

解説

半導体量子井戸構造における光非線形効果 ——原理と性能指数の比較——

安藤 弘 明

NTT基礎研究所 〒180 武蔵野市緑町 3-9-11

(1989年10月4日受理)

Optical Nonlinear Effect in Semiconductor Quantum Well Structure: Physical Processes and Comparison of Figure of Merit

Hiroaki ANDO

NTT Basic Research Laboratories, 3-9-11, Midori-cho, Musashino 180

1. はじめに

光非線形効果とは、物質に光を照射すると、その物質の吸収係数や屈折率など、光学特性が光の強度に応じて変化する現象であり、これを利用することにより、光による光の制御が可能となり、入出力に光のみを使う全光型の論理素子を実現できる¹⁾。

Ⅲ-V族やⅡ-VI族の半導体の多くは、その吸収端が可視から近赤外域に位置しており、しかも吸収端近傍で吸収係数が急峻に変化する直接遷移型であるため、吸収端で大きな光非線形効果を得ることができ、光非線形材料として期待されている。一方、最近のMBEやMOCVDを始めとする結晶成長技術のめざましい進歩により、これらの半導体材料を用いて、量子井戸構造などのヘテロ構造のみならず、nipi形のドーピング構造や、それらを組み合わせた構造を製作することも可能となり、これらヘテロ・ドーピング構造の導入によって人為的に非線形性を増強しようという試みがなされている。

本解説では、構造の異なる各種の半導体材料における非線形効果について、その素過程を議論するとともに、それら非線形性の性能指数の比較を試みる。光非線形効果には、光キャリアの実励起によるものと、仮想励起によるものがあるが、後者については既に優れた解説²⁾があるので、ここでは実励起光キャリアに起因する効果に絞って議論を進める。なお、全光型の効果という観点

から、純粋に光キャリアだけの効果についてのみ解説し、外部の電気回路からの電力の供給や電気信号のフィードバックを要する効果については割愛した。

2. 各種構造における光非線形効果

2.1 バルク (Band filling and plasma screening of Coulomb interaction)

量子井戸構造の導入による光非線形性の増強を論じる前に、そのもととなるバルク（ここでは、“バルク”を、とくに構造をもっていないという意味で使用）における非線形過程について述べておこう。

図1はバルクにおけるエネルギー・バンド構造を示す。光を照射すると、光励起により伝導帯には電子、価電子帯には正孔が生成される。これらの光キャリアは、時間の経過とともに、発光および非発光再結合過程により消滅してしまうが、光の照射が強い場合、この再結合に打ち勝って、高い密度の光キャリアが励起される。このような場合、光キャリアの一部が光遷移に関与する電子状態を占有してしまうため、パウリの排他律により遷移が“block”される。したがって、吸収端近傍では、吸収係数が低下し、屈折率が変化する。これをバンド充填効果 (band filling effect) と呼ぶ^{3,4)}。バンド充填効果は、エネルギー禁止帯幅の狭い ($E_g \leq 1 \text{ eV}$) 長波長帯の材料では、主要な非線形過程である。

エネルギー禁止帯幅 E_g の広い ($E_g \geq 1 \text{ eV}$) 材料では、このほかに電子・正孔間のクーロン相互作用を考慮する

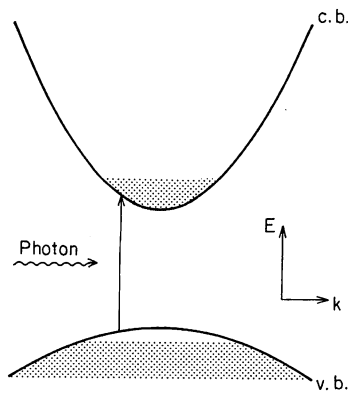


図1 バンド充填効果

必要がある⁵⁾。クーロン相互作用を無視した場合、理論的には、吸収係数 α のスペクトルは、 $\alpha \propto (h\omega - E_g)^{1/2}$ と表される。しかし、GaAsバルクについての実験結果は、図2(a)に示されるように、吸収端近傍で急峻に変化しており、ステップ形に近い。この理由の第一は、光励起された“自由電子”と“自由正孔”との間にクーロン相互作用が働いているためであり、unbound-stateが形成されることに対応して、吸収端よりも高エネルギー側において、近似的に Sommerfeld factor と呼ばれる係数

$$S = \{z \exp(z)\} / \sin(z) \quad (1a)$$

$$z = \pi \{E_{ex} / (h\omega - E_g)\}^{1/2} \quad (1b)$$

だけ遷移の振動子強度が増強される^{6,7)}。ここで、 E_{ex} は、励起子の束縛エネルギーである。

また、電子・正孔がクーロン相互作用によって束縛し合った励起子状態 (bound-state) は、バルクでは束縛エネルギーが小さく、きわめて不安定であるが、その励起子吸収の痕跡が吸収端近傍の低エネルギー側に存在していることも、光吸収スペクトルが急峻に変化する原因の一つである。

