

解説

輻射場と物質系の相互量子制御

五 神 真

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1995年6月20日受理)

Mutual Quantum Manipulation of Radiation Field and Matter

Makoto KUWATA-GONOKAMI

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに一レーザーの向こうに 何があるか？

プランクの黒体輻射論にはじまる光の量子論は量子力学の構築に大きな役割を果たした。その後、レーザーの発明を機に光科学は飛躍的に発展した。しかし、それに引き続く光物理学の進展は光の量子性とそれほど深くかかわってはいなかったように思われる。これは、レーザー光が自然放出光や熱的光源に比べてむしろ理想的な古典光としての性質をもっていたからであろう。例えば非線形光学として研究されている現象の多くは光を古典的に扱う半古典論で説明できる。通常の実験条件のもとでは、光の強度が十分に強く、また対象とされる物質系が光の波長のサイズ領域では連続体とみなせるために光の量子的な性質は全面には現れなかったのである。

しかし、この事情は近年大きく変わってきた。1985年に光のスクイーズド状態が観測され、非古典的な光の状態をマクロな現象として捉えることができることが示された¹⁾。また、定電流駆動された半導体レーザー^{2,3)}や発光ダイオード⁴⁾の出力揺らぎが古典論で期待される限界以下となることも見出された。さて、通常理想的レーザーが発する光はほぼコヒーレント状態となることが知られている。このコヒーレント状態の光子数分布はポアソン分布に従い、量子揺らぎ(標準量子限界)を伴う。光強度が強いときには古典的な波に漸近し、十分安定であるが、微弱な領域では揺らぎが目立ってくる。この揺らぎは超高速高密度の情報処理や極微弱領域で極限計測の場面には深刻な問題となる。例えば、生きた生物

の神経パルスの光計測や、惑星探査衛星における観測データのやりとりでは、単位情報あたりに使える光子数はかなり厳しい制約がある。

平均光子数を $\langle n \rangle$ とすると、ポアソン分布は次式で表せる。

$$P(n) = \frac{e^{-\langle n \rangle} \langle n \rangle^n}{n!} \quad (1)$$

例えば、 $\langle n \rangle$ が20個の場合に光子数がゼロとなる確率を計算すると $P(0) \approx 2 \times 10^{-9}$ となる。この値は強度変調による通信で許容されるビットエラー率のほぼ上限である⁵⁾。すなわち、ポアソン光を用いての情報を誤りなく伝達するためには、最低20個の光子が必要となる。上に述べたように半導体発光素子を用いて標準量子限界以下の光を発生する実験がすでにいくつか成功している。しかし、実用上重要な高速のビット列に対して十分なノイズの抑制を行うことは容易ではない。光通信分野における現在の技術水準はすでにこの標準量子限界にほぼ到達している。したがって、通常のレーザー光を用いる技術はすでに飽和しており、このレーザーを超える技術を確認することが、今まさに課題となっているのである⁵⁻⁸⁾。

輻射場を量子論的に制御し、完全な光子数状態にある光を広い帯域幅にわたって発生させることができればレーザー光の限界を遙かにこえる光源となる(図1)。この光源と1光子でスイッチする極限的な非線形光素子によって光子を一つ一つ操ることは光科学・技術の究極的な目標であるといえる。このように光の潜在力を完全に引き出すためには、(1)輻射場を量子論的に制御し、(2)

