

半導体多重量子井戸構造を用いたフォトリフラクティブ光デバイス

志村 努・岩本 敏・黒田 和男

半導体量子井戸材料では、キャリアの閉じ込め効果により室温で励起子を存在させることができ、励起子吸収スペクトルの電場による変化からクラマース・クローニッヒの関係により屈折率変化が生じる、field induced broadening や量子閉じ込めシュタルク効果 (quantum confined Stark effect; QCSE) を用いることで、通常のポッケルス効果に比べ同じ空間電場で1~2桁大きな屈折率変化が得られる。これをフォトリフラクティブ材料に応用することにより、同じ空間電場でより大きな屈折率変化が得られるため、バルクフォトリフラクティブ材料では実現し得ない高速性と大きな屈折率変化を兼ね備えた材料が実現可能となる。さらに半導体材料では、混晶の組成あるいは組成比を変えることによりバンドギャップエネルギーが変化させられるため、さまざまな波長に感度をもつ材料を人工的に作る事ができる。

このような考えに基づき従来いくつかの組成の組み合わせによる半導体量子井戸フォトリフラクティブ材料が試みられてきた¹⁻⁴⁾。最も多く報告されているのが、作製が比較的容易で850 nm 近辺に感度をもつ AlGaAs/GaAs 材料であり、そのほかに1.55 μm を狙った4元素の混晶材料、あるいはより短波長域に感度をもつII-VI族材料が報告されている。われわれはAlGaAs/GaAs材料よりも長波長域の1 μm 帯に感度をもつ材料としてInGaAs/GaAs多重量子井戸を選択し、フォトリフラクティブ効果の発現とデバイス化を行ってきた⁵⁾。

われわれの作製したデバイスの構造例を図1に示す。成長は有機金属気相成長法 (MOVPE) により行った。半絶縁性GaAs基板上にまず界面の平坦化のためにGaAsバッファ層を200 nm成長させ、厚さ7.5 nmのInGaAs井戸層と厚さ30 nmのGaAsバリアー層を60周期積み上げた。基本的にはバンドギャップエネルギー、井戸層の厚さ、および井戸層とバリアー層のエネルギー差 (井戸の深さ) が励起子の吸収波長を決める。このサンプルではIn_{0.1}Ga_{0.9}Asという組成比を選択したが、井戸の深さは

In_xGa_{1-x}Asのxの値により変化する。またIn_xGa_{1-x}AsとGaAsではxが大きくなるにつれ格子不整合量が増大するため格子に歪みが生じ、これによってもバンドギャップエネルギーは変化する。これらのパラメーターにより励起子吸収の中心波長が決まる。

Field induced broadening やQCSEは電場によって屈折率が変化する一種の電気光学効果であるが、ポッケルス効果が電場に比例するのに対し、これらは電場の二乗に比例するため、干渉縞と同周期の回折格子を作るためには直流電場を外部から印加する必要がある、このために材料は高い抵抗値をもたねばならない。材料の半絶縁性はフォトリフラクティブ中心にトラップされたキャリアにより作られた電荷分布を一定時間維持するためにも必要な条件である。ところがMOVPEあるいは分子線エピタキシー (MBE) により作製されたInGaAs/GaAs層はそのままでは十分な抵抗率をもたない。そこでわれわれは水素イオン打ち込みにより材料の半絶縁化を行った。打ち込みの加速電圧は3 MeV、dose量は 10^{15} cm^{-2} とした。これにより抵抗率が $10^{-1} \Omega \text{ cm}$ から $10^5 \Omega \text{ cm}$ のオーダーに改善された。打ち込みののち電極を蒸着し、さらに200°Cで60秒間Ar雰囲気中でアニールした。

この試料についてのフォトリフラクティブ効果の諸定数の測定結果を示す。この配置では井戸層に平行に電場がかかることになるので、電界吸収効果が主な吸収変化の原因

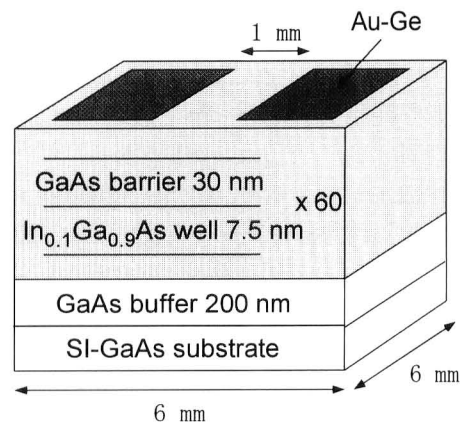


図1 デバイスの構造例。

東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: shimura@iis.u-tokyo.ac.jp

