

氏名	ふるかわ ゆうぞう 古川 雄三
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	工博 第 1947 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則 第 4 条 第 1 項 該当
研究科・専攻	工学研究科 電子物性工学専攻
学位論文題目	InAs 量子ドットのサブバンド間遷移によるテラヘルツ電磁波発生に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 藤田茂夫 教授 鈴木 実 教授 北野正雄

### 論文内容の要旨

近年の電子通信における周波数領域拡大に対する要望は、電子デバイス的高速化を促し、ギガヘルツ (GHz) の帯をほぼ制覇するに至っている。一方の光デバイスにおいても、技術革新による長波長化が進み、30 THz 以上の周波数領域を扱えるようになった。しかしながら、100 GHz~30 THz のいわゆるテラヘルツ (THz) 周波数領域は依然として未踏の周波数領域として残されており、電子通信以外にも多様な発展が期待されている。このような背景から THz 領域の高効率かつ小型なデバイスの実現が待たれているが、非線型光学効果を用いた大掛かりなレーザ装置を必要とする現在の THz 電磁波発生法では、この周波数帯の多様な応用に対する要望に応えることは不可能である。本論文は、小型かつ高効率な THz 領域のデバイス実現に、THz 領域に相当するエネルギー差をもつ InAs 自己形成量子ドットのサブバンド間の発光性緩和を利用することを提案している。その実現のため、先ず、サブバンド間遷移に伴う THz 電磁波の存在を実証し、次いで、量子ドットの垂直配列構造を用いたカスケード的電子注入法による反転分布形成について検討することによって THz 電磁波発生デバイスや発振器実現の可能性を示すとともに、高性能化に対する基礎的知見を得ることを目的として行った研究を纏めたもので、以下の 6 章から成っている。

第 1 章は序論であり、THz 領域への周波数拡大を目指した種々の方式に関する研究開発状況、および、量子ドットのデバイス応用に対する歴史的展開から本研究の背景を述べ、InAs 量子ドットのサブバンド間遷移を利用した THz 電磁波発生の意義を述べて、本論文の目的と位置づけを明確にしている。

第 2 章では、量子ドットの理論的検討として、歪の効果を含めた量子準位解析に 3 次元有限要素法を適用し、その手法の確立と有効性を示している。また、波動関数の導出結果からバンド間遷移の偏光特性が量子準位ごとに反転することを明らかにし、量子準位同定にバンド間遷移の偏光特性が有効であることを示している。次いで、量子ドット内のキャリア分布解析にモンテカルロ法を適用し、キャリアの振舞いやサブバンド間発光強度の解析に有効であることを明らかにしている。

第 3 章では、量子準位に大きな影響を与える量子ドットの構造が、ドットの成長法の依存することに着目し、分子線エピタキシャル成長 (MBE) 法と有機金属気相成長 (OMVPE) 法によりドットを成長させている。そして、量子ドットの構造観察によって寸法分布や成長面内の形状異方性に与える成長法の影響を調べている。寸法分布は、MBE 法により作製した量子ドットの方が小さく、形状異方性は MBE 法では  $[1\bar{1}0]$  方向、OMVPE 法では  $[110]$  方向に長いことを示し、それぞれ成長法特有の成長速度異方性と一致することを明かにしている。さらに OMVPE 法においては寸法により形状異方性が異なる量子ドットが形成されることを示し、異なる成長形態が混在することを明確にしている。

第 4 章では、有限要素法による理論解析結果と実際の量子ドットからのバンド間発光、吸収の偏光特性の比較から、量子ドットに 6 つの量子準位が形成されており、6 つのサブバンド間発光性緩和過程が生じることを明確にしている。次いで、この結果を踏まえてモンテカルロ法を用いたサブバンド間発光強度の見積りを行い、実験的に検出可能な強度であることを予測している。実際に、THz 領域における電磁波の観測を試み、量子ドットのサブバンド間遷移に伴う THz 電磁波発生の存在を初めて実証している。

第5章では、THz電磁波の発振器実現を目指し、量子ドットの垂直配列構造を用いたカスケード的電子注入法について検討した内容について述べている。様々の条件で作製した垂直配列構造の断面TEM観察から、InAs量子ドットの寸法が大きくなり、GaAs中間層の層厚が薄いほど垂直配列構造が形成されやすいことを明らかにしている。また、歪分布解析と断面TEM観察結果を比較検討することによって、垂直配列構造の構築には、InAs量子ドットの埋め込みにより発生する歪エネルギー分布の差が、成長温度に相当する熱エネルギー程度必要であることを明らかにしている。さらに、この垂直配列構造を利用したカスケード的電子注入法による電子分布解析より、この構造がサブバンド間発光強度の増大に効果的であるだけでなく反転分布の形成にも有効であることを示し、量子ドットのサブバンド間遷移によるTHz電磁波の発振器実現の可能性を論じている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を纏めて要約し、今後の課題について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、電子技術と光技術、通信工学と物性科学・生命科学などの境界領域において、その有用性が期待されるテラヘルツ (THz) 域の電磁波発生に対し、InAs量子ドットのサブバンド間発光緩和を利用することを提案し、その可能性の検証と実現のための基礎的知見を得るために行った研究を纏めたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 大きな格子歪を有するInAs量子ドットの量子準位解析に3次元有限要素法を用いて歪分布と量子準位を解析的に求めるとともに、バンド間遷移の成長面内の偏光特性が量子準位の同定に応用し得ることを示している。また、モンテカルロ法によるキャリア分布の解析法が、サブバンド間発光によるTHz電磁波強度の見積りに有効なことを明らかにしている。

2. MBE法とOMVPE法で作製したInAs自己形成量子ドットの構造観察から、成長面内の形状異方性と成長法特有の成長速度異方性が一致することを見出すとともに、成長法による量子ドットの形成過程の差異を明らかにしている。

3. InAs量子ドットの量子準位の同定結果をもとにした理論解析から、サブバンド間発光によるTHz電磁波が検出可能な強度であることを明らかにしている。さらに、実際にTHz電磁波の観測を行い、理論解析結果との比較から、サブバンド間遷移に伴うTHz電磁波発生の存在を初めて明らかにしている。

4. サブバンド間発光強度の増大や反転分布の形成に有効と考えられるカスケード的電子注入法を実現するために、垂直配列量子ドット構造の作製条件を実験的理論的に検討して、この構造を用いたカスケード電子注入法によるTHz電磁波発振器への応用の可能性を明らかにしている。

以上を要するに本論文は、InAs量子ドットのサブバンド間遷移に伴うTHz電磁波発生の存在を実証し、THz領域の発光デバイスの実現、さらにはカスケード的電子注入法による反転分布を利用したTHz発振器実現のための有用な情報を提供したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。