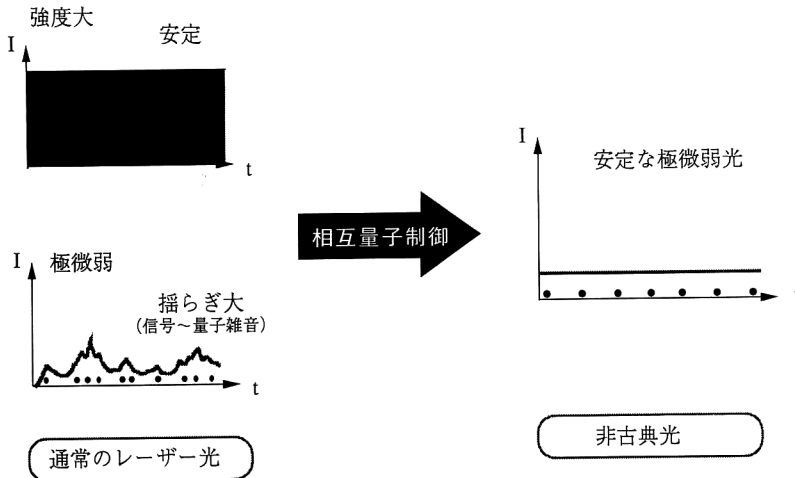


図1 通常のレーザーと非古典的光源の揺らぎ

物質の量子状態を制御し、(3)両者を強く結合させることが必要であると考えられる。これが“相互量子制御”のアイデアである。本稿ではまず輻射場の制御について述べ、次いで、物質系の量子制御についてふれ、相互量子制御の現状と今後の展開について概観する。

2. 輻射場の制御—光を閉じ込める

2.1 微小光共振器⁸⁻¹⁴⁾

さて、一つの輻射場のモードが占める体積は、光の波長を λ 、媒質の屈折率を n とするとおよそ $(\lambda/2n)^3$ の程度となる。光共振器の大きさがこの程度になると共振器中の原子と相互作用する輻射場のモードの数は高々一つとなる。もし共振器のロスがなければ、この微小共振器を用いて、原子の自然放出を完全に抑制したり、増強することも可能である。実際には光の振動数領域では完全導体は存在しないので、完全な光閉じ込め構造を作ることはいできない。共振器のロスが共振器の Q 値 (quality factor) を用いて表される。

$$Q = \frac{2\pi\tau_{\text{cav}}}{\tau} \quad (2)$$

ここで、 τ_{cav} は共振器中に蓄えられたエネルギーが $1/e$ になるまでの時間で τ は光の周期である。2枚の平行平板ミラーによるファブリー・ペロー共振器で Q 値を5000にするには反射率99.8%が必要となる。半導体の微細加工によって作られた光共振器の Q 値は加工の精度によって制限され、実際には100~5000程度になっている。これに対し、物質の表面張力によって自然に作ることができる微小球共振器では 10^9 にも及ぶ Q 値が報

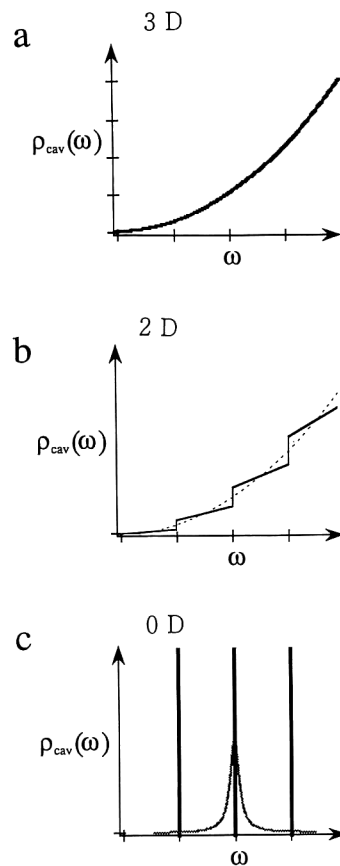


図2 光閉じ込め構造の次元性と輻射場の状態密度の周波数依存性 (a) 3次元 (バルク), (b) 2次元 (1次元方向のみ閉じ込めた場合), (c) 0次元 (3次元的に閉じ込めた場合)。

