

半導体量子構造における波動関数工学の 新しい流れ

梶川 靖友

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科 690松江市西川津町1060

A New Trend in Wave-Function Engineering of Semiconductor Quantum Structures

Yasutomo KAJIKAWA

Department of Electric and Control Systems Engineering,

Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,

Shimane University,

1060 Nishi-Kawatsu, Matsue, Shimane 690, Japan

(Received September 19, 1997)

ABSTRACT

Recent studies on semiconductor quantum structures, such as quantum films and quantum wires, are reviewed, focusing on optical polarization anisotropy. The optical properties of quantum structures can be tuned by controlling wave functions of electrons and holes confined in the quantum structures. Especially, the polarization property is directly related to the base function of the wave function of the hole state. In order to tune the polarization property, base-function engineering is proposed as a new field of wave-function engineering, in which the shape of the base function is modified through the quantum confinement, strain, and electric field.

1. はじめに

江崎玲於奈はトンネルダイオード（エサキダイオード）の研究によって1973年のノーベル物理学賞を受賞した。しかし、実は、その後の研究の広がりや実用上の重要性を考えると、1969年に彼が提案した半導体超格子の概念のほうがより画期的であったと言える。事実、半導体超格子やそれをもっと単純化した半導体量子井戸や単一ヘテロ接合を組み込んだ半導体デバイスは、すでに今日の我々の生活になくてはならないものとなっている。たとえば、衛星放送の送受信器や携帯電話用のトランジスタ、光ファイバ通信用の光源およびその中継器中の光増幅器、CDプレーヤーや種々の光情報処理機器、等々。研究開発においても半導体超格子・量子井戸の研究は、一つのパラダイムを形成し、今日もなお研究が盛んになされている。そのパラダイムの中でもいくつかの小パラダイムが登場した。最近のものでは、量子閉じ込めシュタルク効果の発見、ひずみ超格子・量子井戸におけるバンドエンジニアリングなどが代表的なものである。これらは、ヘテロ接合による量子閉じ込めに加えて、電界や

弾性的ひずみにより、電子や正孔の波動関数をコントロールしようとするもので、波動関数工学と呼ばれる¹⁾。この総説では、半導体量子構造における波動関数工学の現状²⁾の一端を紹介し、今後の進むべき方向の一つを示す。

2. 量子構造の波動関数と偏光特性

一般に、一様な結晶中の電子の波動関数は、ブロッホ関数の形に書き表される。これは、平面波と周期関数（ブロッホ基底関数）の積である。結晶中にヘテロ接合などによって一様でないポテンシャルが持ち込まれると、この波動関数は、有効質量近似のもとでは、包絡関数とブロッホ基底関数の積の形で書き表される。GaAsのような立方晶系の半導体結晶では、伝導帯はほぼs軌道からできているので、伝導帯のブロッホ基底関数は球対称である。他方、価電子帯はほぼp軌道からできているので、その基底関数の角度部分は断面が8の字に近い形をしている。図1(a)および(b)に、(001)結晶面の半導体量子薄膜（1次元量子井戸）における価電子状態のうち、重い正孔と呼ばれるものと軽い正孔と呼ばれるものについて、その基底関数の角度部分を図示する。軽い正孔の基底関数の断面が完全に8の字でないのは、スピン-軌道相互作用という相対論的効果のために、8の字が首振り運動をするためである。（いくつかの論文や教科書では、量子薄膜における重い正孔、軽い正孔の基底関数として図2のような図が示されている³⁾。しかし、これはd軌道に近く、正しくない。）

ここでは半導体量子構造の光物性、特に偏光異方性に注目する。一様なバルク結晶半導体では、その光学特性は偏光方向に依存せず等方的である。これはバルク半導体が立方晶の対称性を持っていることからの当然の帰結である。しかし、半導体を量子薄膜構造や量子細線構造にすると、対称性が崩れるので、偏光方向によって光学特性が変わって来る。このような偏光異方性が、半導体を量子構造にしたときの大きな特徴の一つである。

