

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06266

研究課題名(和文) 超高速キャリア緩和を有するInAs量子ドットのテラヘルツ波検出素子への応用

研究課題名(英文) Application of InAs quantum dots with ultrafast carrier relaxation to terahertz wave detection devices

研究代表者

熊谷 直人 (Kumagai, Naoto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：40732152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：当初の計画通りに遂行できない場合の対応として、量子ドット層の面内光電流メカニズム解明に向け、高速なキャリア緩和を持つInAs量子ドット層積層試料の光電流スペクトルの温度依存性を評価し、1400 nm付近で低温から室温まで熱的に連続した量子ドット層からの光電流ピークが確認できた。また光電流の温度依存性から169Kより高温域での光電流活性化エネルギーを求めた。活性化エネルギーには波長依存性があり、1200～1600 nmで50～63 meVであった。波長が長くなるほど、活性化エネルギーが大きくなることから、ドットサイズに依存した熱的脱出深さを反映していると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「2次元電子系と0次元に閉じ込められた電子系が空間的に繋がった系」である自己組織化InAs量子ドットの面内光伝導という新しい切り口とその応用展開を図る上で、低温からの熱的に連続な光電流が確認でき、光電流の活性化エネルギーにドットの大きさが反映される事が示唆されたことにより、光電流メカニズムの一端を明らかにしただけでなく、光伝導アンテナの応用に向けて、低温でのアンテナ動作、ドットサイズによる光電流の活性化エネルギー制御について知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：As an alternative to the case where it is not possible to carry out as planned, we made an characterization of lateral photocurrent in stacked InAs QDs layers for elucidating the photocurrent mechanism. Characterizing the temperature dependence of the photocurrent spectrum of InAs QDs layers with ultra-fast carrier relaxation embedded in strain-relaxed InGaAs, thermally continuous photocurrent around 1400 nm was observed in the range from low to room temperature. The photocurrent activation energy in the high temperature range over 169K was evaluated. The activation energy was dependent on its wavelength in the range of 1200-1600 nm of the peak of the photocurrent. The activation energy was 50-63 meV. And the longer the wavelength, the activation energy became larger. This result indicates that photocurrent activation energy corresponds thermal escape depth derived from size of QDs.

研究分野：電気・電子材料工学

キーワード：量子ドット 光電流 光伝導アンテナ テラヘルツ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

InAs 系量子ドットはレーザー、単一光子光源、太陽電池、赤外検出器、光スイッチなどへの応用やその物性と共振器量子電磁気学分野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、自己組織化によりエピタキシャル成長された実際の InAs 量子ドット層は 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空間的に連続して繋がった系」となっている。この「2 次元+0 次元の繋がった系」を考えた際に、ドットで光吸収を担い、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、一般的な InAs 量子ドット層の面内光伝導特性についてもあまり調べられていなかった。一方で GaAs 基板上に格子歪を完全に緩和させた InGaAs 層へ埋め込んだ Er ドープ InAs 量子ドットは、ピコ秒オーダーの超高速なキャリア緩和と 1.5 μm 帯における光吸収を持ち、明瞭な面内光電流が確認されたことから、1.5 μm 帯でゲート動作する量子ドットを用いたテラヘルツ波検出用の光伝導アンテナへの応用が期待される。テラヘルツ波(1THz 1ps) 検出のためには、より高速なサブピコ秒の緩和時間が望ましいことから、Er ドーピング濃度依存性や積層構造依存性を調べることでこれを達成し、アンテナを作製、テラヘルツ波検出特性を検証する計画であったが、異動により当初の研究計画の遂行が難しくなった。そのため申請時に予定通り進まない際の対応として挙げていた量子ドット層面内光伝導についてのメカニズムの解明や詳しい物性面での評価や検討をすることとなった。面内光伝導のメカニズムは自己組織化量子ドット層の「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空間的に繋がった系」としての物理的な関心からも興味深く、InAs 量子ドット層の面内光伝導についてメカニズムや物性面でのより深い理解は、バンドエンジニアリング的な量子ドット層の制御や、更なるキャリア緩和の高速化など光伝導アンテナへの応用に繋がるものと期待できる。

2. 研究の目的

背景で述べたように当初の研究計画の遂行が難しくなったことから、予定通りに進まない対応として歪緩和層に埋め込まれた高速なキャリア緩和を持つ InAs 量子ドット層の光電流メカニズムの解明に変更した。変更時の研究目的を光電流メカニズムの解明にした理由としては、これまで、高速キャリア緩和をもつ量子ドットの光電流評価は室温で、1.5 μm 帯のレーザーによる励起のみであったが、光電流スペクトルやその温度依存性の評価はされていなかったこともあり、光電流のメカニズム理解が不十分だった点にある。本研究では光電流スペクトルの温度依存性を評価を行うことで、面内光電流のメカニズムの解明という目的の達成を目指す。InAs 量子ドット層からの光電流について、光電流スペクトルやその温度依存性を評価することはメカニズム解明にむけて重要な知見を与えるものと期待される。本研究では本質的な検討を行うために、Er ドープの影響を除くため、アンドープの InAs 量子ドット積層試料を用いる。量子ドット層からの光電流についてのメカニズムの解明や詳しい物性面での評価や検討をすることは、自己組織化量子ドット層の「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空間的に繋がった系」としての物理的な関心からも興味深いだけではなく、メカニズムや物性面でのより深い理解は、さらなるキャリア緩和の高速化と光伝導アンテナへの応用に繋がるものと期待できるからである。