告されている²⁶⁾。これは微小共振器に光がマイクロ秒以上も閉じ込められていることになる(光の走行距離にすると数百mにも及ぶ)。

光閉じ込めの次元によって共振器内の輻射場の状態密度の様子は異なる。図2はバルクの場合(a), 2次元の場合(b), 0次元の場合(c)を示している。微小共振器における輻射場のモードの空間的な関数形に対応して, 場所によって非常に強い電界が生じたり, 電界が消失したりする。これは, 真空場の揺らぎについても当てはまるので, 自然放出レートの増強・抑制, 発光スペクトルの変化, 放射パターンの変化, 放出光の統計の変化などが起こる。これらの微小光共振器効果は高効率の発光ダイオードやレーザーダイオードに利用できる⁸⁻¹³⁾。特に, 3次元的に光閉じ込めを行い, 発光帯域を図の点線のように設定すると, 全自然放射中で共振器モードに結合する割合(自然放射結合係数; β_c)が1の共振器となる。このような条件でレーザー発振動作を行うといわゆる無閾値レーザー¹⁴⁾となる。

2.2 光閉じ込めの実例

可視光領域の微小光共振器として広く用いられているものは誘電体の多層膜によるブラッグ反射ミラーを2枚向かい合わせたファブリー・ペロー型共振器(DBR共振器¹⁵⁾という(図3a)^{8,9,16)}。特に半導体の場合には, MBE法などの制御性の良い結晶成長技術をそのまま用いて作製することができるので実用の観点からも最も有望な共振器構造である。

平行平板型の微小共振器は有機発光素子にも応用されている¹⁷⁻²¹⁾。筒井らは, Euキレート分子を用いた有機EL素子にDBRミラーを組み込み, 指向性のよい発光が得られることを示した¹⁹⁾。キレート分子中の希土類原子からの発光はf電子の遷移であるために分子中であっても原子に近い鋭い発光線を示す。このことにより共振器効果が非常に明瞭に観測されている。これに対し有機分子のπ電子の遷移を用いる場合には発光波長帯域幅が非常に広がる。この場合に, 微小共振器によって発光波長を選択できることが示されている。この原理を用いて, RGB3色の素子を作ることも考案されている^{20,21)}。このように有機材料系でも半導体系と同様に微小共振器によって自然放射の性質を制御できることが示され, その応用研究が活発に進められている。

第2の光閉じ込め構造として, 微小球や微小円盤のwhispering gallery mode(WGモード)の利用が注目されている。これは, 誘電媒質と外部との境界における内部での全反射を利用するものである²²⁾。図3b, cにそ

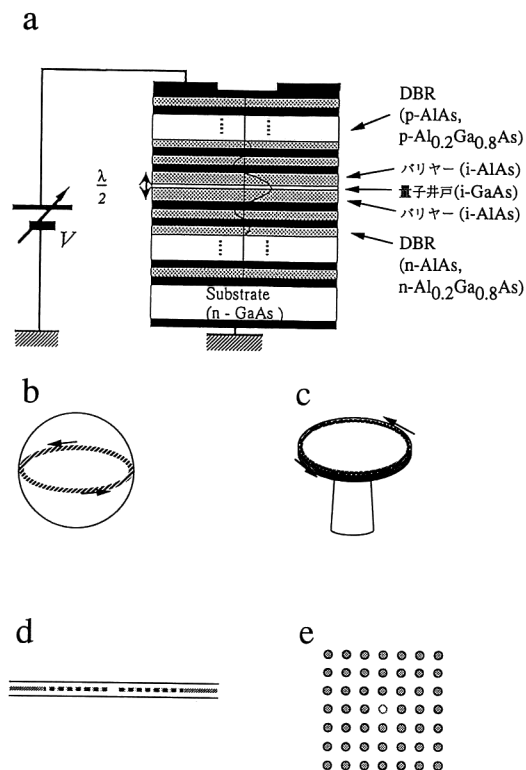


図3 様々な光閉じ込め構造

(a) 半導体DBR共振器(量子閉じ込め電界効果を用いて量子井戸の励起子の共振周波数を可変できる例, 山西正道らによる^{8,16)}), (b) 微小球共振器, (c) 微小円盤型共振器, (d) ファイバークレーティング, (e) 2次元フォトニックバンド。