伝導帯と価電子帯の間での双極子遷移による発光や吸収は、伝導帯と価電子帯の波動関数同志の重なり積分で決まる双極子能率によるが、特にその偏光角度依存性は、基底関数同志

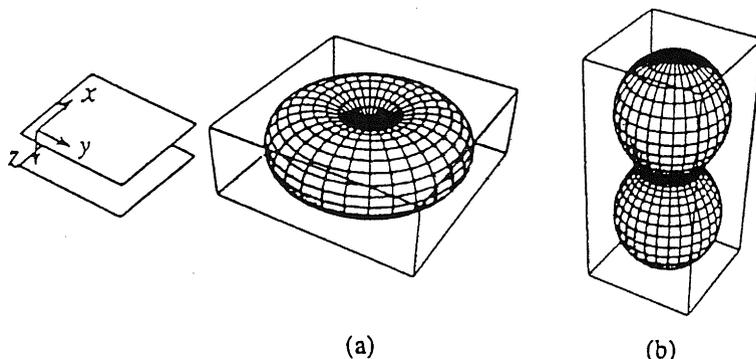


図1 (001)量子井戸における価電子帯基底関数の角度部分の立体表示。(a)重い正孔、(b)軽い正孔。

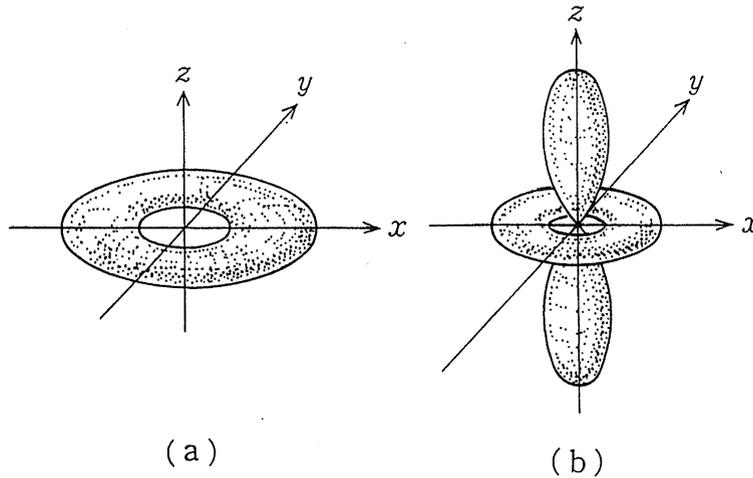


図2 従来の教科書に描かれた、量子井戸における価電子帯基底関数の角度部分の立体表示。(a)重い正孔, (b)軽い正孔.

の積で決まる。伝導帯電子の基底関数が球対称なので、発光や吸収の偏光角度依存性は専ら価電子帯の基底関数の異方性による。言い換えると、図1の基底関数の形は、とりもなおさず(001)量子薄膜における双極子遷移（重い正孔の励起子遷移および軽い正孔の励起子遷移）の偏光角度依存性を表している。

正孔の全波動関数は、図1の基底関数と包絡関数とを掛け合わせたものである。図3(a)に、(001)量子薄膜における量子井戸ポテンシャル、包絡関数、基底関数を示す。これに電界を印加すると、量子井戸ポテンシャルの形は図3(b)のように変わり、それに伴って包絡関数の形も変わる。この現象を原子におけるシュタルク効果からの類似性から量子閉じ込めシュタルク効果という。このように、電界などによって、包絡関数の形を変えるのが従来の波動関数工学であった。しかし、この例のように、従来の波動関数工学で制御していたのは、実は波動関数のうち包絡関数の部分だけであり、基底関数の形は変わらなかった。

そこで、ここでは新しいタイプの波動関数工学として、基底関数を制御しようとする波動関数工学を紹介する。これはいわば基底関数工学とも呼ぶべきものである⁴⁾。基底関数工学では、量子閉じ込めやひずみ、電界により対称性を崩すことが重要なポイントとなる。基底関数工学の考え方を図4に示す。