さて、このような材料に光を照射し、電子・正孔対を高密度に励起した場合、これらの電子・正孔の“プラズマ”は電子・正孔間のクーロン相互作用を遮蔽する。これは、plasma screening of the Coulomb interaction (以後、単にプラズマ遮蔽と表記する) と呼ばれており、bound-state のみならず、unbound-state に対しても遷移の振動子強度を低下させるため、光吸収係数の低下や屈折率の変化など非線形効果を生じる。

GaAs バルクにおける光非線形効果については、アリゾナ大学のグループによって、詳細な理論的、実験的検討がなされている。図2(a)に、非線形吸収の測定結

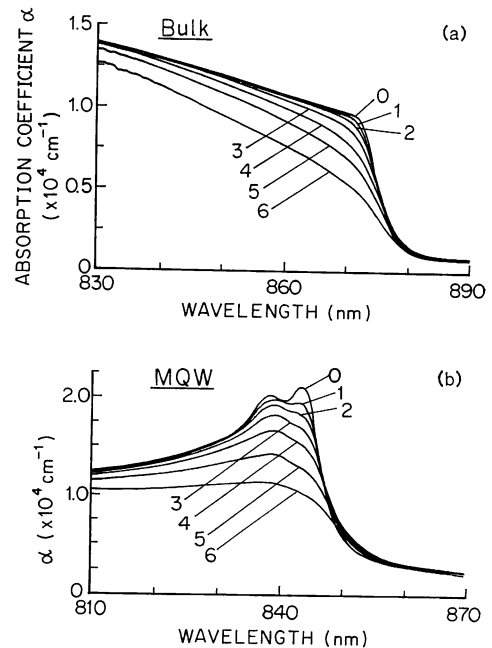


図2 (a) GaAs バルクにおける非線形光吸収⁸⁾
 1: $N=0 \text{ cm}^{-3}$ (線形吸収), 2: $N=5.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 3: $N=9.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 4: $N=1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 5: $N=2.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 6: $N=4.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 (b) GaAs/AlGaAs MQW における非線形光吸収⁹⁾ ($L_z=76 \text{ \AA}$)
 1: $N=0 \text{ cm}^{-3}$ (線形吸収), 2: $N=1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 3: $N=2.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 4: $N=3.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 5: $N=5.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 6: $N=9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

果⁹⁾を示す。彼らは、クーロン相互作用を考慮した光吸収係数の理論式である Elliot formula⁹⁾を、プラズマ遮蔽のみならず、バンド充填効果や bandgap renormalization (光キャリアを高密度に励起した場合、多体効果により、実効的にエネルギー禁止帯が縮小する現象)を含むように一般化することにより、非線形吸収の実験結果をよく説明する理論を提案した⁵⁾。非線形吸収に関する理論と実験の詳細な比較から、GaAs のバンド端における光非線形効果については、励起子 (bound state) 効果と bandgap renormalization の効果が互いに打ち消し合うため、バンド充填効果とプラズマ遮蔽による Sommerfeld factor の低減が主要な非線形過程であり、両者の非線形性への寄与は、ほぼ1対1の大きさであることを明らかにした^{8,10)}。

なお、これら非線形効果の応答時間は、バルクにおける光キャリアの寿命時間で決まり、通常は室温で数十ナノ秒程度であるが、表面再結合効果を利用することに

より、応答時間を数十ピコ秒程度に短縮することも可能である^{11,12)}。

2.2 量子井戸構造における光非線形効果 (Phase space filling)