の概念図を示した。ミー理論によると球形共振器のWGモードのQ値は直径20 μm の透明球の場合 10^{20} 以上にもなる。微小球共振器のもう一つの利点は, その形の自然さである。液滴はその典型例である。微小な穴から液体を滴下すると液体は表面張力により非常に真球度の高い球となる。実際, 色素溶液の液滴を用いてWGモードによるレーザー発振や誘導散乱, 共振器量子電力学²³⁾の検証などの研究が精力的に進められている。筆者らは, ポリマー微小球に色素をドープした試料を用いて, 光励起によるレーザー発振を観測した²⁴⁾。図4は直径約20 μm の色素をドープしたポリスチレン球のレーザー発振スペクトルである。この直径ではレーザー発振が可能なWGモードの共鳴線(Q値が 10^4 以上のモード)は色素の発光帯域に400本以上も存在する。したがって, 実際の発振スペクトルはモード間の微妙な競合により複雑である(図4a)。WGモードは動径方向の関数形によってグループ分けすることができる。ゲイン媒

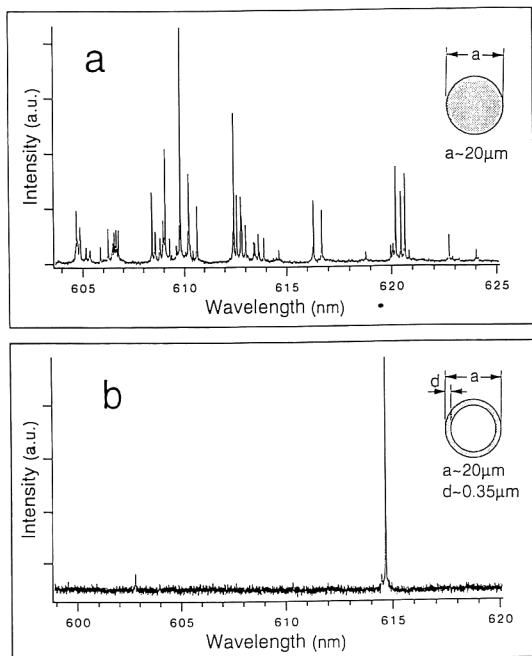


図4 色素ドープポリマー微小球レーザーの発振スペクトル
(a) 直径 20 μm 一様ドープ球, (b) シェル状ドープ球.

質を表面層のみにドープすると動径分布のモードが最低次の系列のみを選択することができる²⁵⁾。このようにしてレーザー発振スペクトルを非常に単純化し、ほぼ単一モードの発振が観測されている (図4 b)。このシェル状ドープ微小球レーザーの入出力特性から、 $\beta_c=0.05$ と評価されている。この結果は、もしゲイン幅が十分狭い発光体を一つの Q 値の高い WG モードに結合できれば非常に高い β 値を実現できることを示唆している。微小球共振器の実際の Q 値は用いられる材料の吸収によって制限されている。例えば 100 dB/km の損失は $Q_{\text{abs}}=10^8$ に対応する。量子光学実験で要請される極限的に高い Q 値を実現するための候補として、シリカガラスを用いた微小球の研究がフランスのエコール・ノルマル等で進められている²⁶⁾。

WGモードのもう一つの例として微小円盤構造も注目されている (図3c)。ベル研究所の MacCall と Slusher らは半導体を薄い円盤状に細工して完全に単一モードで発振するレーザーを作っている^{10,27)}。微小球の場合、一つの WG モードの共鳴に対し、その角運動量の量子数 (モードナンバーと呼ばれる) を n とすると $2n+1$ 重の縮重がある。これは、光が回る軌道面の自由度に起因するものである。円盤構造ではこれが一つ

に制限され、共振器モードを減らすことができるので、直径 2 μm の半導体マイクロディスクレーザーで $\beta_c=0.15$ という極めて高い値が実現されている。このようにマイクロディスク構造は微小共振器レーザー特有の物理現象を探求するのに最適な構造であり、無閾値レーザーの出力光の量子揺らぎの研究などが進められている²⁸⁾。