量子閉じ込め効果や弾性ひずみの効果は、その閉じ込め方向やひずみの主軸が[001]結晶方位に平行である場合には、その基底関数への影響はよく知られていた。(001)結晶面に平行な量子薄膜の場合、価電子帯の第1準位 v_1 は重い正孔状態で、その基底関数は、すでに図1(a)に示したような、穴の詰まったドーナツのような形である。基板結晶より格子定数の大きな結晶をエピタキシャル成長させ、エピタキシャル膜に内部圧縮応力がかかるようにした場合も、エピタキシャル結晶中の価電子帯第1準位の基底関数はやはり同様に図1(a)

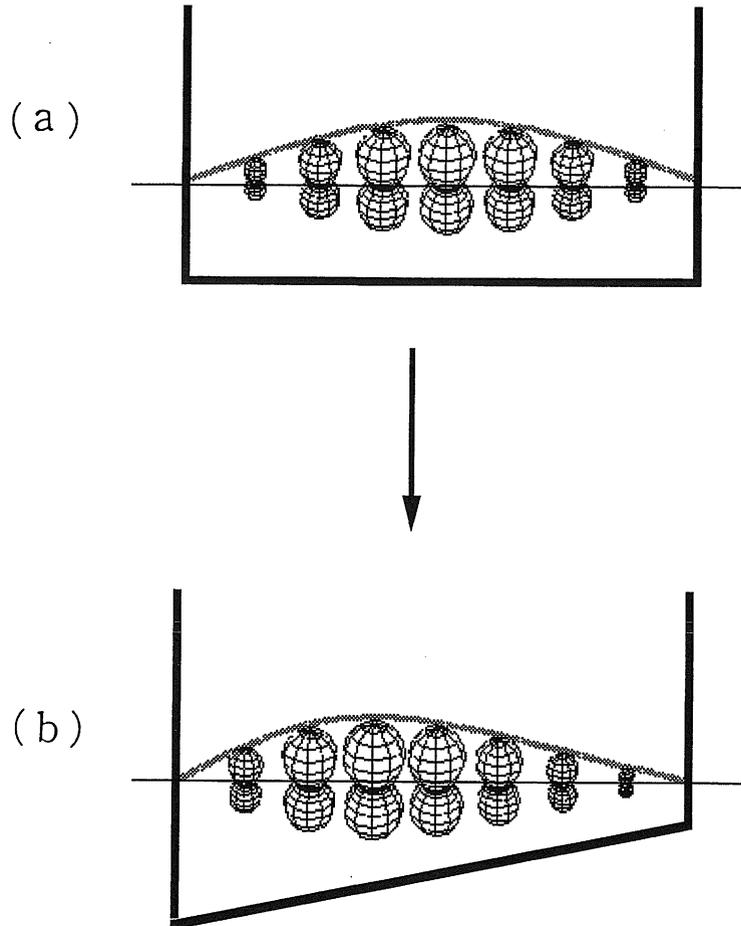


図3 従来の波動関数工学（量子閉じ込めシュタルク効果）における量子井戸ポテンシャル中の包絡関数と基底関数.

の形になる．一方，基板結晶より格子定数の小さな結晶をエピタキシャル成長させ，エピタキシャル膜に引っ張り応力がかかるようにした場合には，エピタキシャル結晶中の価電子帯第1準位の基底関数は図1(b)のように雪だるまのような形になる．[001]方向に延びる理想的な正方形断面の量子細線の場合も同様である．これらの場合はみな二軸等方的な場合であり，基底関数の形も，したがって光学的な特性も軸対称である．

これに対し，量子細線の断面形状が正方形でなく長方形になると，軸対称性はなくなる．量子薄膜や格子不整合エピタキシャル膜が(001)面でなく，低い対称性の結晶面上に成長された場合にも，二軸等方性は破られ，光学的特性も膜面内の偏光に対してさえ異方的となる．この様な場合，価電子帯準位の基底関数は，一般に上記の二種類の基底関数の混じった

