



半導体量子井戸構造における光非線形効果

—— 光デバイスへの応用 ——

河口 仁 司

山形大学工学部 〒992 米沢市城南 4-3-16

1. はじめに

半導体量子井戸 (MQW) 構造では, (1) サブバンドが形成されること, (2) 電界の印加により, 電子状態が大きく変化すること, (3) 励起子の結合エネルギーが大きくなり, GaAs 系や InP 系においても, 室温で励起子吸収が明瞭に観測されることなどにに基づき, バルクとは異なった光非線形効果を示す. 表 1 に非線形効果とデバイス例を示す. 本文では, 量子井戸構造半導体の光非線形効果を用いた全光型の光素子の最近の進展を述べる.

2. 超短光パルス発生

MQW の励起子波長付近の吸収飽和効果を利用し, 半導体レーザー (LD) や色中心レーザーの受動モード同期によるピコ秒~サブピコ秒の光パルス発生が行われている. GaAs/AlGaAs MQW 可飽和吸収体による GaAs LD モード同期では 1.6 ps の光パルス列が得られ¹⁾, また, InGaAs/InAlAs MQW による NaCl 色中心レーザーのモード同期では 275 fs のパルス列が得られている²⁾. 良好な可飽和色素が存在しない近赤外域では有効な手段になるとともに, 光源とのモノリシック化も可能となる.

表 1 MQW 構造光非線形の光デバイスへの応用

| 光非線形効果 | MQW 構造による増強 | 応 用 例 |
|------------------------|---------------------|------------------------------|
| 吸収飽和 | 室温励起子吸収 | レーザーモード同期 |
| $\chi^{(2)}$ | 非対称 MQW による反転対称性の消去 | 第二高調波発生 |
| $\chi^{(3)}$ 非線形屈折率 | 室温励起子吸収 | 光制御光スイッチ 光双安定素子 空間光変調器 |

3. 第二高調波発生

構造が非対称な多重量子井戸構造の量子化準位間遷移を用いると反転対称がなく, 第二高調波の発生が期待できる³⁾. 電界を印加した GaAs MQW の価電子内サブバンド間遷移により, 10 μm 帯の入射光に対し, $2.8 \times 10^{-8} \text{ m/V}$ の 2 次の非線形感受率が測定されている⁴⁾. この値はバルク結晶に比べ 73 倍大きな値である. また, 非対称井戸構造をもつ GaAs MQW を用い, 基本波と第二高調波の両者とも共鳴をとることににより, $7.6 \times 10^{-7} \text{ m/V}$ というさらに大きな測定値が報告されている⁵⁾.

4. 光双安定素子と全光型光スイッチ

光非線形媒質とファブリ・ペロー共振器などの光帰還との組合せにより光双安定素子が実現される. 実遷移に伴う光非線形効果は非飽和の吸収をもち, また, 光入力の増大とともに非線形屈折率の大きさが飽和する. したがって, このような媒質を用いて分散型の光双安定性を得るためには, 飽和状態での屈折率変化 Δn_s と光損失 α の間に $\Delta n_s/\alpha \geq 2/k$ の関係を満足する必要がある⁶⁾. k は自由空間の波数である. 非線形材料の創製には非線形屈折率を大きくすると同時に非飽和吸収を小さくし高いフィネスをもつ光共振器を形成できるようにする必要がある. MQW では第 1 量子準位の重い正孔の関与した遷移 ($n=1\text{hh}$) のわずかに長波長側で $\Delta n_s/\alpha$ が大きくなり, 双安定動作の最適波長になる.

室温での双安定動作が GaAs/AlGaAs MQW および GaInAs/AlInAs MQW で実現されている. GaAs/AlGaAs MQW の吸収端波長を波長 830 nm の高出力 GaAs 半導体レーザーの動作波長と一致させ, 6 mW 光出力の LD を光源として双安定性が得られている⁷⁾.

