

最近の技術から

微小光共振器中の GaAs 量子井戸の自然放出

横山 弘之

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒305 つくば市御幸丘 34

1. はじめに

微小共振器による自然放出の制御は、量子電気力学の基礎という視点¹⁾ からだけでなく、超低消費パワー、超高速動作が可能で新しいタイプの発光デバイスを実現するという視点からも興味深い²⁻⁵⁾。デバイスを念頭におくとすれば当然半導体材料を用いて「自然放出の増強」(enhanced spontaneous emission: 以下 ESE と記す)あるいは「自然放出の禁止」(inhibited spontaneous emission: 以下 ISE と記す)を引き起こすことができるかが重要になる。

2. ファブリ・ペロー共振器による ESE, ISE

ESE, ISE を最も顕著に引き起こす構造は波長サイズの3次元光閉じ込め共振器である^{1,2)}。現在の微細加工技術を用いれば波長サイズ以下の箱構造を作るのは可能であるが、キャリアの表面再結合レートが著しく増大するという問題が生じる。このため現時点では、半導体の微小箱は ESE, ISE を明瞭に観測する上で必ずしも適した構造ではない。

共振器軸方向の小さな立体角への放射を問題にするならばファブリ・ペロー (F-P) 開共振器を用いても ESE, ISE を観測することができる。この場合でも物質の発光幅内に存在する F-P 共振器の共振ピークがたかだか一つという条件を満たすことが必要となる。このため(とくに室温での)ブロードな半導体発光でスペクトル積算した出射パワーの ESE, ISE を見ようとする、原子の発光と異なり、F-P 共振器長を数波長程度以下にしなければならない。この条件の必要性は、共振器長を変えて共振器軸方向への放射パワーを測定した実験によって観測されている⁴⁾。

ところで、波長よりも十分大きなサイズの1対の反射鏡を用いて波長程度の間隔の共振器を構成すると、中の発光物質から見ればこの構造は F-P 開共振器というよりは1次元閉じ込めの導波路である。この場合、あらゆる方向への光放射が自由空間とは異なってくるため、空間積分した自然放出レート、すなわち実測する自然放

出寿命に変化が生じる⁶⁾。

3. モノリシック1次元微小共振器中の GaAs 量子井戸の発光

半導体を半波長~1波長程度の発光層とする場合、そのエッチング加工の難しさの問題を回避するため、反射鏡としてエピタキシャル成長した1/4波長半導体膜のスタックを利用することが考えられる。ただしこの場合には、膜に垂直方向の実効共振器長も数波長になる上に、反射率は強い角度依存性を持ち、理想的な1次元光閉じ込め構造ではないことに留意しなければならない。

図1に実験に用いた微小共振器の構造を示す。サンプルの半分はエピタキシャル成長した AlAs/AlGaAs の多層膜と ZnS/SiO₂ 多層膜で半波長厚の GaAs/AlGaAs 多重量子井戸 (MQW) をはさむ構造となっている (micro-cavity section: MCS)。もう半分の領域は表面の反射率を下げる目的で、1層の ZnS のみを施している (weak-cavity section: WCS)。本構造の半導体部分の成長には MBE を用いた。このような構造にしたのは、共振器の有無の差を同じ品質の発光層を用いて調べる必要があることによる。ただし、図1に示す構造では、WCS においても AlAs/AlGaAs 反射鏡と有限の表面反射率とによって残留共振器効果が存在する。

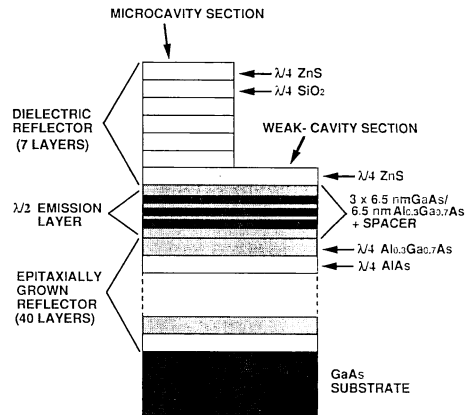


図1 GaAs MQW を発光層とするモノリシック微小共振器の構造

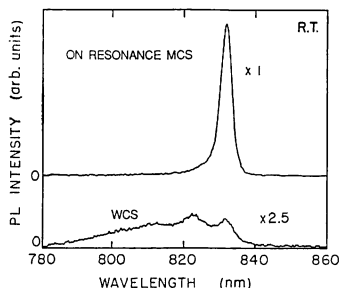


図2 微小共振器中 GaAs MQW からの垂直方向への発光スペクトル

発光層の励起には He-Ne レーザー光 ($\lambda=633$ nm), およびピコ秒の可視半導体レーザー光 ($\lambda=660$ nm) を用いたが, MCS, WCS とともに発光層に励起光が侵入する際の表面反射率は 10% 未満である。