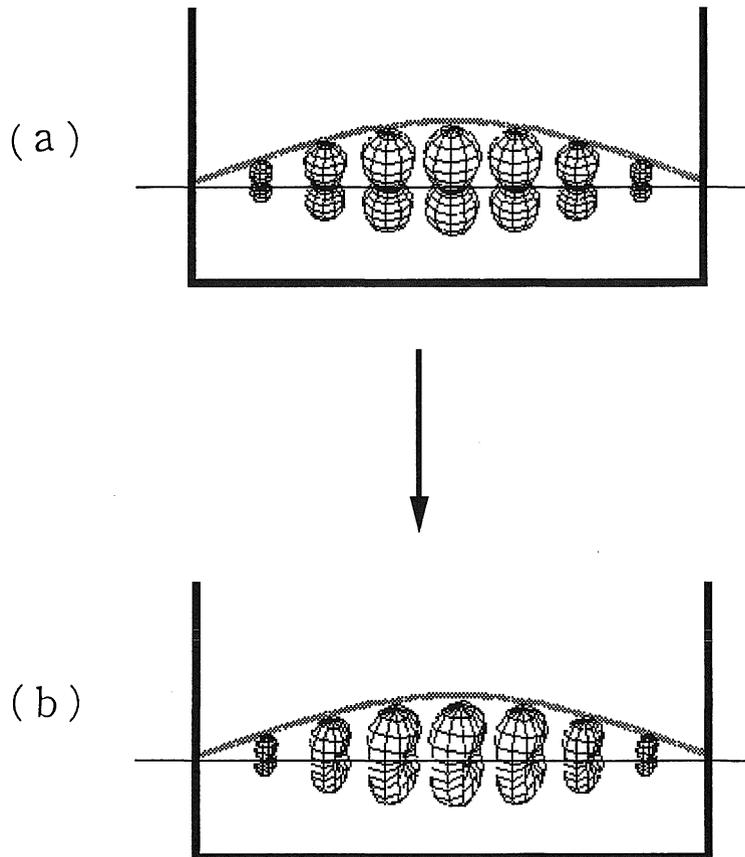


図4 基底関数に変化する新しいタイプの波動関数工学.

ものになる.

3. (11 \bar{l})結晶面量子薄膜の偏光異方性

偏光特性が軸対称でない例として、(11 \bar{l})結晶面上に成長した量子薄膜について述べる。我々はかつて(110)基板上に量子薄膜を成長し、薄膜面内の直交する二つの偏光ベクトル $[\bar{1}\bar{1}0]$ と $[001]$ を持つ直線偏光を用いて、光電流法により量子薄膜の吸収スペクトルを調べた⁵⁾。図5に、 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 偏光と $[001]$ 偏光とに対し得られた光電流スペクトルを示す。二つのスペクトルの間に顕著な差異があり、面内光学異方性を示している。第1準位に対応する低エネルギー側のピーク（重い正孔の励起子ピーク）では $[\bar{1}\bar{1}0]$ 偏光のほうがピークが高いのに対し、高エネルギー側のピーク（軽い正孔の励起子ピーク）では逆に $[001]$ 偏光に対してピークが高い。