たとえば、GaAs の薄膜を、よりエネルギー禁止帯幅が大きい AlGaAs で挟んだ構造では、GaAs 層の厚さが 100 Å 程度になると、GaAs のバルクとは異なった光学的性質を示すようになる¹³⁾。これは、GaAs の“井戸”中の電子および正孔が、膜面に垂直な方向にはエネルギー障壁により閉じ込められ、膜面に並行な面内では 2 次元的な自由粒子として振舞うためである。このような構造を量子井戸構造 (quantum well) と呼ぶ。量子井戸構造では、バルクでは放物線形であった状態密度の分布が階段形となる。さらに、電子・正孔がクーロン相互作用により互いに束縛した状態、すなわち励起子についても、電子・正孔の相対運動が 2 次元化するため、束縛エネルギーがバルクでの値と比較して大きくなり (井戸層をきわめて薄くした 2 次元化の極限では 4 倍の増強¹⁴⁾)、励起子状態はより安定に存在する。これらの理由で、図 2 (b) に示されるように、量子井戸構造では、価電子帯・伝導帯間の遷移に対応する光吸収のスペクトルが階段形になり、またこれに加えて、室温においても吸収端近傍で急峻な励起子吸収のピークが観測される¹⁵⁾。量子井戸構造における吸収端近傍の非線形効果は、主として励起子効果である。2 次元励起子の生成に対応する光遷移の振動子強度はきわめて大きいいため、量子井戸構造ではバルクと比較して大きな非線形性を得ることができる^{8,16,17)}。

量子井戸構造における 2 次元励起子の光非線形過程を簡単に説明する。光励起により電子・正孔が生成された場合、それらが互いに束縛し合い励起子を構成している場合はもちろんのこと、自由キャリアであるとしても、それらは励起子を構成する電子・正孔の状態の一部を占めることになる。このため、パウリの排他律に基づき、励起子の生成に対応する遷移の確率が低下し、光吸収係数が減少する。このことは、励起子が伝導帯の電子と価電子帯の正孔がクーロン力により結びついた状態であるということから容易に理解できるであろう。このような、一種の“blocking”に基づいた非線形過程は phase space filling と呼ばれている¹⁸⁾。

Phase space filling に基づく非線形性の理論値は、光キャリアの励起による単位体積当りの励起子強度 f の変化から容易に計算できる。振動子強度の変化 δf は次式で与えられる。

$$\frac{\delta f(N)}{f} = - \sum_k [F_e(k, N) + F_h(k, N)] \frac{U(k)}{U(r=0)} \quad (2)$$

ここで、 F_e , F_h はそれぞれ k -空間での電子・正孔の分布関数であり、 $U(k)$, $U(r)$ は k -空間、 r -空間での励起子の envelope function である。また、 N は光キャリアの密度である。Phase space filling という呼び名は、このように“phase space”において各状態の“filling”を考えるとということに由来する。

なお、GaAs/AlGaAs の量子井戸構造における非線形過程については、これ以外にも、bandgap renormalization による吸収端のレッドシフト (長波側へのシフト) や、“plasma screening of Coulomb interaction”による励起子吸収ピークのブルーシフト (短波側へのシフト) があるが^{9,17)}、両者は互いに打ち合うため、phase space filling が主要な非線形過程となる。

室温では、光キャリア (励起子の構成している電子・正孔対ではなく、自由キャリア) による phase space filling が支配的であるため、非線形性の応答時間は量子井戸における光キャリアの寿命時間が決まり、数十ナノ秒程度であるが、バルクと同様、表面再結合を利用することにより、数十ピコ秒の応答時間を実現することも可能である。この場合、量子井戸構造では、層に平行な方向のみ、光キャリアの移動 (拡散) が可能であるため、素子をメサ構造とし、端面での表面再結合を利用する必要がある。

2.3 nipi-MQW 構造における光非線形効果 (Electric field effect of excitonic absorption)

多重量子井戸構造 (multiple quantum well: 量子井戸を多層重ねたもので以下 MQW と記す) と、nipi 構造 (pn 接合を積み重ねたもの) を組み合わせることにより、量子井戸における励起子吸収の電界依存性を介して、大きな光非線形性を得ることができる¹⁹⁻²¹⁾。

この構造は nipi-MQW と呼ばれており、 i 層を MQW とする nipi 形である。nipi-MQW 構造における光非線形過程を説明しよう。図 3 は、エネルギーバンドの空間分布である。熱平衡状態では (a) に示されるように、 n 層および p 層中の不純物の一部がイオン化しており、空間電荷が形成されるため、 i -MQW 層に対して、層に垂直な方向に強い内部電界が印加される。この内部電界の印加により、量子井戸内に形成されるサブバンド間のエネルギー差が変化するため、MQW における励起子吸収のピークは、無電界の場合と比較して長波長側へシフトする。このような MQW における励起子吸収

