

最近の技術から

半導体量子閉じ込め構造における励起子ポラリトン

勝 山 俊 夫

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪1-280

1. まえがき

最近、筆者らは、励起子（電子・正孔対）と光がコヒーレントに結合した励起子ポラリトンに着目し、量子井戸や細線と呼ばれる量子閉じ込め構造中の特性の検討を行っている¹⁾。このような励起子ポラリトン（以下、ポラリトンと呼ぶ）は、ナノメーターサイズにおける電磁波と分極の相互作用によってその特性が記述できる。近年、このような技術として、光STM（走査トンネル顕微鏡）に代表される近接場フォトニクス²⁾や微小共振器レーザー等の共振器量子電磁気学³⁾等が注目され、活発な研究が進められているが、ポラリトンもそのようなナノメーターフォトニクスともいべき新しい技術の一つと位置付けることができる。このように、ポラリトンの応用は、新しいナノメーターサイズの超高速極微小電子・光素子を実現する可能性をもつ。ここでは、このポラリトンの基礎的な特性とその応用について報告する。

2. 量子井戸導波路中の励起子ポラリトン

ポラリトンは、量子井戸のような量子閉じ込め構造の中を安定に伝搬する。このことは、中心にGaAsからなる量子井戸層を1層設け、そのまわりをGaAs/AlGaAsの超格子層で形成した図1に示す導波路によって確かめられた⁴⁾。ポラリトンが実際に伝搬していることを確認するために、導波路の一端から光パルスを入射し、パルスの伝搬時間の変化を液体He温度で測定した（図1）。TE偏光における伝搬の遅延時間は、1.623 eVで最大値5.3 psをとる。このエネルギー位置は、重い励起子（hh-ex）の吸収線と一致している。遅延時間5.3 psは、導波路構造を考慮した計算から、その群速度が真空中の光に比べて3桁も減少していることを示している。このエネルギー位置の一致と群速度の大幅な減少は、量子井戸導波路中で光がポラリトンとして伝搬している直接の証拠である。一方、TM偏光では、1.646 eV、すなわち軽い励起子（lh-ex）に共鳴する位置で、遅延時間が最大4.7 psとなる。軽い励起子によるポラ

リトン効果は、TM偏光で顕著である。

3. 電界変調効果

ポラリトンでは、外部からの電界等に鋭敏に反応する電子・正孔を通して光の伝搬状態を大幅に変化させることが期待される。このような特性を明らかにする基礎実験として、導波路に電極を形成した試料を作製し、電界印加によるポラリトン伝搬の位相変化を液体He温度で測定した⁵⁾。図2は、印加電界強度に対する相対的な屈折率変化を示したもので、屈折率変化はポラリトンの位相変化に対応する。図から入射光強度を $7.8 \times 10^{-11} \text{ J/cm}^2$ と低く抑えると、電界強度が40 kV/cmのとき相対的な屈折率変化が20%に達することが明らかにされた。入射光強度が $1.6 \times 10^{-8} \text{ J/cm}^2$ と比較的高い場合は、屈折率変化が1/5以下と低くなる。この減少は、主にポラリトン間の散乱によると考えられる。通常の電気光学効果による屈折率変化は、入射光強度が高い場合と同じ程度の変化なので、20%に達する屈折率変化は非常に大きなものであることが理解される。

4. 量子細線中のポラリトンとデバイスへの応用

量子井戸構造から閉じ込めの次元をさらに上げると量子細線構造になる。この系でのポラリトンは、量子閉じ込め効果による振動子強度の増加のために、ポラリトンの安定性を表す指標であるLT分裂量（縦励起子と横励起子のエネルギー差）が大幅に増加する。このため、ポラリトンの関与する実効的な屈折率が増加し、ポラリトンの媒質中の波長が減少する。このことは、ポラリトンを非常に狭い導波路に沿って伝搬させることができることを示すものである。一例として、GaAs量子細線の場合を考えると、20 nm幅の細線からなる導波路の場合、電磁場の横方向拡がりは67 nm程度と非常に小さくできることが数値計算の結果から示されている⁶⁾。