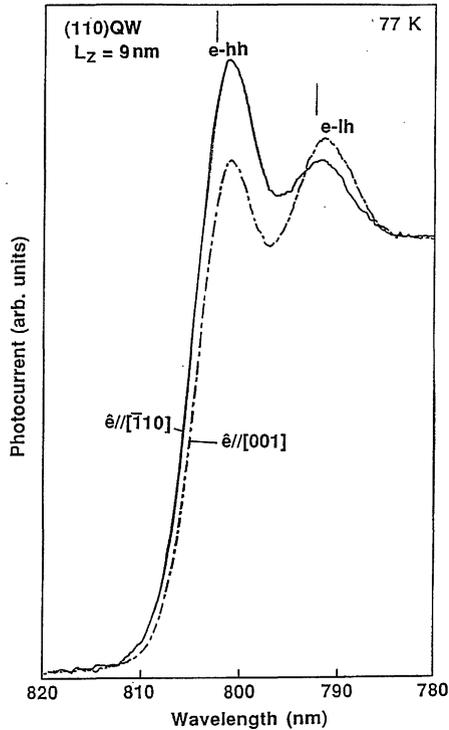


図5 (110)量子薄膜の光電流スペクトル。実線は $[110]$ 偏光，一点鎖線は $[001]$ 偏光に対するスペクトル。

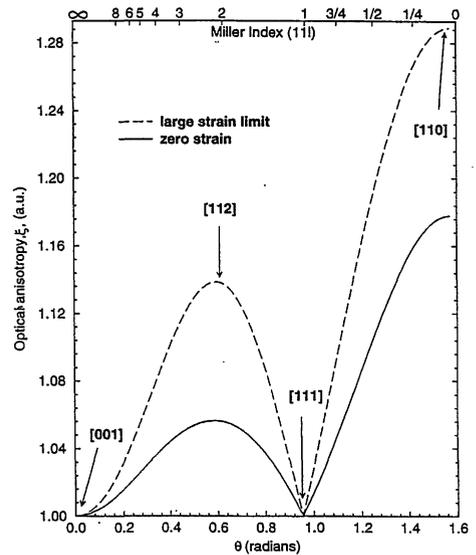


図6 無ひずみ（実線）および内部圧縮ひずみ（破線）の (111) 量子井戸における重い正孔励起子ピークの偏光異方性の結晶面方位依存性。

このような面内光学異方性に関する実験的研究は、 (110) 量子薄膜の他にも (112) や (113) 量子薄膜についてなされた⁵⁾。また、理論的には、一般的な $(11l)$ 量子薄膜について、偏光異方性が量子薄膜面方位の関数として計算された^{6,7)}。さらに、格子定数が基板結晶よりも大きい圧縮ひずみ量子薄膜における偏光異方性についても計算された。図6に、 $(11l)$ 量子井戸における重い正孔の励起子ピークの面内偏光異方性の面方位依存性を、ひずみがない量子薄膜とひずみの大きい極限での圧縮ひずみ量子薄膜で比較して示す⁷⁾。ひずみの大きい極限の方が、ひずみのない場合に比べ、面内偏光異方性が大きい。内部圧縮ひずみにより面内偏光異方性が增大する現象は、実験的にも観測された⁸⁾。

実用的見地から見ると、このような面内光学異方性は、面発光レーザへの応用という点で重要である。面発光レーザでは発振する偏光方向が一定せず、発振している途中でも出力を変えると、偏光方向も変化してしまうという問題点があった。これは、面発光レーザが従来 (001) 量子薄膜を用いて作製されていたためである。最近 (113) 量子薄膜を用いれば、このような発振偏光面の不安定性はなくなり、偏光面は常に一定方向で固定されることが示された⁹⁾。

4. 準位反交差による偏光異方性の劇的变化

図6では、格子定数が基板結晶よりも大きい内部圧縮ひずみ量子薄膜についての計算結果を示し、ひずみがない場合に比べ異方性がやや増大されることを述べたが、逆に、格子定数が基板結晶よりも小さい内部引っ張りひずみ量子薄膜の場合には事情はもっと複雑になる。この内部引っ張りの時の事情は、本質的に、量子薄膜に外部から圧力をかけた外部圧縮の場合と同様であるので、以下この場合について説明する¹⁰⁾。図7は、(110)量子薄膜に外部から量子薄膜に垂直な力をかけていった時の価電子帯における第1および第2準位のエネルギー変化の様子を示したものである。歪みがないときには、価電子帯の第1準位 $v1$ は重い正孔の性質を持っており、したがって基底関数の形も図1(a)のドーナツ形に近い形をしている。一方、第2準位 $v2$ は軽い正孔の性質を持っており、基底関数は図1(b)のような形をしている。力を加えていくと、この第1準位と第2準位は互いに近付いていき、反交差現象を示す。反交差のあとは、第1準位 $v1$ は軽い正孔の性質を持つようになる。したがって、ひずみの大きいときには、第1準位の基底関数は雪だるまの形である。では、これらの途中で反交差現象を起こしているときの $v1$ の基底関数の形はどのようなになるであろう