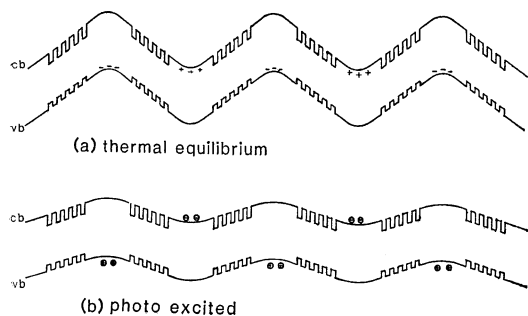


図3 GaAs/AlGaAs nipi-MQW 構造におけるエネルギーバンド分布

の電界効果は quantum confined Stark effect (QCSE) と呼ばれている²²⁾。

さて、この状態で光を照射すると、たとえば MQW 層の量子井戸内で光励起された電子・正孔はきわめて短時間のうちに井戸外へ放出された後、内部電界により、それぞれ n 層および p 層へ分離され、おのおの層に蓄積される。これら蓄積された光キャリアはイオン化した不純物を電氣的に中性化するため、(b)に示されるように、i-MQW 層中の電界強度は低下する。したがって、MQW における励起子吸収のピークは、光を照射しない場合、すなわち熱平衡状態を基準として、短波長側へシフト (ブルーシフト) する。

なお、光励起された電子と正孔は、それぞれ空間的に分離されているため、これらの寿命時間が、バルクや通常の MQW 構造における値と比較して、著しく長くなる。したがって、nipi-MQW 構造には、応答 (キャリ

ア寿命時間で決まる) は遅いが、微弱光の照射でも内部に高密度の光キャリアが蓄積されるため、大きな光吸収係数の変化を得ることができるという特徴がある。

図4は GaAs/AlGaAs nipi-MQW 構造における光吸収の測定例²¹⁾であり、ポンプ・プローブ法で測定した光吸収係数のスペクトルを示している。パワー密度 100 mW/cm^2 程度の弱いポンプ光の照射に対しても、重い正孔 (E_{xhh}) および軽い正孔 (E_{xlh}) が関与する励起子の吸収ピークが、それぞれ大きくブルーシフトしていることがわかる。また、吸収ピークのシフトとともに、吸収係数の値も増大しているが、これも QCSE の特徴であり、印加電界の低下に伴って、量子井戸中で電子・正孔の波動関数が空間的にオーバラップするようになり、遷移の振動子強度が増大するためである^{23,24)}。

前にも述べたように nipi-MQW 構造では、光励起され多電子・正孔が空間的に分離されるため、応答時間は長く、実測値は数十から数百ミリ秒程度である²¹⁾。p 形層と n 形層を電氣的に接続するオーミック接触を設けて、電子・正孔の再結合を促進させることにより、応答速度を改善しようという試みがなされている²⁵⁾。これにより、マイクロ秒のみならずナノ秒領域の高速応答も期待できる。

2.4 QWEST (Saturation of intersubband transition)

以上の非線形効果は、いずれも光過程としては価電子帯・伝導帯間のバンド間遷移を利用している。量子井戸構造では、これ以外に、同一エネルギーバンド内で量子閉込め効果により形成される複数のサブ・バンドの間の

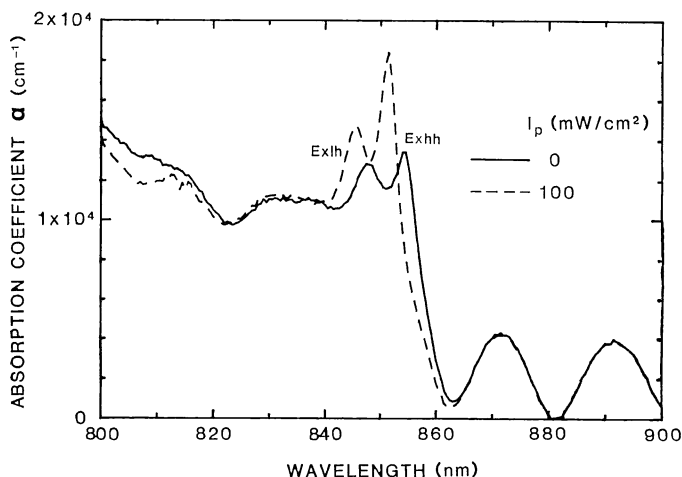


図4 GaAs/AlGaAs nipi-MQW 構造における吸収端近傍の非線形光吸収

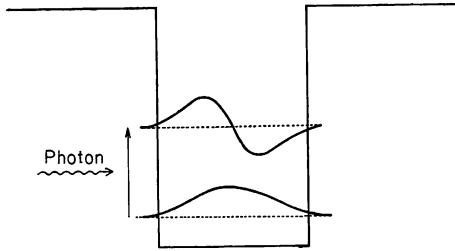


図 5 MQW におけるサブバンド間遷移 QWEST (quantum well envelope state transition)