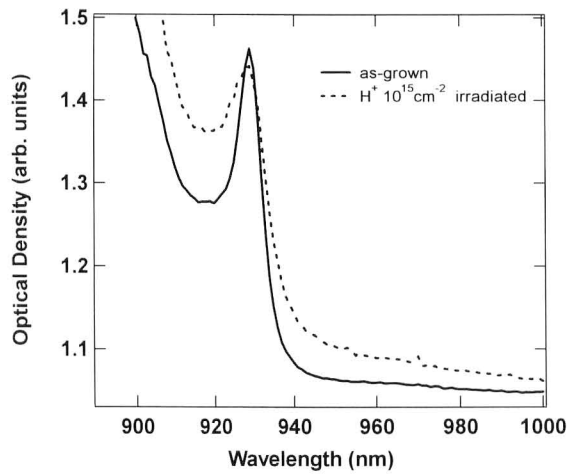


図2 試料の吸収スペクトル。イオン打ち込み後も励起子吸収ピークが観測されている。

となる。図2にイオン打ち込みの前と後での吸収スペクトルを示す。やや線幅の広がりはみられるものの、打ち込み後も明瞭な励起子吸収ピークが観測されている。

図3に電場の印加による透過率の変化 $\Delta T/T$ と吸収格子の振幅 $\Delta\alpha$ と二光波混合ゲイン Γ の波長依存性を示す。干渉縞のピッチ Λ は $6.2\ \mu\text{m}$ 、外部印加直流電場は $12\ \text{kV/cm}$ 、平均光強度は $28\ \text{mW/cm}^2$ である。吸収変化と二光波混合ゲインのピークが互いにずれていることがクラマース・クロネヒヒの関係による屈折率変化の特徴を表している。ゲインの最大値は $924.5\ \text{nm}$ の波長で $138\ \text{cm}^{-1}$ という大きな値が得られた。

二光波混合ゲインには屈折率格子のみが寄与するが、格子からの回折効率には、同時に存在する吸収格子からの寄与も含まれる。図4に回折効率の波長依存性を示す。測定条件は平均光強度が $60\ \text{mW/cm}^2$ である以外は同じである。ピーク波長を図3の結果と比較すると回折効率に対して吸収格子からの寄与も屈折率格子と同程度に大きいことがわかる。厚さわずか $2\ \mu\text{m}$ の格子からの回折であることを考えると、大きな回折効率を得られているといえる。

以上われわれの作製したデバイスの一例を紹介したが、InGaAs/GaAs系のフォトリラクティブデバイスとしては初めてのものであり、これまでにない波長域で高感度と高速応答（光強度 $7\ \text{mW/cm}^2$ に対して格子の書き込み時定数 $100\ \mu\text{s}$ ）を実現した。時定数 $100\ \mu\text{s}$ をもって高速といえるかどうかは難しいところだが、基本的にフォトリラクティブ素子が2次元あるいは3次元デバイスであることを考えると、並列性を考慮すれば時系列処理と対抗しようと考えている。今後は、素子設計の自由度の大きさを生かした感度波長の多様化、QCSE等の効果を生かした一層の高性能化を目指して研究を進める予定である。

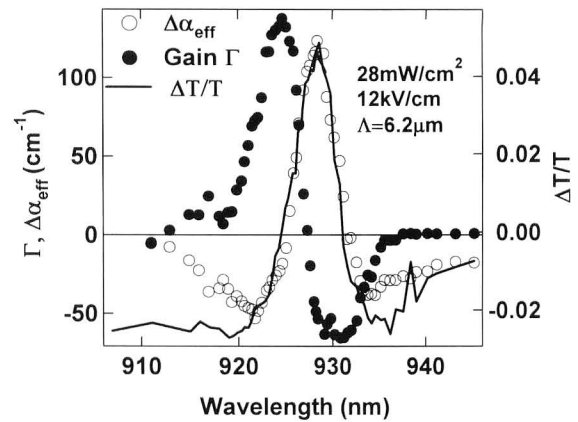


図3 透過率の変化 $\Delta T/T$ および吸収格子の振幅 $\Delta\alpha$ 、二光波混合ゲイン Γ の波長依存性。

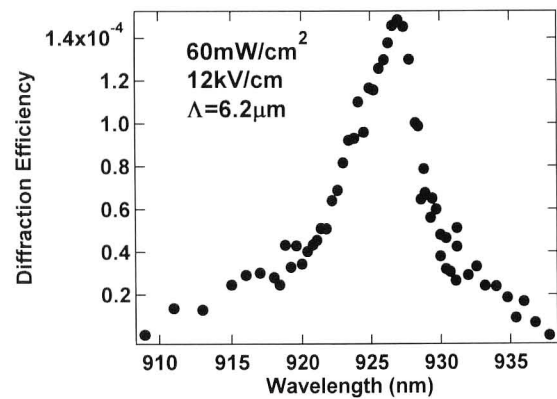


図4 四光波混合の配置での回折効率の波長依存性。

文 献

- 1) D. D. Nolte and M. R. Melloch: "Photorefractive quantum wells and thin films," *Photorefractive Effects and Materials*, ed. D. D. Nolte (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1995) pp. 373-451.
- 2) Q. Wang, R. M. Brubaker, D. D. Nolte and M. R. Melloch: "Photorefractive quantum wells: Transverse Franz-Keldysh geometry," *J. Opt. Soc. Am. B*, **9** (1992) 1626-1641.
- 3) A. Partovi, A. M. Glass, D. H. Olson, G. J. Zydzik, K. T. Short and R. D. F. Austin: "High sensitivity optical image processing device based on CdZnTe/ZnTe multiple quantum well structures," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 1832-1834.
- 4) C. De Matos, A. Le Corre, H. L'Haridon, B. Lambert, S. Salatin, J. Pleumeekers and S. Gosselin: "Photorefractive *p-i-n* diode quantum well operating at $1.55\ \mu\text{m}$," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 3576-3578.
- 5) S. Iwamoto, H. Kageshima, T. Yuasa, M. Nishioka, T. Someya, Y. Arakawa, K. Fukutani, T. Shimura and K. Kuroda: "Resonant photorefractive effect in InGaAs/GaAs multiple quantum wells," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 321-323.

(2000年4月3日受理)