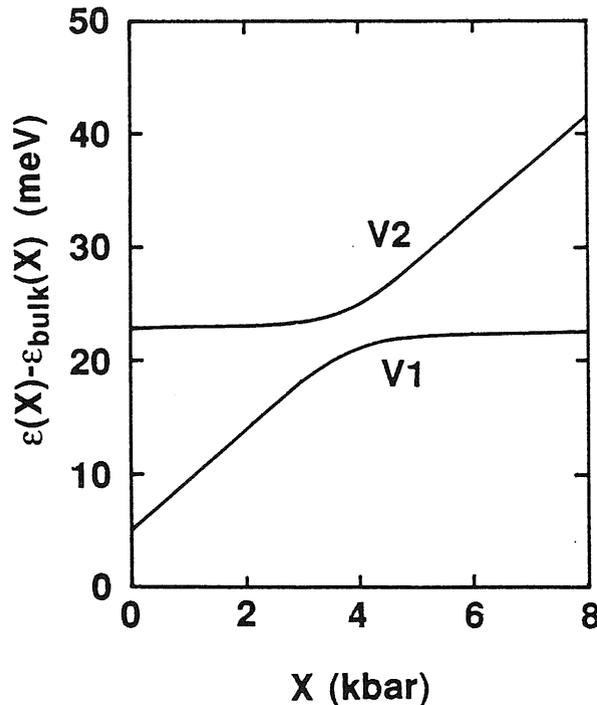


図7 (110)量子薄膜に垂直方向の外部応力をかけていった時の二つの価電子帯エネルギー準位 ($v1$ と $v2$) の変化。

うか. その変化の様子を示したのが図8である. 力を加えていくと, ドーナツ型は亜鈴状に変化し, さらに枕を立てた様な形になったのち雪だるまの形にたどり着く. 光学異方性(偏光に対する角度依存性)もこれとまったく同じ形であらわされる. 特に, 量子薄膜面内の偏光に対する吸収の強度は, この3次元立体の水平断面で表される. すなわち, ひずみがない場合には, この断面は楕円形であり, この楕円形の長軸と短軸の差が, 先に述べた光電流スペクトルにおける $[\bar{1}10]$ 偏光と $[001]$ 偏光とに対するピーク強度の差に対応する. 外力を加えてひずみを増加させると, この楕円はさらにひしゃげてきて, 4.5 kbar でついに $[\bar{1}10]$ 方向を向いた8の字の形になる. すなわち, $[\bar{1}10]$ 偏光は吸収するが, それに垂直な $[001]$ 偏光は吸収しないという完全な直線偏光性を示すことになる. さらにひずみが大きく

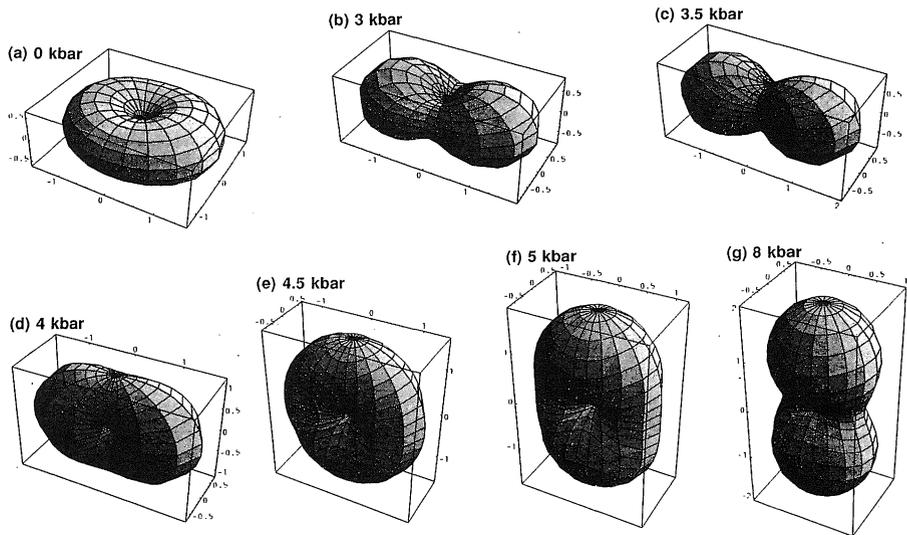


図8 (110)量子薄膜に垂直方向の外部応力をかけていった時の v_1 準位の基底関数の変化.