光を閉じ込める第3の方法としてはフォトニックバンドの利用があげられる (図3 d, e)²⁹⁾。媒質中に光の波長オーダーの周期構造の誘電率分布を導入すると、回折波の干渉により光の伝播が禁止される。これがフォトニックバンドギャップとなる。もしこの周期構造の中に欠陥を作ると、欠陥を含む領域に光を閉じ込めることができる。図3 a の半導体の DBR 共振器は1次元のフォトニックギャップを利用した光閉じ込め構造であるとみなすこともできる。1次元のフォトニックギャップとして注目されているもう一つの例に、ファイバー中の屈折率グレーティングがある。ファイバークレーティングは2本の紫外光レーザーを干渉させ光化学反応を利用して形成される³⁰⁾。最近、屈折率を2%も変調できるようになり³¹⁾、フォトニックバンド構造としての利用が注目されはじめている。

2次元、3次元のフォトニックバンドを用いれば、より強く光を局在させることができる。フォトニックバンド構造を作る方法として、微細加工によるもの以外に自己組織化を用いるものも注目されており、共に今後の進展が期待されている。

また、ランダム媒質での多重散乱によって光を閉じ込めることもできる。最近このような閉じ込めによるレーザー発振が観測され注目されている³²⁾。

2.3 近接場光学顕微鏡

微小な領域の光学として最近注目されているものに、フォトン走査トンネル顕微鏡 (photon STM) または、近接場走査顕微鏡 (nearfield scanning optical microscope, NSOM) がある³³⁾。これは、細く尖らせた光ファイバーに金属をコートし、その先端に 20 nm から 50 nm 程度の穴をあけプローブとし、これを近接場領域で走査して物体の像を得るというものである。通常の顕微鏡の分解能は回折限界で決まるので波長の半分程度であるが、近接場を用いるとこの限界を超えた分解能が得られる。また、この分光は、アクセスする領域が開孔の大きさ程度に限られるために、個別粒子の分光にも適している。この利点を活かして、ポリマー中に分散された単一の色素の蛍光の検出³⁴⁾や、量子井戸の面内のポテンシ

ャル揺らぎによって局在化した励起子からの発光が検出されている³⁵⁾。近接場光学顕微鏡は、原理的にも興味深い問題を多く含んでいる。張らは非局所光学応答理論を応用し、共鳴的相互作用により、近接場顕微鏡の走査像が特異なパターンを示すことを見出している³⁶⁾。

近接場による励起では通常の伝搬光では励起できない縦波の素励起(表面プラズモン, 縦波励起子 etc.) との相互作用も生じることから, 従来になかった新しい線形・非線形の分光法が発展していく可能性がある。

3. 物質系の量子制御

さて, 次に輻射場と相互作用する物質系の“量子的”な姿に目を向けてみよう。通常の意味での物質の量子的な大きさ(おおよっぱにいうと原子や分子のサイズ)は光の波長と比べると桁違いに小さい。近年の物質の極限的な制御技術の進歩により, 物質の量子的なコヒーレンスを光の波長のオーダーを超えるところまでのばせるようになってきた。これにより半導体中の電子の波動的な干渉を利用したデバイスも提案されている。また, 半導体量子井戸や量子細線, 量子ドットといった量子構造により, 光と相互作用する電子系の次元を自由に選べるようになった。従来は物質定数であった光学遷移の振動子強度を人為的に制御できるようになったのである。また, 元来非常に大きな振動子強度をもつ有機分子系に対しては, 分子間相互作用を利用した配列の制御が試みられている。これにより, 巨大な振動子強度をもつ集合体もみつまっている。一方レーザー冷却技術は, 原子の並進運動のドブロイ波長を μm オーダーにまで伸ばすに至っている。さらに, これらを用いた原子波干渉計³⁷⁾も実現されており, 原子の量子的なサイズはどんどん広がってきた。

このように相互量子制御の舞台となる物質系の量子像は様々な局面で急速な展開をみせている。

4. 相互量子制御

さて, これまで述べたように, 輻射場を波長のオーダーで制御し, その領域で量子的に振る舞う物質系を用意することができるようになった。次の問題はこの両者をどのようにして強く結合させるかということである。

