

テラヘルツ領域での高強度電磁波 による量子物性工学の研究

特集 プロジェクト研究

浜口 智 尋*, 森 藤 正 人**

Quantum Electronics with THz Electromagnetic Wave Radiation

Key Words : photoluminescence, free electron laser, quantum wells

1. はじめに

テラヘルツ光とは、 10^{12} Hz程度の周波数、波長でいえば $100\mu\text{m}$ 程度の電磁波をさす。これは遠赤外領域よりもさらに長波長であり、電波と赤外光の間にあたる領域である。これまで、この領域の電磁波を用いた物性工学の研究は、この周波数領域での適当な光源がないという事情もあって、あまり行われてはこなかった。しかし、自由電子レーザーという強力な光源の開発と発展により、テラヘルツ光は、超高速計算器や光通信といった分野への応用において大きな注目を集めている。

我々は平成9年度より標記の題目で新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託研究を行っている。このプロジェクトには大阪大学の複数のグループ、自由電子レーザー研究所、(財)レーザー技術総

合研究所が関わっており、様々な方向からテラヘルツ光の利用を試みている。その中で、我々工学研究科電子工学専攻のグループは、自由電子レーザーを用いて量子井戸内の電子の振る舞いを調べることを試みている。これにより、電子の状態やダイナミクスについての新しい知見を得て、さらには将来のエレクトロニクスをになうデバイスの開発への道を探るのがこの研究の目的である。

2. 自由電子レーザーとは

空間的に変調された磁場中を電子が運動すると、電子は蛇行運動をし、それに伴って電磁波が放射される。自由電子レーザーとは、この電磁波を空洞共振器内で往復運動させることにより増幅するもので、磁場の強さや電子のエネルギーによって、様々な波長の高強度のレーザー光が得られるのが、特長である。

我々は、本プロジェクトの一員である自由電子レーザー研究所の施設を利用し研究を行ってきた。実験に用いたレーザー光は、波長 $9.7\mu\text{m}$ 、時間幅5ピコ秒のパルスレーザーで、そのピークパワーは数メガワットにも達する(パルスレーザーなので平均パワーは数10mW程度である)。

3. 自由電子レーザーを光源とした 微細構造半導体の発光現象

研究の対象とした物質はGaAs/AlGaAsヘテロ接合を用いた非対称二重量子井戸構造である(図1)。エネルギーギャップの異なる2つの半導体を接合させると、物質中のポテンシャルに段差が出来、電子が一方の半導体のみに閉じ込められ、2次元電子系を形成する。このような量子井戸に代表される低次元系は、多くの物理的性質が通常の3次元物質とは著しく異なっているため、近年多大な注目を集め、



*Chihiro HAMAGUCHI
1937年4月13日生
1966年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科・電子工学専攻、教授、工学博士、電子物性
TEL 06-6879-7765
FAX 06-6879-7753
E-Mail hamaguti@ele.eng.osaka-u.ac.jp



**Masato MORIFUJI
1962年7月12日生
1990年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系修了
現在、大阪大学大学院・工学研究科電子工学専攻、助手、工学博士、半導体物理
TEL 06-6879-7766
FAX 06-6879-7753
E-Mail morifuji@ele.eng.osaka-u.ac.jp

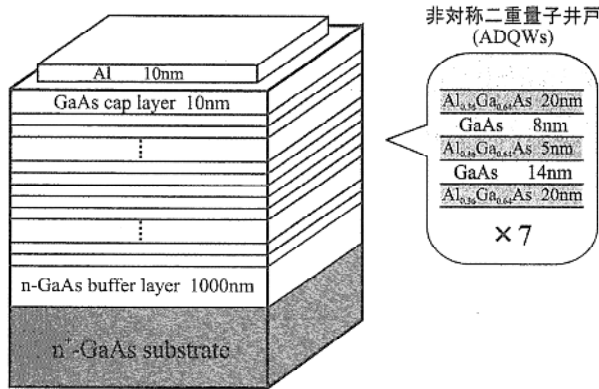


図1 実験に用いた非対称二重量子井戸構造.

現在では最先端の半導体研究の中心的課題となっている。

図1の構造では、電子は2つのGaAs層それぞれに閉じ込められる。このような電子は、離散的な準位を形成するのだが、構造が非対称(GaAs層の幅が異なる)であるためそれぞれの量子井戸で異なるエネルギーを持つ。従ってこのような構造からは広い量子井戸・狭い量子井戸内両方での電子-正孔の再結合によるルミネッセンスが観測される。図2(a)はHe-Neレーザを光源として測定した、非対称二重量子井戸からのフォトルミネッセンススペクト

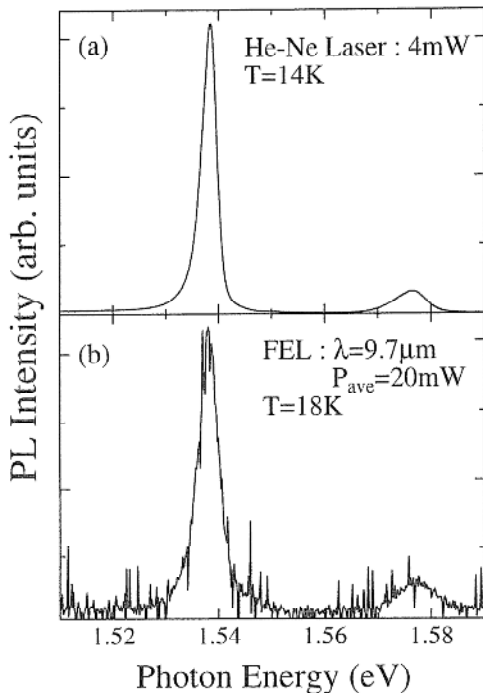


図2 非対称二重量子井戸構造からの発光スペクトル。(a) He-Neレーザ照射。(b) 自由電子レーザ照射。

ルである。He-Neレーザの波長は633nmである。フォトルミネッセンスの観測のためには電子-正孔対を生成しなくてはならないので、レーザ光のエネルギーは当然バンドギャップより高エネルギーである。

