比例した電流増加を確認できた。Er ドープとアンドープ試料での光電流量の違いは、CW 励起下でのレート方程式により、光電流がキャリアの緩和時間に比例することから、両者のキャリア緩和時間の違いによると考察される。また、得られたフォトキャリアの移動度を古典的に見積もったところ、135 cm^2/Vs と見積られた。この値は低温成長 GaAs の移動度 150~200

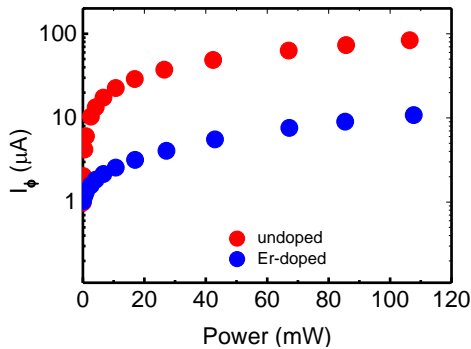


図 1. アンドープ及び Er ドープ InAs 量子ドット積層試料の面内光電流の CW 励起光強度依存性

cm^2/Vs に近い。緩和時間が非常に高速なこの量子ドットにおいて、初期的な光電流評価の結果、暗電流に比して 10 倍という明瞭な光電流が観測された意義は大きいと考えられる。

(2) キャリア緩和時間の高速化

InAs 量子ドットを埋め込む歪緩和 InGaAs 層の In 組成を 0.25~0.4 まで変化させた場合や、InAs 量子ドットと InGaAs 層の成長温度を 430~490 $^{\circ}\text{C}$ まで変化させた場合も、シート抵抗やキャリア緩和時間について、系統だった変化は得られなかった。作製した試料の中で、キャリア緩和時間が比較的高速なものでもこれまでと同程度の数ピコ秒オーダーであり、従来の条件で成長した InAs 量子ドットと比べ、著しい高速化は見られなかった。これらの結果から量子ドットを埋め込む InGaAs 層の In 組成や今回の成長温度に強く依存しないことが示唆されたが、埋め込まれたドットの形状などの詳細な評価が課題である。

(3) 光伝導アンテナ構造の作製とフェムト秒パルスレーザ励起による光電流 InAs 量子ドット積層試料を用いて、典型的な光伝導アンテナ構造を作製した。図 2 にアンテナ構造中央部の電極ギャップ付近の光学顕微鏡像を示す。この作製した光伝導アンテナ構造において、暗電流を抑制するため、電極のメサ加工

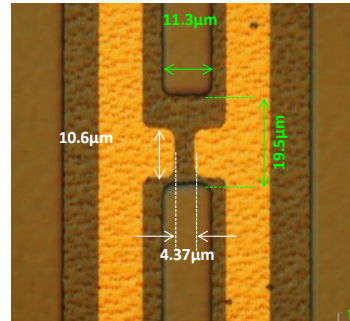


図 2. 作製した光伝導アンテナ構造中央部の電極ギャップの光学顕微鏡像

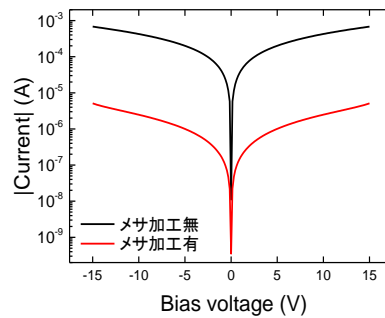


図 3. 光伝導アンテナ電極のメサ加工有無による暗時の電流-電圧特性の比較

工の有無による効果を暗示の電流-電圧特性で評価した結果を図 3 に示す。メサ加工が無い場合は、電極間抵抗が 22k Ω であったが、電極周囲をエッチングで GaAs 基板まで落とし、メサ加工を施した結果、電極間抵抗は 2.9M Ω となり、著しい高抵抗化を図ることができた。メサ加工後の電極間抵抗はシート抵抗から見積もった電極ギャップ間の抵抗と一致し、メサ加工により理想的に近い暗電流の抑制が出来たと考えられる。この光伝導アンテナの電極ギャップに 1.5 μm のフェムト秒パルスレーザ (80MHz) を照射した際の光電流と、CW レーザを照射した際の光電流について、両者の電流のピーク値の励起光強度ピークパワー依存性を図 4. に示す。10~10MW/ cm^2 の 6 桁の領域にわたり、線形な光電流増加が確認できた。100M の付近では線形性が劣化しており、これは過飽和吸収によると考えられ、過飽和強度は 90M と見積られた。10~10MW/ cm^2 のパワー密度域は、励起光源のパルスレーザでは 10mW オーダーの励起強度に相当しており、一般的な低温成長 GaAs の光伝導アンテナにおいてテラヘルツ検出動作に用いられる励起強度で線形な光電流が得られることを示し

ている。

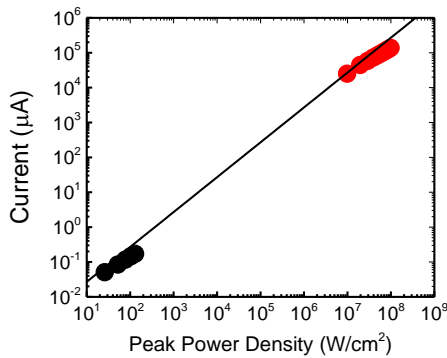


図4 光電流のピークの励起ピークパワー密度依存性

(4) 光電流の周波数特性の評価

図5(a)はErドープInAs量子ドット積層試料の透過率変化の時間分解スペクトルとそのスペクトルに対し3種類の緩和時間成分があることをフィッティングにより示したものである。図5(b)中の実線は図5(a)の測定スペクトルのフーリエ変換により得られた感度曲線 $|N_q|^2$ である。鎖線、破線