輻射場と物質系の結合系は1963年 Jaynes と Cummings によって議論された³⁸⁾。彼らは単一モードの輻射場と一つの2準位原子の結合系について研究し, 自然放出が可逆になることなどを示した。これは Q 値の高い共振器に原子を一つ入れた場合に対応し, 強結合系にお

ける共振器量子電気力学の草分け的研究である。この可逆的な自然放出はリュドベールグ原子を用いてマイクロ波領域で Haroche と Kleppner によって実証された³⁹⁾。

高 Q 共振器と1原子の結合系は原子と共振器中の輻射場の線形相互作用によって, ノーマルモードの分裂⁴⁰⁾を示す。これは真空ラビ分裂と呼ばれている。同様な分裂は半導体量子井戸中の励起子と DBR 共振器の結合系でも観測されている⁴¹⁾。この高 Q 共振器に複数の原子を導入する実験も行われている。平均 N 個の原子が共焦点共振器内に置かれると, 真空ラビ分裂は \sqrt{N} 倍になることが観測された⁴²⁾。このように輻射場との結合の強さは原子数の平方根に比例する。したがって, 輻射場と物質系の結合を強くするには, 共振器中の物質の密度を高くすれば良いように思われる。半導体などの凝縮系ではこの密度が 10^{22} cm^{-3} のオーダーであるので原子系とは比べものにならないほど強い結合が得られる。半導体励起子系の場合には電子とホールが広がっているために振動子強度が3~4桁小さくなるがそれでも励起子系の実験で得られた真空ラビ分裂の大きさは原子系の典型的な実験値に比べ桁違いに大きい。

真空ラビ分裂の起源について半古典的な解釈も与えられていることを注意したい⁴³⁾。原子と共振器の結合系の光学応答スペクトルにみられるモード分裂は共振器中の原子の線形吸収と分散によって説明できるというものである。この半古典論でも, 分裂幅の \sqrt{N} 依存性等の実験結果をうまく説明できる。この議論は半導体励起子系の場合にも全く同様に当てはまる。事実 DBR 共振器中の量子井戸の枚数を増やすとその枚数の平方根に比例して分裂が広がる。吸収や分散といった線形な光学応答では輻射場の量子性はあらわには現れないので, この結果は当然ともいえる。またこの意味で2準位原子系と励起子系の現象が同様に議論できる。しかし, 非線形な光学応答の場合には事情は一変する。2準位原子は1個の光子の吸収で飽和するので, 物質系のモデルとしては極限的な非調和振動子である。また原子系の場合には共振器中で原子数より多くの光子を導入することは容易である。したがって, 少数の光子入力でも結合系は非線形な応答をするのである。一方励起子系の場合には事情は異なる。なぜなら, 凝縮系では共振器中の原子数はアボガドロ数のオーダーである。この数以上の光をつぎ込むことは非現実的である。したがって, J-C モデルで議論されている結合系の非調和な振舞いをすぐに励起子系で期待することはできない。筆者らは DBR 共振器中で励起子系の3次の非線形性光学応答について調べた。その結

果、弱結合の系では励起子と共振器が2重共鳴すると非線形効果が非常に増強されることを見出した⁴⁴⁾。これが強結合の場合にどうなるかという問題に現在取り組んでいる。励起子系について議論されている多彩な非線形光学応答⁴⁵⁾が輻射場と強く結合し、どのような量子状態の光を放射するかという問題は理論実験両面から追求すべき課題である。

5. おわりに

相互量子制御の目標は、「高密度 (大きな自由度) の物質系と輻射場のコヒーレントな結合体を作り、そこに大きな非調和性を発現させることである」とまとめることもできるであろう。