3. 研究の方法

InAs 量子ドット試料は分子線エピタキシー法により作製した。GaAs(001)基板上に完全に歪を緩和させた In_{0.35}GaAs 層を形成、その後にアンドープ InAs 量子ドット層を 3.4 ML 成長し、厚さ 20 nm の In_{0.35}GaAs 層で埋め込んだ。InGaAs 層の成長レートは 0.35 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。これを 20 周期繰り返し積層した。図 1 に InAs 量子ドット積層試料の模式図を示す。InGaAs 層、InAs 量子ドット層ともに成長温度は 400 °C であった。作製した InAs 量子ドット積層試料の表面に Ti/Au 平面オーミック電極を形成した。ランブ光源からの励起光を照射するための電極間間隔は 4mm とした。対向する電極端以外は、劈開により暗電流の回り込みを抑制した。光電流スペクトル測定のための光源にはハロゲンラン

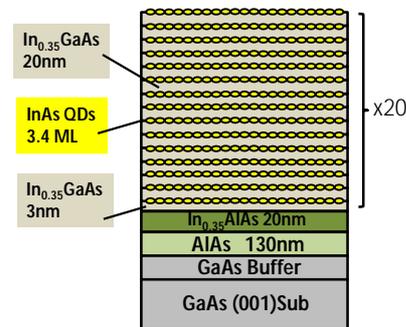


図 1 InAs 量子ドット層積層試料の模式図

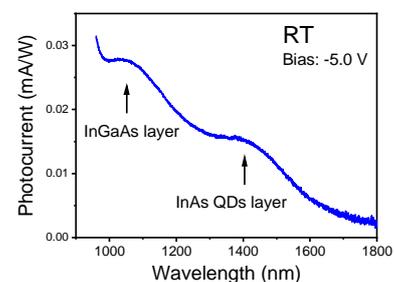


図 2 InAs 量子ドット層積層試料からの室温における光電流スペクトル

プ(50W)を用い、光電流はロックイン検出により測定した。チョッピング周波数は光電流の過渡状態が飽和させるために比較的低い周波数の 5Hz で行った。光源の波長強度は既知の感度曲線を持つ Ge フォトダイオードで校正を行った。試料はクライオスタットにセットされ、4K から 292K (室温)までの温度依存性を測定した。また、室温での暗時の IV 測定及び、光電流のバイアス依存性を評価した。

4. 研究成果

図2に室温での5Vのバイアス印加時の光電流スペクトルを示す。1100nm 付近と 1400 nm 付近にブロードな光電流ピークが観測された。本研究と同様に作製された InAs 量子ドット積層構造の吸収スペクトルが Kitada らにより報告されており、1100 nm 付近は InGaAs 層に由来し、1400nm 付近は InAs 量子ドット層に由来する。低電界印加下で得られたスペクトルであることから、シュタルク効果の影響は殆ど無視でき、この光電流スペクトルは InAs 量子ドット層の吸収スペクトルに相当すると考えられる。また、光電流スペクトルのバイアス依存性は印加電圧の大きさ、極性に依りて良好な対称性を示した。暗時の電流-電圧特性も良好なオーミック特性が得られた。図3に光電流スペクトルの 4~292K の温度依存性を示す。低温においても室温と同様に 1400nm 付近にブロードなピークが見られ、低温から室温まで熱的に連続な量子ドット層からの光電流スペクトルが確認された。この低温から室温まで量子ドット層から熱的に連続な光電流が得られたことは、量子ドットが光吸収を担い、波動関数の重なるような量子ドットの高次準位や濡れ層へキャリアが励起され、これらが 2 次元的な伝導層として面内光電流を担うという描像を実験的に示す結果と考えられる。スペクトルで全体的に温度の上昇とともに光電流の増加傾向が確認されたが、159K 以下の低温域では光電流に強い温度依存性が見られなかった。一方で 159K 以上ではドット層からの光電流ピーク(1200~1600 nm)において、温度上昇に伴う光電流増加の様子が明瞭に観察された。各波長における光電流のアレニウスプロットを行うと、大まかな傾向として、150K 付近を境に高温側では数十 meV、低温側では温度依存性が小さく数 meV の活性化エネルギーを持つような傾向が示された。これらのアレニウスプロットから、159~240K の高温域と 38~119K の低温域の活性化エネルギーを最小二乗法によるフィッティングにより求めた。高温域での活性化エネルギーを E_1 、低温域の活性化エネルギーを E_2 とし、量子ドット層からの光電流ピークの 1400nm 付近を中心に各波長で得られた活性化エネルギーの波長依存性を図4に示す。高温域の活性化エネルギー E_1 には波長依存性が見られ、波長が長くなるにつれて、活性化エネルギーが大きくなっている。この活性化エネルギーの大小は量子ドットの大きさに由来すると考えられる。小さな量子ドットではポテンシャル中の脱出深さが浅く、熱的に脱出しやすい一方、大きな量子ドットでは脱出深さが深くなるために、熱的に脱出しにくくなることから、これらが活性化エネルギーに反映されていると考えられる。低温域の活性化エネルギー E_2 は meV オーダーと非常に小さく、殆ど波長依存性が見られない。これは低温域での光電流はキャリアの熱脱出ではない別のメカニズムによると示唆される。今後の検討が必要であるが、オージェ過程による高次準位や濡れ層の準位への励起が考えられる。また、フォトキャリア移動度の温度依存性についても検討が必要であろう。

