

半導体ナノ構造の光物性：原子分子との類似性と相違性

筑波大・物質工 日野 健一

半導体量子井戸、量子細線、量子ドットのような量子ナノ構造における線形及び非線形光学応答、レーザーによるコヒーレント制御について最近の研究を紹介する。また、原子分子系との類似性と相違性についても言及する。ここでは、主として半導体ナノ構造として Wannier-Stark ladder (WSL) を取り上げることとする。これは、図 1 に示すように、数十層の量子井戸からなる超格子の積層方向に静電場を印加した系である。

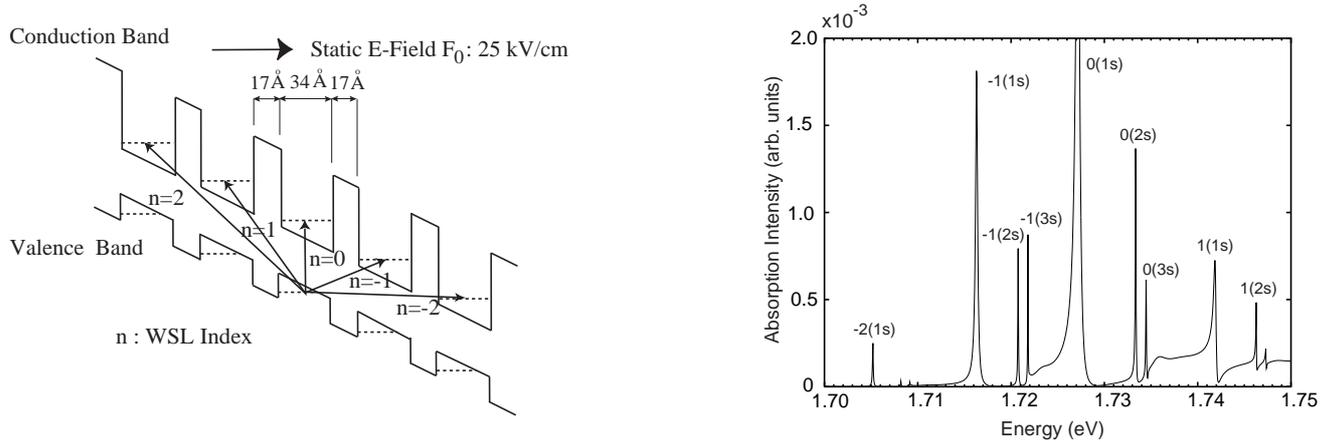


図 1: (左図) 17Å-GaAs/34Å-Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超格子の積層方向に 25kV/cm の静電場を印加した実空間における WSL の概念図。

図 2: (右図) 当該 WSL の光吸収スペクトル。吸収ピーク $n(k_s)$ は、WSL 指数 n と励起子量子数 k を表す。

半導体光物性の大きな特徴の一つは、光吸収・放出に伴う励起子の生成・再結合である。これに関連する線形・非線形光学応答の話題として、低次元励起子 Fano 共鳴の光吸収 (図 2) 及び四光波混合 (図 3) を取り上げる。Fano 共鳴は原子分子系では古くから知られ広範な研究蓄積のある話題であるが、半導体ナノ構造ではまだ新しいトピックである。実験的な検証もごく最近なされたところである。また、レーザーの非線形光学効果による Autler-Townes 分裂や Rabi 振動もやはり原子分子系では長い研究歴があるが、半導体ナノ構造では特有の大きな位相緩和に起因する観測の困難があるためまだ新しいテーマである。図 3 は、通常取り上げられている励起子束縛状態ではなく、Fano 共鳴状態の周波数分解縮退四光波混合 (SRFWM) スペクトルの半導体 Bloch 方程式による計算結果である。原子分子系との大きな相違は、凝縮系特有の多体効果である。これによって、原子分子モデルとは際立って異なる特徴を示す。

非線形光学応答の一環として、レーザーによる量子状態のコヒーレント制御は最近のホットトピックの一つである。通常、実験室レベルでは物質そのものを新たに作成することによって多様な量子状態の発現を実現している。このような "passive control" に対して、物質系を不変に保ちながら様々なレーザーパラメータによって量子状態をコヒーレントに制御することは "active control" と呼ばれている。図 4 に、2 色の遠赤外 cw レーザーにより駆動された WSL の擬エネルギーを示す。レーザー強度などのレーザーパラメータと WSL の Bloch 周波数の整合性により、系のエネルギーがバンド構造の形成や崩壊を示す様子が分かる。これはレーザー駆動によりキャリアが局在したり非局在することを表しており、電気伝導がレーザーにより調整できる可能性を示している。

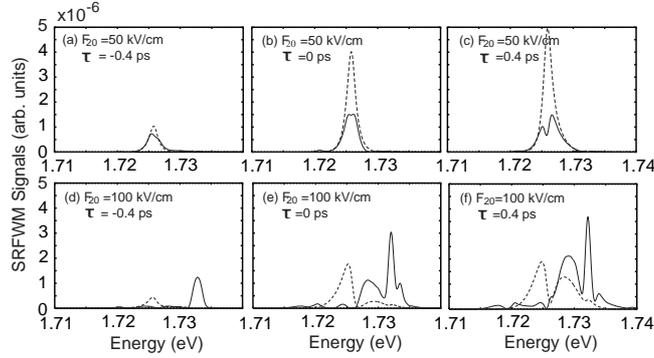


図 3: ポンプ光-プローブ光間の入射時間差 τ 、レーザーピークエネルギー 1.7273 eV による SRFWM スペクトル。ここで、ポンプ光電場の最大値を F_{20} 、プローブ光電場の最大値を 1 kV/cm とする。また、パルスレーザーのバンド幅を $1/0.5 \text{ ps}^{-1}$ 、エネルギー緩和時間、位相緩和時間を共に 1 ps とする。実線は多体効果を考慮したスペクトル、破線は比較のためこれを無視したスペクトルである。

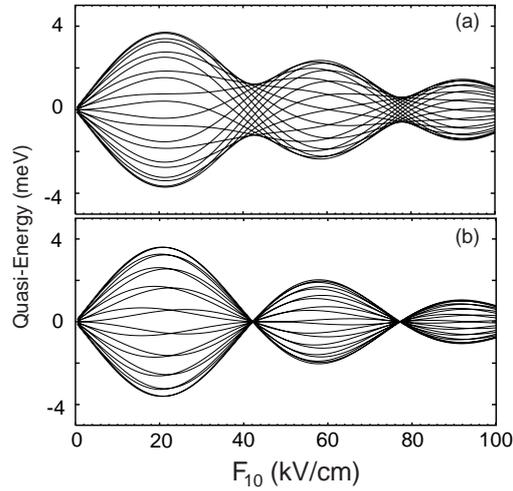


図 4: 周波数が Bloch 周波数と等しいレーザー (電場 F_{10}) と周波数がこれの 2 倍 (電場 $F_{10}/2$) から成る 2 色遠赤外 cw レーザーにより駆動された WSL の擬エネルギー。(a) 簡単化のため、励起子効果は無視した文献 [K. Yashima, K. Hino, and N. Toshima, Phys. Rev. B (in press)] 中の式 (45) に基づいた計算結果。(b) 比較のため、式 (45) の第一項のみ考慮した計算結果。