物質系の密度が高くなると、多数の自由度の間の複雑な相互作用により、物質系のコヒーレンスが乱される。したがって、密度を上げかつ緩和を抑えることが決め手となる。原子系は、レーザー冷却や原子ビームを用いることにより、この散乱を極限まで抑えることが可能である。レーザートラップや偏光勾配を利用して原子を周期的に並べる“光格子”⁴⁶⁾の利用により、強く結合した相互量子系が実現できるかもしれない。半導体や分子系の励起子も有力候補である。半導体の量子構造を用いて励起子の振動子強度を大きくすることは、輻射緩和を加速できると同時に格子系との相互作用も抑制できるので好都合である。また、分子系でその配列を制御することは、分子が本来もつ大きな振動子強度を不均一広がりにならざるに妨げられることなく有効に利用できると考えられる。

緩和を抑えた高密度物質と輻射場の結合系がどのような非調和性を示すかが次に問題となる。非調和性は分極間の相関によって生じる。その機構としては、

- (1) 輻射場との結合を介した分極間の相関
- (2) 物質系の多体の量子効果による巨視的なコヒーレンス

がある。こうして量子制御された物質系のコヒーレントな分極場と共振器の輻射場の結合系が作る場を自己無撞着に求め、それがどのような輻射場として取り出されるかを探求することが次のステップである。

平成6年度より、文部省科学研究費重点領域研究「輻射場と物質系の相互量子制御」(代表者東京大学 花村榮一教授)が進められている。この「相互量子制御」は応用物理学会量子エレクトロニクス研究会の研究会での討論などを通じて量子エレクトロニクス、光物性、エレクトロニクスといった異なる分野の研究者達によって数年来培われてきたものである。本稿はその中で、山西正

道教授、清水 明助教授、清水富士夫教授、宮野健次郎教授、張紀久夫教授、花村榮一教授との数多くの議論のもとにまとめたものである。これらの先生方ならびに量子エレクトロニクス研究会などを通じて日頃議論いただいている多くの方々に感謝する。

文 献

- 1) R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke, J. C. Mertz and J. F. Valley: "Observation of squeezed state generated by four-wave mixing in an optical cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 2409-2412.
- 2) S. Machida, Y. Yamamoto and Y. Itaya: "Observation of amplitude squeezing in a constant-current-driven semiconductor laser," *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 1000-1003.
- 3) Y. Yamamoto and S. Machida: "High-impedance suppression of pump fluctuation and amplitude squeezing in semiconductor lasers," *Phys. Rev. A*, **35** (1987) 5114-5130.
- 4) P. R. Tapster, J. G. Rarity and J. S. Satchell: "Generation of sub-poissonian light by high-efficiency light-emitting diodes," *Europhys. Lett.*, **4** (1987) 293-299.
- 5) 山本喜久, 渡部仁貴: 量子光学の基礎 (培風館, 1994).
- 6) 花村榮一: 非線形量子光学 (培風館, 1994).
- 7) 清水 明: "サブポアソン状態—量子場工学入門—", *応用物理*, **62** (1993) 881-888.
- 8) 山西正道: "半導体中の輻射場の量子制御", *応用物理*, **63** (1994) 885-897.
- 9) H. Yokoyama, K. Nishi, T. Anan, Y. Nambu, S. D. Brorson, E. P. Ippen and M. Suzuki: "Controlling spontaneous emission and threshold-less laser oscillation with optical microcavities," *Opt. Quantum Electron.*, **24** (1992) S245-S272.
- 10) Y. Yamamoto and R. E. Slusher: "Optical processes in microcavities," *Phys. Today*, **46** June (1993) 66-73.
- 11) R. E. Slusher and C. Weisbuch: "Optical microcavities in condensed matter system," *Solid State Commun.*, **92** (1994) 149-158.
- 12) 横山弘之: "微小共振器レーザー", *応用物理*, **61** (1992) 890-901.
- 13) 氏原紀公雄: "超短共振器レーザーと自然放出の制御", *光学*, **23** (1994) 668-673.
- 14) F. De Martini and G. R. Jacobovitz: "Anomalous spontaneous-stimulated-decay phase transition and zero-threshold laser action in a microscopic cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988) 1711-1714.
- 15) T. Baba, T. Hamano, F. Koyama and K. Iga: "Spontaneous emission factor of a microcavity DBR surface-emitting laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1347-1358.
- 16) M. Yamanishi: "High-speed semiconductor light emitters based on quantum-confined field effect: Developed devices and inclusion of quantum microcavities," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 2764-2785.
- 17) T. Tsutsui, C. Adachi, S. Saito, M. Watanabe and M. Koishi: "Effect of confined radiation field on spontaneous-emission lifetime in vacuum-deposited fluorescent dye films," *Chem. Phys. Lett.*, **182** (1991) 143-146.
- 18) T. Nakayama, Y. Itoh and A. Kakuta: "Organic photo- and electroluminescent devices with double mirrors," *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 594-595.
- 19) T. Tsutsui, N. Takeda and S. Saito: "Sharply directed