本研究のまとめとしては、高速なキャリア緩和を持つ InAs 量子ドット層からの光電流スペクトルの温度依存性の評価を行い、低温から室温まで量子ドット層からの熱的に連続な光電流を確認できた。また温度依存性から高温域と低温域における光電流の活性化エネルギーを見積もった。光電流の温度依存性が大きな高温域では活性化エネルギーに波長依存性がみられ、ドット

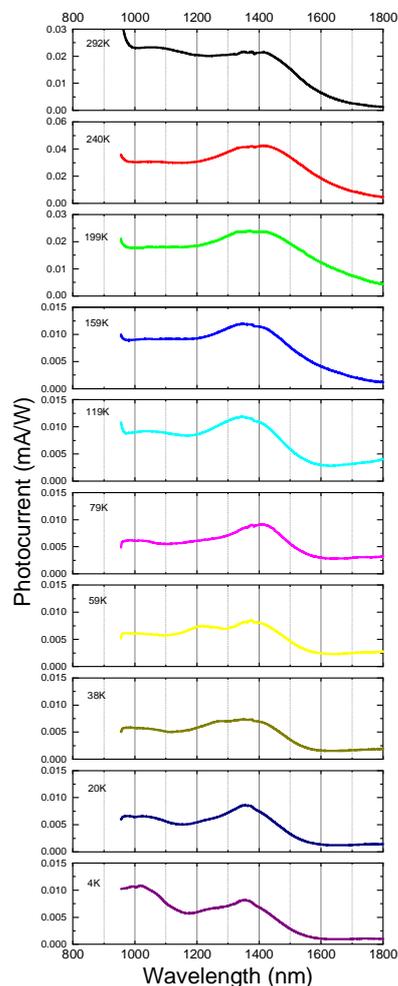


図3 InAs 量子ドット積層試料の光電流スペクトルの温度依存性

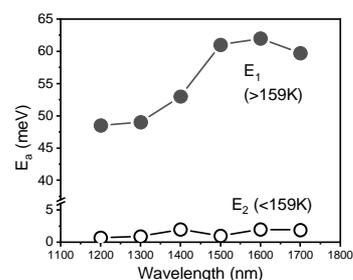


図4 光電流の活性化エネルギーの波長依存性

サイズに依存した熱脱出深さが反映されることが示唆された。光伝導アンテナへの応用の視点から、低温でのアンテナ動作や、ドットサイズによる光電流の活性化エネルギー制御について有意義な知見を得ることができた。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 件)

Naoto Kumagai, Xiangmeng Lu, Yasuo Minami, and Takahiro Kitada, " Lateral Photocurrent Spectroscopy of Stacked InAs QDs Layers in Embedded Strain-Relaxed InGaAs Matrix ", (投稿予定).

〔学会発表〕(計 2 件)

熊谷直人、盧翔孟、南康夫、北田貴弘、「高速キャリア緩和 InAs 量子ドット積層構造の面内光電流スペクトルの温度依存性」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会 11p-PA4-5 (2019)、東京都目黒区 (東京工業大学)

Naoto Kumagai, Xiangmeng Lu, Yasuo Minami, and Takahiro Kitada, " Lateral Photocurrent Spectroscopy of Stacked InAs QDs Layers in Embedded Strain-Relaxed InGaAs Matrix ", Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), MoP-F-2, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：北田 貴弘

ローマ字氏名：Takahiro Kitada

所属研究機関名：徳島大学大学院

部局名：社会産業理工学研究部 (理工学域)

職名：特任教授

研究者番号 (8 桁)：90283738

研究分担者氏名：南 康夫

ローマ字氏名：Takahiro Kitada

所属研究機関名：徳島大学大学院

部局名：社会産業理工学研究部 (理工学域)

職名：特任準教授
研究者番号（8桁）：60578368

研究分担者氏名：盧 翔孟
ローマ字氏名：Xiangmeng Lu
所属研究機関名：徳島大学大学院
部局名：社会産業理工学研究部（理工学域）
職名：特任助教
研究者番号（8桁）：80708800

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。