また, 光ファイバ伝送と整合性の良い 1.5 μm 帯においても室温において光双安定が実現されている⁸⁾. 68A の GaInAs と 65A の AlInAs の 50 周期からなる

MQW 素子が非線形媒質として用いられた。MQW の表面に多層高反射膜が形成され、基板上にとりつけた後、InP 基板がエッチングにより除去されている。このウェハを平面鏡と対向させることにより、ファブリ・ペロー共振器を形成している。 $n=1\text{hh}$ 遷移による吸収ピークよりも約 32 meV 長波長に光入力の波長を設定し、双安定動作が得られた。この波長では吸収が数 10 cm^{-1} と小さく、高い共振特性が得られる。

最近、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯でも共振器を一体化した面型の光双安定素子が実現された⁹⁾。前述の GaInAs/AlInAs MQW の両面に $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ の高反射膜を直接形成しサファイア板のヒートシンクに張りつけた構造である。フィネス約 20 の良好なエタロン特性が実現され、パルス幅 $1\ \mu\text{m}$ 以下の光入力に対し、励起キャリア数の変化に伴う屈折率変化による光双安定動作が確認されている¹⁰⁾。しかし、パルス幅をより長くしたり、デューティを $1/500$ 以上にすると熱効果が顕著になり自励発振を生じ、やがて、熱による屈折率変化による光双安定性を示すようになる。

熱設計は実用上大きな問題である。透過型では動作できなくなるが、厚い銀蒸着膜を一方の反射鏡として用い、この銀面を放熱板にインジウムでとりつけた GaAs 双安定素子では 0.5 秒まで熱的に安定な素子が実現され¹¹⁾、連続動作が可能になった。MQW 構造との組合せにより、いっそうの高性能化が期待できる。

一方、超高速の光非線形現象である光シュタルク効果を用い、GaAs/AlGaAs MQW ファブリ・ペローエタロンを用いて、サブピコ秒の全光型光ゲートが実現されている¹²⁾。光入力が 1 GW/cm^2 ときわめて大きいのが欠点である。

光導波路型の光スイッチング素子も活発に検討されている。GaAs/AlGaAs MQW を光導波路層とした単一モードストリップ装荷型の方向性結合器が作製された¹³⁾。ピーク光入力 40 W でスイッチングが生じ、立上り 10 ps 以下の高速応答が得られている。しかし、回復時間はキャリアの拡散寿命時間で決まっており、約 4 ns となっている。

5. 空間光変調器

量子閉込め Stark 効果による透過率変化を利用し、CCD を組み合わせた空間光変調器 (SLM) が実現されている¹⁴⁾。入力情報は CCD の直列レジスタと並列レジスタとの組合せにより CCD アレイ全面に書き込まれ、電圧分布を形成する。これにより MQW の透過率が空間的に制御されることになる。CCD のクロックは 1 GHz 以上、量子閉込め Stark 効果自体は 100 ps 以下の応答速度があるとされており、超高速 SLM が実現できる可能性が高い。

文 献

- 1) Y. Silberberg, P. W. Smith, D. J. Eilenberger, D. A. B. Miller, A. C. Gossard and W. Wiegmann: *Opt. Lett.*, **9** (1984) 507.
- 2) M. N. Islam, E. R. Sunderman, I. Bar-Joseph, N. Sauer and T. Y. Chang: *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 1203.
- 3) J. Khurgin: *Phys. Rev. B*, **38** (1988) 4056.
- 4) M. M. Fejer, S. J. B. Yoo, R. L. Byer, A. Harwit and J. S. Harris, Jr.: *Phys. Rev. Lett.*, **62** (1989) 1041.
- 5) E. Rosencher, P. Bois, J. Nagle and S. Delaire: *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1063.
- 6) E. Garmire: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25** (1989) 289.
- 7) H. M. Gibbs: *Optical Bistability: Controlling Light with Light* (Academic Press, Orlando, 1985) p. 145.
- 8) H. Kawaguchi and Y. Kawamura: *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1013.
- 9) K. Nonaka, H. Kawaguchi, Y. Kawamura, H. Tsuda and K. Kubodera: *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **1** (1989) 55.
- 10) 野中弘二, 河口仁司, 河村裕一, 久保寺憲一: 信学技報, **OQE 88-142** (1989).
- 11) E. Masseboeuf, O. Sahlen, U. Olin, N. Nordell, M. Rask and G. Landgren: *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 2290.
- 12) D. Hulin, A. Mysyrowicz, A. Antonetti, A. Migus, W. T. Masselink, H. Morkoc, H. M. Gibbs and N. Peyghambarian: *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 749.
- 13) R. Jin, C. L. Chuang, H. M. Gibbs, S. W. Koch, J. N. Polky and G. A. Pubanz: *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1988) 1791.
- 14) B. F. Aull, K. B. Nichols, W. D. Goodhue and B. E. Burke: Paper ThA3 at Spatial Light Modulators and Applications, South Lake Tahoe, Nevada (1988)

(1989年8月31日受理)