光遷移を利用することにより、5~10 μm の赤外域において大きな光非線形効果を得ることができる²⁶⁾。

量子井戸内の電子の波動関数は、格子定数の周期で変化するブロッホ関数と、より変化がゆるやかなエンベロープ関数 (envelope wave function) の積で表される。図 5 に示されるように、サブ・バンド間の遷移は、ブロッホ関数を保存したまま、エンベロープ関数が変化しており、quantum well envelope state transition (QWEST) と呼ばれている。なお、QWEST を利用する場合、熱平衡状態 (光を照射していない場合) でも、よりエネルギーが低いほうのサブ・バンドに電子が存在してはならないが、この電子は、たとえば変調ドーピング (バリア層の一部にのみドナーをドーピングする) により供給される。

光の電界が量子井戸層に垂直な場合、*n* 番目のサブ・バンドから *m* 番目への遷移の振動子強度 *f* は次式で与えられる²⁶⁾。

$$f = \frac{m_e}{m^*} \cdot \frac{64}{\pi^2} \cdot \frac{m^2 n^2}{(m^2 - n^2)} \quad (3)$$

ここで、*m_e* および *m^{*}* は、それぞれ電子静止質量、および電子有効質量である。たとえば、GaAs/AlGaAs の量子井戸において、伝導帯の第 1 サブ・バンドから第 2 への遷移を考えると、振動子強度 *f* は 12 程度である。QWEST 効果を利用することにより、前述した光励起キャリアによる遷移の “blocking” という過程を通して、サブ・バンド間のエネルギー差に対応する波長 5~10 μm 程度の長波長帯で、大きな非線形効果を得ることができる。また、サブ・バンド間の緩和時間は 10 ピコ秒程度ときわめて速いため²⁷⁾、高速応答が期待できるというのも QWEST 効果の特徴である。

3. 実遷移型非線形効果の性能指数

光非線形効果の大きさを表すために、非線形感受率 $\chi^{(3)}$ 、あるいは非線形屈折率 *n₂*、非線形吸収係数 α_2 が

用いられることがある。しかし、実遷移型非線形効果の場合、非線形の根元は光励起によって生じた光キャリアであり、光吸収の存在を前提としているため、性能指数には光吸収の効果を含める必要がある。光吸収は、たとえば、非線形材料を一对のミラーではさんだ非線形ファブリ・ペロー共振器の場合、一定のフィネスを得るための非線形領域の厚さを決めるし、また、非線形導波路では導波路長を制限するため、これらの非線形素子のスイッチングパワーに影響を与える¹⁾。

また、実遷移型非線形効果の場合、応答時間を決めるのはキャリアの寿命時間 τ であるが、これは、キャリアの空間的分離により長くできるし、逆に、表面再結合効果を利用することにより短くもできる。キャリア寿命時間の短縮は、応答を高速化するが、一方では、非線形定数を減少させる。