図2は層に垂直な方向への放射光を $\sim 10^{-3}\pi$ の立体角で検出した際のスペクトルを示している。MCSでは共振器の共振幅でのみ発光し,かつWCSと比べるとピーク強度が ~ 15 倍に大きくなっており,スペクトル積分した発光強度も約3倍であった。ただし,通常見られる反射体がまったくないときのスペクトルと比べると,WCSにおいても残留共振器効果のためにスペクトルが変調されていることがわかる。この測定は励起キャリア密度が $\sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$ で行っており,正味の誘導放出は起こらない条件である。このことから観測結果は「微小立体角中」のESEと考えて良い。また,垂直方向で見た共振波長がMQWの発光波長から外れたoff resonanceのMCSでは逆にWCSに比べて,スペクトル積分した発光強度が1桁程度低くなることが観測された。

全空間にわたって積分した自然放出レートの変化を見る直接的な方法は自然放出寿命を測定することである。実験結果を図3に示す。MQWの非発光寿命が2nsと短いために,実験では初期励起キャリア密度を $\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$ にして発光再結合寿命がWCSで ~ 2 nsとなるようにした。この条件でも,レーザースポット径が小さい($\sim 20\mu\text{m}$)ので層に平行方向の誘導放出が問題にならず,共振器軸方向においても透過損失を考えるとやはり誘導放出の影響は無視しうる。図3のデータから自然放出レートに対する共振器の影響を評価すると,on resonanceなMCSではWCSに対しておよそファクター2のESEが起こり,off resonanceなMCSでのISE効果はほとんどないということになる。多層膜反射鏡を用いた本実験に対する理論的評価は容易でないが,現時点では観測されたMCSの寿命変化を,反射鏡を全く持たないQWとの比較ではなく,あくまで本実

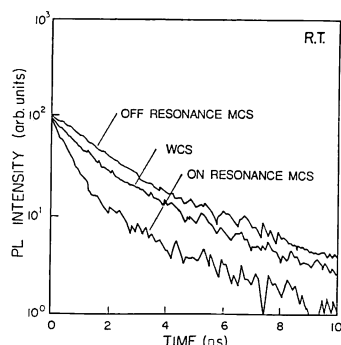


図3 発光強度の時間変化

験のWCS構造との比較としてとらえておく必要がある⁷⁾。

4. おわりに

以上述べたほかに,QWのエキシトン発光を利用した実験⁸⁾でも,小さな立体角で見た場合には微小共振器による明らかなESE,ISEが観測されたと考えられる。しかし,自然放出寿命の変化という点では,さらに今後まったく共振器効果のない構造との精密な比較を行う実験が必要である。また,自然放出過程から誘導放出過程への移行など,面発光レーザー等のデバイス研究の上から微小共振器効果について明らかにすべき点は多い。

文 献

- 1) D. Kleppner: "Inhibited spontaneous emission," Phys. Rev. Lett., **47** (1981) 233-236.
- 2) 小林哲郎, 瀬川太郎, 森本朗裕, 末田 正: "自然放出を制御した新形のレーザー, 発光素子, 光機能素子", 第43回応用物理学学会学術講演会予稿集, 29a-B-6 (1982); "微小共振器レーザー (CMC レーザー) の特性の検討", 第46回応用物理学学会学術講演会予稿集, 4a-N-1 (1985).
- 3) E. Yablonovitch: "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett., **58** (1987) 2059-2062.
- 4) 横山弘之, 西 研一, 阿南隆由, 尾編研太郎: "超短共振器中 GaAs/AlGaAs 量子井戸からの狭スペクトル輻ルミネセンスの放射", 第35回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28a-ZP-9 (1988).
- 5) H. Yokoyama, K. Nishi, T. Anan and H. Yamada: "Enhanced spontaneous emission from GaAs QWs with monolithic optical microcavities," Tech. Dig., Topical Meeting on Quantum Wells for Optics and Optoelectronics, paper MD-4 (Salt Lake City, Mar. 1989); H. Yokoyama and S. D. Brorson: "Rate equation analysis of microcavity lasers," J. Appl. Phys., **66** (1989) 4801-4805.
- 6) S. D. Brorson, H. Yokoyama and E. P. Ippen: "Spontaneous emission rate alteration in optical waveguide structures," IEEE J. Quantum Electron., Sept. (1990) to be published.
- 7) 山本喜久: 私信.
- 8) Y. Yamamoto, S. Machida, K. Igeta and Y. Horikoshi: "Enhanced and inhibited spontaneous emission of free excitons in GaAs quantum wells in a microcavity," 6th Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (Rochester, Jun. 1989).

(1990年4月27日受理)