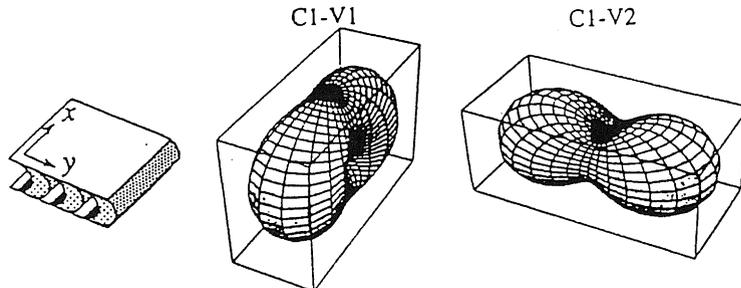


図9 実際的な形状の量子細線における基底関数.

なると、再び[001]偏光も吸収するようになる。このような偏光特性の劇的変化は、反交差の付近で第1準位と第2準位が近付き、図1に示したようなお互いの基底関数が混じり合うことの結果によるものである。ここでは、外部から力を加えることにより、この混じり具合を変化させたが、同じようなことは、格子定数の異なる基板上に成長した量子薄膜に発生する内部ひずみを調節したり、さらにこれに電界を加えることによっても実現できる¹¹⁾。このようにして、半導体量子薄膜によって液晶のような偏光スイッチを実現することが可能である。このスイッチング速度は液晶よりはるかに速い。

また、量子薄膜でなく、量子細線においても同様なことがおきる。図9は、実際的な形状の量子細線の偏光特性の立体表示である¹²⁾。量子細線の偏光特性は、上述のひずみをかけた量子薄膜のものと酷似していることがわかるであろう。これもまた基底関数の混合によるものである。

5. 結 言

以上、量子閉じ込めやひずみ、電界などにより、基底関数の形状を変え、偏光特性を劇的に変えられることを理論的に示した。これを応用すれば、高速偏光スイッチが実現できる。これからは、これを実験的に実証していくことが課題である。このためには、(110)結晶面のような、これまであまり用いられなかった結晶面の上に高品質のひずみ量子薄膜を形成する技術や、所望の断面形状の量子細線を形成する技術が必要である。これらの技術を確立し、波動関数工学の新しい分野として基底関数制御の分野を発展させていきたい。

参 考 文 献

- 1) 榊裕之編著「超格子ヘテロ構造デバイス」まえがき(工業調査会, 1988)
- 2) 梶川靖友「微精細構造プロセス・デバイス調査研究報告書II」p. 123(日本電子工業振興協会, 1997)
- 3) たとえば、池上徹彦監修「半導体フォトニクス工学」p. 338(コロナ社, 1995)
- 4) Y. Kajikawa, 1997 RCIQE International Seminar on "Fabrication and Characterization of Quantum Nanostructure and Devices" (第8回 北海道大学量子界面エレクトロニクス研究センター研究セミナー) 予稿集, p. 18 (1997年2月)
- 5) Y. Kajikawa, M. Hata, T. Isu and Y. Katayama, Surf. Sci. **267** (1992) 501.
- 6) Y. Kajikawa, O. Brandt, K. Kanamoto and N. Tsukada, J. Cryst. Growth **150** (1995) 431.
- 7) R. H. Henderson and E. Towe, J. Appl. Phys. **78** (1995) 2447.
- 8) 浅井裕充, 鎌田英彦, 1996年秋季応用物理学会予稿集, 9a-ZC-8 (1996).
- 9) Y. Kaneko, S. Nakagawa, T. Takeuchi, D. E. Mars, N. Yamada and N. Mikoshiba, Electron. Lett. **31** (1995) 805.
- 10) Y. Kajikawa, Phys. Rev. B **47** (1993) 3649.
- 11) Y. Kajikawa, Phys. Rev. B **49** (1994) 8136.
- 12) J. C. Yi and N. Dagli, IEEE J. Quantum Electron. QE-31 (1995) 208.