これら光吸収 α 、寿命時間 τ を含めた性能指数として、吸収型に対しては、

$$\sigma_{eh} = \Delta\alpha/N \ (\propto \alpha_2/\alpha\tau) \quad (4)$$

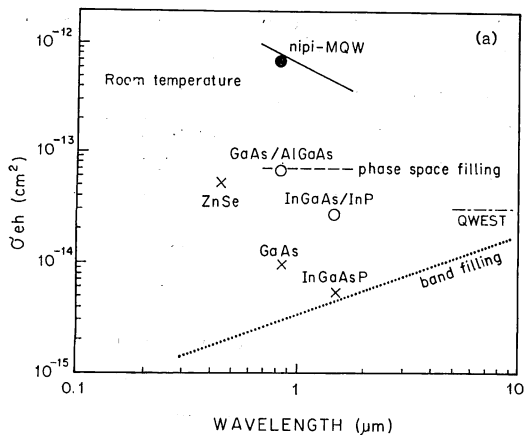
分散型 (屈折率の非線形) に対しては、

$$n_{eh} = \Delta n/N \ (\propto cn_2/\alpha\tau) \quad (5)$$

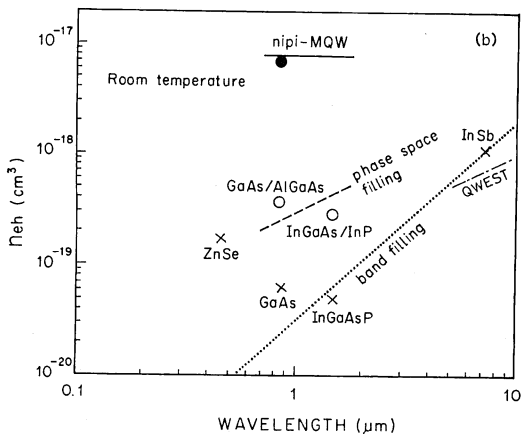
などが使用されている^{7,16,17,28)}。ここで $\Delta\alpha$ 、 Δn は、それぞれ密度 *N* の光キャリアの励起により生じる吸収係数および屈折率の変化である。すなわち、 σ_{eh} 、 n_{eh} は、それぞれ単位体積当り 1 対の電子・正孔が励起された場合に生じる吸収係数および屈折率の変化である。非線形材料を各種の非線形素子に使用した場合、これらの性能指数はスイッチングエネルギー密度 (スイッチングエネルギーを素子の受光面積で割ったもの) を決める。

現在までに報告されている各種の半導体材料に対する性能指数 σ_{eh} 、 n_{eh} の実験値を、理論値と比較して、それぞれ図 6 にまとめる。図の横軸は、吸収係数や屈折率の変化が最大となる波長、すなわちバンド間遷移を利用した効果については吸収端に対応する波長、QWEST 効果についてはサブ・バンド間の遷移に対応する波長である。

図中、点線はバンド充填効果に対する理論値であり、計算は Miller の方法に従った⁴⁾。バルク材料 ($\lambda_g > 1 \mu\text{m}$) に対する実験結果 (図中×印) は、禁止帯幅の狭い場合、バンド充填効果で説明できることがわかる。禁止帯幅が大きくなるに従って、実験値と理論値の差が大きくなるが、これはプラズマ遮蔽効果が相対的に大きくなるためである。GaAs では、この両者からの寄与はほぼ 1 対 1 であるが、より短波側の ZnSe (II-VI 族の半導体)²⁸⁾ では、電子・正孔間のクーロン相互作用が強く



(a)



(b)

図6 (a) 分散型非線形性の性能指数 n_{eh} , (b) 吸収型非線形性の性能指数 σ_{eh} 計算値, 実線: nipi-MQW, 破線: MQW (phase space filling), 点線: バルク (band filling), 一点鎖線: MQW (QWEST). 実験値, ●: nipi-MQW {GaAs/AlGaAs²¹⁾}, ○: MQW {GaAs/AlGaAs¹⁶⁾, InGaAs/InP²⁹⁾}, ×: Bulk {ZnSe²⁸⁾, GaAs¹⁰⁾, InGaAs⁷⁾, InSb (77 K での値⁴⁾を 300 K に換算したもの}

なるため、プラズマ遮蔽効果が支配的な非線形過程となる。

破線は、phase space filling に対する理論値であるが、GaAs/AlGaAs 系¹⁶⁾や、InGaAs/InP 系²⁹⁾の MQW 構造における実験値 (図中○) をよく説明している。これらの MQW 構造では、急峻なスペクトルを有する励起子吸収の飽和が主要な光非線形過程であり、非線形性の性能指数は、バルクと比較して、吸収型・分散型とも 1 桁程度増強されている。

実線および黒丸 (●) は、それぞれ GaAs/AlGaAs nipi-MQW 構造に対する性能指数の理論値、実験値²¹⁾を示している。nipi-MQW 構造では、通常の MQW と比較して、さらに 1 桁程度大きな非線形効果が得られることがわかる。通常の MQW がパウリの排他律に基づいた遷移の “blocking” を利用しているのに対して、nipi-MQW は、これとは異なり、量子井戸における励起子吸収の電界依存性が大きいことに着目し、この電界を最もうまく利用できるような構成した構造であるといえる。

図中、一点鎖線は GaAs/AlGaAs MQW における QWEST 効果に対する計算値である。2 準位系の計算モデルを仮定し、室温でのホモニアスな吸収線幅を 10 meV とした。

さて、対象とする波長が異なる材料間の性能指数の比較について述べておこう。たとえば、バルクにおけるバンド充填効果の場合、エネルギー禁止帯幅が小さくなり、対象とする光の波長 λ が長波長側へ延びるほど、性能指数 σ_{eh} , n_{eh} は大きくなる傾向がある。しかし、これは、必ずしも、長波長帯ではスイッチング・エネルギーが低減できるということの意味しない。すなわち、光をレンズ等で絞込んだ場合のスポット径は λ に比例して広がるし、また屈折率の変化を利用する非線形フェブリ・ペローでは、スイッチングに必要な光路長変化は λ に比例して長くなる³⁰⁾。これらの波長に依存する要素は、デバイス構造によって異なるため、厳密に性能指数に含めることは困難であるが、一つの目安として光の回折限界を仮定し、分散型については n_{eh}/λ^2 , また吸収型に対しては σ_{eh}/λ などを用いることはできよう。InSb⁴⁾ などエネルギー禁止帯幅が狭いバルク材料におけるバンド充填効果や、QWEST 効果など、長波長の非線形効果は、これら波長のファクターのふんだけ割り引いて比較する必要があり、より短波側の効果と比較して必ずしも優れているとはいえない。