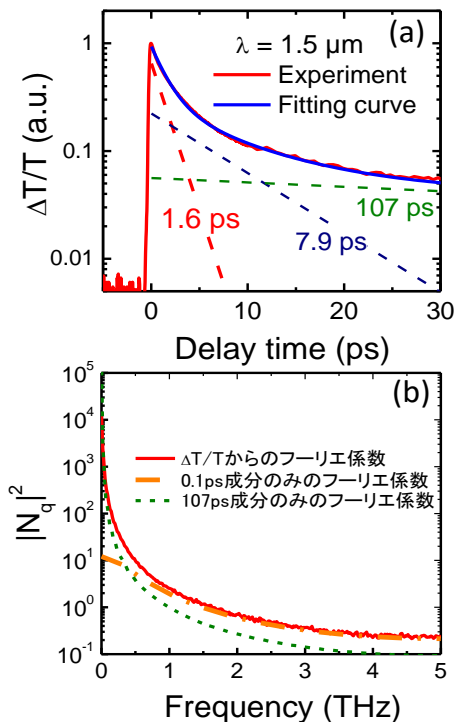


図5. (a) InAs量子ドット積層試料の透過率変化の時間分解スペクトル $\Delta T/T$ と3緩和成分によるフィッティング。(b) 図(a)の $\Delta T/T$ スペクトルから得られたフーリエ係数と高速(0.1ps)及び低速成分(107ps)単独のフーリエ係数。

はそれぞれ0.1ps、107psの単独な緩和時間成分からの $|N_q|^2$ である。図(a)のようにキャリア緩和の速い成分、遅い成分が混

在する場合に、周波数特性への影響について調べると、 $\sim 1\text{THz}$ 以上の領域ではサブピコからピコ秒オーダーの緩和時間であれば感度曲線に余り影響しないが、0 Hz近傍でのDCノイズ分の大小には緩和時間が大きく影響することから、ある程度の速い緩和成分があれば、遅い緩和成分の抑制が重要であることがわかった。

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1件)

- ① Keisuke Murakumo, Yuya Yamaoka, Naoto Kumagai, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, "Photoconductivity of Er-doped InAs quantum dots embedded in strain-relaxed InGaAs layers with 1.5 μm cw and pulse excitation", Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 2016, 04EH12(1-5), DOI:10.7567/JJAP.55.04EH12. (査読有)

[学会発表] (計9件)

- ① 熊谷直人, 村雲圭祐, 盧翔孟, 北田貴弘, 井須俊郎, 「ErドープInAs量子ドット層のキャリア緩和時間から評価した光電流周波数特性」, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月20日, 20a-H135-8, 東京都目黒区(東京工業大学).
- ② Keisuke Murakumo, Yuya Yamaoka, Naoto Kumagai, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, "Photoconductivity with 1.55 μm excitation of InAs QDs embedded in InGaAs barriers on GaAs substrate", International Conference on Solid State Devices and Materials, 26th September 2016, PS-7-9, 北海道札幌市(札幌コンベンションセンター).
- ③ Naoto Kumagai, Keisuke Murakumo, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, "Mobility of in-plane photocurrent of stacked InAs QDs layers in strain-relaxed InGaAs matrix", 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 27th July 2015, Mo-PM-14, 宮城県仙台市(仙台国際センター).
- ④ 村雲圭祐, 熊谷直人, 盧翔孟, 北田貴弘, 井須俊郎, 「1.5 μm パルス励起によるInAs量子ドット光伝導アンテナ構造の光電流」, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月16日, 16p-2J-11, 愛知県名古屋市(名古屋国際会議場).
- ⑤ Keisuke Murakumo, Naoto Kumagai, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, "In-plane photoconductivity of InAs QDs embedded in strain-relaxed InGaAs layer", The 42nd International

Symposium of Compound Semiconductors,
6th June 2015, Mo3GN1, Santa Barbra, CA,
US (The University of California).

- ⑥ 村雲圭祐, 山岡裕也, 熊谷直人, 北田貴弘, 井須俊郎, 「量子ドット光伝導スイッチのメサ加工による暗電流の抑制」, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月12日, 12p-A14-12, 神奈川県平塚市(東海大学).
- ⑦ 熊谷直人, 村雲圭祐, 北田貴弘, 井須俊郎, 「InAs量子ドット積層構造の面内光伝導キャリアの移動度」, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月11日, 11a-A10-10, 神奈川県平塚市(東海大学).
- ⑧ 村雲圭祐, 熊谷直人, 北田貴弘, 井須俊郎, 「InAs/InGaAs量子ドット積層構造の面内光伝導特性の異方性」, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月18日, 18p-A20-1, 北海道札幌市(北海道大学).
- ⑨ 熊谷直人, 村雲圭祐, 北田貴弘, 井須俊郎, 「超高速キャリア緩和 InAs量子ドット積層構造の面内光伝導」, 第75回応用物理学会春季学術講演会, 2014年9月18日, 18a-A27-6, 北海道札幌市(北海道大学).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 直人 (KUMAGAI, Naoto)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・特任講師
研究者番号: 40732152

(2) 研究協力者

井須 俊郎 (ISU, Toshiro)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・特任教授
研究者番号: 00379546

北田 貴弘 (KITADA, Takahiro)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・特任准教授
研究者番号: 90283738

盧 翔孟 (LU, Xiangmeng)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・特任助教
研究者番号: 80708800

村雲 圭祐 (MURAKUMO, Keisuke)
徳島大学・大学院先端技術科学教育部・修士課程