このように、ポラリトンは量子細線からなるナノメーターオーダーの導波路を伝搬することができるので、2本の導波路を近接して並べ、電界印加による位相変化

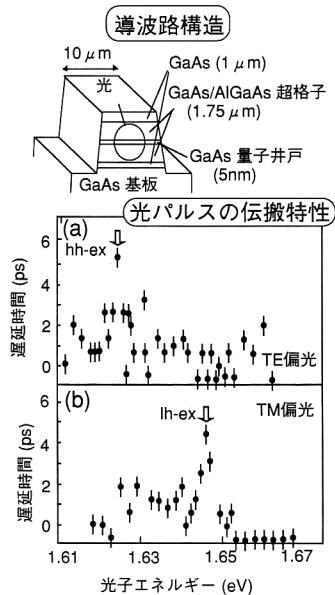


図1 量子井戸導波路の光パルスの遅延時間特性。
(a)TE偏光,(b)TM偏光。挿入図:量子井戸導波路の構造(導波路長:250 μm)。

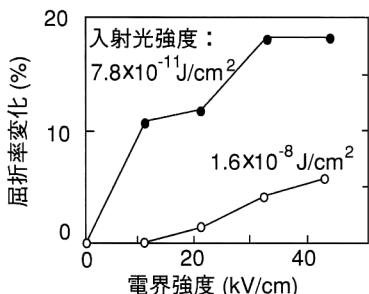


図2 電界印加による屈折率の変化

を用いると、いわゆる方向性結合器型のスイッチを形成することができる。有限要素法による計算によると、長さ2 μm以下で細線間の横方向トンネリングが可能である(図3)。この横方向トンネリングを電界印加で制御することにより超高速のスイッチができる。この場合のスイッチング時間は、スイッチング部でのポラリトンの走行時間と電極間容量による制限を受ける。前者は、図3の構成の場合数十fsであり、後者は電極領域が $0.5 \times 2 \mu\text{m}$ として0.3 ps程度と見積もることができる。したがって、ポラリトンを用いた場合、スイッチサイズを極微小化できることから超高速のスイッチングが可能となる。ただし、現在のところ、ポラリトンの測定は液体He温度という極低温で行われている。今後は量子閉じ

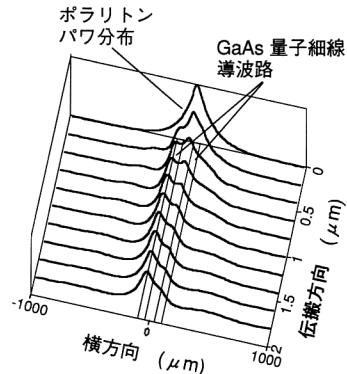


図3 平行導波路間のポラリトン横方向トンネリング(導波路幅:40 nm, 導波路間隔:80 nm)

込め効果の次元を上げるとともに材料・構造の最適化により、動作温度を上げていくことが重要である。

5. むすび

量子井戸や細線を伝搬するポラリトンは、①電界印加による位相変化が大きい、②数十 nm の横方向拡がりで極微細導波路を伝搬できる、③数 μm の長さのスイッチングデバイスを作製できる、等の特徴的な性質をもつ。このため、従来の単なる電子や光デバイスとは違った新しい極微細な超高速電子・光複合機能素子を実現する可能性をもつ。

本研究は通産省産業科学技術研究開発制度の一環としてNEDOからFEDを通じて委託された「量子化機能素子の研究開発」の成果である。

文 献

- 1) T. Katsuyama and K. Ogawa: "Excitonic polaritons in quantum-confined systems and applications to optoelectronic devices," *J. Appl. Phys.*, **75** (1994) 7607-7625.
- 2) たとえば、堀 裕和: "フォトン走査トンネル顕微鏡とその理論的解説", *応用物理*, **61** (1992) 612-616.
- 3) たとえば、横山弘之: "微小共振器レーザー: 現代と展望", *応用物理*, **61** (1992) 890-901.
- 4) K. Ogawa, et al.: "Polarization dependence of excitonic-polariton propagation in a GaAs quantum-well waveguide," *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990) 796-799.
- 5) K. Ogawa, et al.: "Electric field dependence of the propagation of quantum-well exciton polaritons in a waveguide structure," *Phys. Rev.*, **46** (1992) 13289-13292.
- 6) T. Katsuyama, et al.: "Electromagnetic field profile of an excitonic polariton in a quantum wire waveguide," *Semicond. Sci. Technol.*, **8** (1993) 1226-1230.

(1995年3月1日受理)