4. む す び

構造の異なる各種の半導体材料における光非線形効果について、物理的過程を議論し、非線形性の性能指数を比較した。量子井戸構造では、2 次元励起子の吸収飽和に基づいた非線形効果により、バルクを 1 桁上回る性能指数が得られている。また、多重量子井戸 (MQW) と nipi 構造を組み合わせた nipi-MQW 構造では、MQW における励起子吸収の電界依存性を利用して、通常の量子井戸構造をさらに 1 桁凌駕する性能指数を得ることが

できる. nipi-MQW では, 遅い応答速度が問題であったが, オーミック接触の導入により改善できる見通しがあり, 高速応答も期待できる.

半導体材料としては GaAs/AlGaAs 以外に, 光伝送への応用を目的として $1.5 \mu\text{m}$ 帯で使用可能な InGaAs/InP²⁹⁾, InGaAs/AlInAs³¹⁾などが検討されている. ZnSe²⁸⁾など II-VI 族半導体は, 電子・正孔間のクーロン相互作用が強く, バルクでも GaAs/AlGaAs の MQW 程度の性能指数をもつため, 可視域での非線形材料として期待できる.

以上述べたように, バルクや量子井戸構造における光非線形過程は, 現在までにほぼ解明されたといえる. 今後は, 量子細線や量子箱など, より低次元の構造における非線形効果が研究の中心になるであろう. 細線についてはすでに製作が試みられ³²⁾, フォトルミネッセンスや吸収係数の偏光依存性など特異な光学特性も報告されている^{33,34)}. 量子箱に関しては, 励起子の閉込め効果によって, 光遷移の振動子強度が大きく増強されるということが理論的に予測されており^{35,36)}, 製作への期待が大きい.

最後に, 紙面の制約のため, 本文中で割愛せざるをえなかった項目のいくつかを簡単に紹介しておきたい.

全光型ではないが, 外部の電気回路から電圧の供給, 電気信号のフィードバックを要する非線形素子として, QCSE を利用した self electrooptic device (SEED) がよく知られている. SEED に関する動作原理および最近の進展については, それぞれ, 文献 37, 38) にまとめられているので参照されたい. 最近, QCSE を利用した新しい構造の素子が提案された³⁹⁾. 外部電界の印加を必要とするが, nipi-MQW 構造と同様に光キャリアが直接印加電界をスクリーニングするため, 外部電気回路からの電気信号のフィードバックを要せず, 集積化に適している. 光の共振器 (光の帰還) なしで, 光吸収の“ジャンプ”を観測しており, 高速・低閾値のスイッチングが期待できる.

日頃, ご指導いただく NTT 基礎研究所材料物性研究部の木村達也部長, 神戸宏主幹研究員に感謝いたします. 本稿をまとめるにあたり有益なご討論をいただいた Arutro Chavez-Pirson 研究員に深謝いたします.

文 献

- 1) H. M. Gibbs: *Optical Bistability: Controlling Light with Light* (Academic Press, Orlando, 1985).
- 2) 榎本泰章: 応用物理, **57** (1988) 881-886.
- 3) R. K. Jain and M. B. Klein: "Degenerate fourwave mixing in semiconductors," *Optical Phase Conjugation*, ed. R. A. Fisher (Academic Press, Orlando, 1983) pp. 332-345.