当初我々は、ここに自由電子レーザ光を照射することによりルミネッセンスに変調を加え、その変化を観測することで、電子準位間の励起過程を明らかにすることを目的に実験を行ってきた。

ところが、その過程で、自由電子レーザ光を照射するだけでも非対称二重量子井戸からの発光が観測できることを見出した(図2(b))。このような、バンドギャップ以下のエネルギーの励起光によるルミネッセンスの存在はこれまでの常識では理解できず、当然他の観測の報告もない。何か他の要因によるものではないかとも考えられるのだが、図3に示したように、自由電子レーザの出力を変えるとルミネッセンス強度も大きく変化するので、自由電子レーザが関与していることは確かなようである。またルミネッセンスはレーザパワーのべきに依存していることも確かめられた。

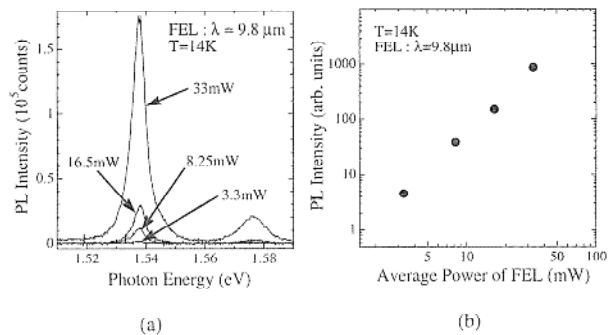


図3 ルミネッセンスの自由電子レーザ光強度依存性。(a) スペクトル。(b) ピーク強度の励起光強度依存性。

He-Neレーザ励起のものとは違って、この自由電子レーザによるルミネッセンスは試料に電圧を印加しても変化しない。この電圧印加によるルミネッセンスの変化は、量子閉じ込めシュタルクシフトとしてよく知られており、低次元系に特有の現象である。このような現象が見られないということは、自由電子レーザにより多量のキャリアが生じ、それにより印加電圧が遮蔽されているを示している。従って、自由電子レーザによりかなり多量のキャリアが生成されているものと思われる。

4. 発光のメカニズムは？

問題は、なぜ低エネルギーの励起光でルミネッセンスが生じるのか、ということである。一つの可能性として、多光子吸収が起こっているのではないかと、との考えがある。価電子帯の電子が一度に複数の光子を吸収して、伝導帯へと励起されればルミネッセンスは生じる。しかし可能なのはせいぜい二光子吸収程度であり、一度に10数個もの光子が吸収されると考えるのは、あまりに常識に反している。

測定中、試料は温度可変クライオスタット中に置かれており、そのため試料温度は10～20K程度と見積られる。しかし、強力な自由電子レーザーの照射により、試料の温度はそれよりも上昇しているものと考えられ、そのため熱的に電子が励起されているかも知れない。実際、発光スペクトルの温度変化を見ると、自由電子レーザーで励起したものは、He-Neレーザー励起のものに比べて、温度変化が顕著でなく、ピーク幅も広がっている(図4)。このこと

は、自由電子レーザーにより試料温度が上昇していることを裏付けている。しかし、温度上昇を見積もっても、熱的励起を生じることは考えられない。

また、レーザー光により局所的に強い電界が生じ、電子が強く加速されることで、衝突電離というメカニズムが起こっていることも考えられる。このような機構により、キャリアが励起されればルミネッセンスが生じることも考えられる。しかし、つきつめて考えると、このようなメカニズムも現実的ではない、との結論に達する。

上記の非対称二重量子井戸構造はn型のGaAs上に作製したものであった。ドーピングされていないGaAsの二重量子井戸からは自由電子レーザー光によるルミネッセンスは認められなかった。この事実は、発光の過程には試料中の不純物が関与していることを、強く示唆している。しかし、発光メカニズムの詳細は未だ不明である。

5. 終わりに

発光メカニズムの解明が今後の大きな課題である。そのために、我々は、励起光である自由電子レーザー光の波長の変化が、どのようにルミネッセンスに影響を及ぼすかを調べることを計画している。実は、標題とは矛盾して、実験に用いた自由電子レーザーの波長はテラヘルツというよりむしろ未だ赤外の領域である。さらに長波長の励起光でもルミネッセンスが見られるのかどうか、非常に興味を持たれるところである。ここに紹介したように、テラヘルツ領域における量子物性には未解明の部分が多く、今後のより一層の研究が期待される。

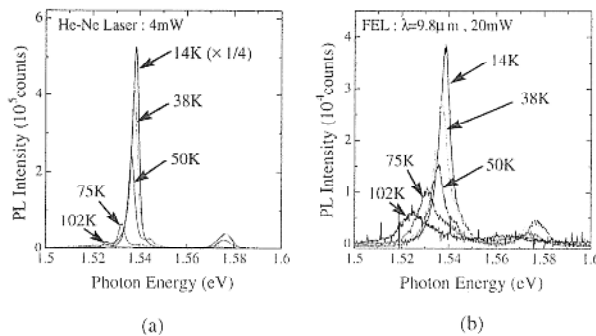


図4 ルミネッセンスの温度依存性。
(a) He-Neレーザー照射。(b)自由電子レーザー照射。