- 4) D. A. B. Miller, C. T. Seaton, M. E. Prise and S. D. Smith: *Phys. Rev. Lett.*, **47** (1981) 197-200.
- 5) L. Banyai and S. W. Koch: *Z. Phys. B*, **63** (1986) 283-291.
- 6) F. Bassani and G. P. Parravicini: *Electronic States and Optical Transitions in Solids* (Pergamon Press, Oxford, 1975) p. 191.
- 7) M. N. Islam, E. P. Ippen, E. G. Burkhardt and T. J. Bridges: *J. Appl. Phys.*, **59** (1986) 2619-2628.
- 8) A. Chavez-Pirson, H. M. Gibbs and S. Koch: *Proceedings of Symposium on Nonlinear Optics of Organics and Semiconductors*, Tokyo (1988), *Proceedings in Physics*, Vol. 36 (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989) pp. 44-51.
- 9) R. Elliot: *Phys. Rev.*, **108** (1957) 1384-1389.
- 10) Y. H. Lee, A. Chavez-Pirson, S. W. Koch, H. M. Gibbs, S. H. Park, J. Morhange, A. Jeffery, N. Peyghambarian, L. Banyai, A. C. Gossard and W. Wiegmann: *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986) 2446-2449.
- 11) Y. H. Lee, H. M. Gibbs, J. L. Jewell, J. F. Duffy, T. Venkatesan, A. C. Gossard, W. Wiegmann and J. H. English: *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 486-488.
- 12) J. L. Jewell, S. L. McCall, A. Scherer, H. H. Houch, N. A. Whitaker, A. C. Gossard and J. H. English: *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 22-24.
- 13) 半導体超格子の物理と応用, 日本物理学会編 (培風館, 1984) pp. 1-20; 岡本 紘: 超格子構造の光物性と応用 (コロナ社, 東京, 1988), pp. 17-21.
- 14) M. Shinada and S. Sugano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (1966) 1936-1946.
- 15) T. Ishibashi, S. Tarucha, H. Okamoto: *Int. Symp. GaAs and Related Compounds*, Oiso (1981), *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **63** (1982) pp. 587-588.
- 16) D. S. Chemla, D. A. B. Miller, P. W. Smith, A. C. Gossard and W. Wiegmann: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20** (1984) 265-275.
- 17) S. H. Park, J. F. Morhange, A. D. Jeffery, R. A. Morgan, A. Chavez-Pirson, H. M. Gibbs, S. W. Koch, N. Peyghambarian, M. Derstine, A. C. Gossard, J. H. English and W. Wiegmann: *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 1201-1203.
- 18) S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla and D. A. B. Miller: *Phys. Rev. B*, **32** (1985) 6601-6609.
- 19) A. Kost, E. Garmire, A. Danner and P. D. Dapkus: *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 637-639.
- 20) 安藤弘明, 岩村英俊, 大橋弘美, 神戸 宏: 第 35 回応用物理学会予稿, 29 p-ZB-6 (1988).
- 21) H. Ando, H. Iwamura, H. Oohashi and H. Kanbe: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25** (1989) 2135-2141.
- 22) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus: *Phys. Rev. B*, **32** (1985) 1043-1060.
- 23) Y. Kan, H. Nagai, M. Yamanishi and I. Suemune: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 2167-2280.
- 24) T. Hiroshima: *J. Appl. Phys.*, **62** (1987) 3360-3365.
- 25) H. Ando, H. Oohashi, H. Iwamura, H. Kanbe: *Electron. Lett.*, **25** (1988) 1212-1213.
- 26) L. C. West and S. J. Eglash: *Appl. Phys. Lett.*, **12** (1985) 1156-1158.
- 27) A. Seilmeier, H. J. Hubner, G. Abstreiter, G. Weismann and W. Schlapp: *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987)

- 1345-1348.
- 28) N. Peyghambarian, S. H. Park, S. W. Koch, A. Teffery, J.E. Potts and H. Cheng: Appl. Phys. Lett., **52** (1988) 182-184.
- 29) K. Tai, J. Hegarty, W. T. Tsang: Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 86-88.
- 30) E. Garmire: Opt. Eng., **24** (1985) 575-578.
- 31) H. Kawaguchi and Y. Kawamura: Electron. Lett., **23** (1987) 1014-1015.
- 32) T. Fukui and H. Saito: Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 824-826.
- 33) M. Tanaka and H. Sakaki: Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 1326-1328.
- 34) M. Tsuchiya, J.M. Gaines, R.H. Yan, R.J. Simes, P.O. Holtz, L.A. Coldren and P.M. Petroff: Phys. Rev. Lett., **62** (1989) 466-468.
- 35) E. Hanamura: Phys. Rev. B, **37** (1988) 1273-1279.
- 36) T. Takagahara: Phys. Rev. B, **36** (1987) 9293-9296.
- 37) D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, T.H. Wood, C.A. Burrus, A.C. Gossard and W. Wiegmann: IEEE J. Quantum Electron., **QE-21** (1985) 1462-1476.
- 38) 笠原健一: 光学, **18** (1989) 330-336.
- 39) 船橋陽一, 小畑勝弘, 坂田康隆, 管 康夫, 山西正道, 山岡慶文, 末宗幾夫: 第35回応用物理学会, 2P-PB-7 (1989)