- emission in organic electroluminescent diodes with an optical-microcavity structure," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1868-1870; N. Takeda, T. Tsutsui and S. Saito: "Strongly directed emission from controlled-spontaneous-emission electroluminescent diodes with europium complex as an emitter," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L863-L866.
- 20) A. Dodabalapur, L. J. Rothberg, T. M. Miller and E. W. Kwock: "Microcavity effects in organic semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 2486-2488.
 - 21) T. Nakayama, Y. Itoh and A. Kakuta: "Characteristics of organic photo- and electro-luminescent devices with double mirrors," *Opt. Rev.*, **2** (1995) 39-42.
 - 22) P. W. Barber and R. K. Chang: *Optical Effects Associated with Small Particles* (World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey, Hong Kong, 1988).
 - 23) A. J. Campillo, J. D. Eversole and H.-B. Lin: "Cavity quantum electrodynamic enhancement of stimulated emission in microdroplets," *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 437-440.
 - 24) M. Kuwata-Gonokami, K. Takeda, H. Yasuda and K. Ema: "Laser emission from dye-doped polystyrene microsphere," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, **31** (1992) L99-L101; "Lasing and intermode correlation of whispering gallery mode in dye-doped polystyrene microsphere," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **216** (1992) 21-25; 五神 真, 竹田研爾: 固体物理, **27** (1992) 147-151.
 - 25) M. Kuwata-Gonokami, K. Takeda and T. Kimura: "Mode elimination of stratified micro spherical cavity laser," to be submitted.
 - 26) L. Collet, V. Lefevre-Seguín, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche: "Very high-Q whispering gallery mode resonances observed on fused silica microsphere," *Europhys. Lett.*, **23** (1993) 327-334.
 - 27) S. L. MacCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, R. A. Logan: "Whispering-gallery mode microdisk lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 289-291.
 - 28) U. Mohideen, R. E. Slusher, P. R. Rice and L. Pedrotti: "Thresholdless microlasers?" *Tech. Dig. QELS '95* (1995) p. 17.
 - 29) 文献6) pp. 3-11 参照.
 - 30) G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn: "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 823-825.
 - 31) V. Mizrahi, D. J. Lemaire, T. Erdogan, W. A. Reed, D. J. DiGiovanni and R. M. Atkins: "Ultraviolet laser fabrication of ultrastrong optical fiber gratings and of germania-doped channel waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 1727-1729.
 - 32) N. M. Lawandy, R. M. Balachandran, A. S. L. Gomes and E. Sauvain: "Laser action in strongly scattering media," *Nature*, **368** (1994) 436-438.
 - 33) 大津元一, 堀 裕和: "フォトンSTMの実験と理論", 光学, **21** (1992) 780-788.
 - 34) E. Betzig and R. J. Chichester: "Single molecule observed by near field scanning optical microscopy," *Science*, **262** (1993) 1422-1425.
 - 35) H. F. Hess, E. Betzig, T. D. Harris, L. N. Pfeiffer and K. W. West: "Near-field spectroscopy of the quantum constituents of a luminescent system," *Science*, **264** (1994) 1740-1745.
 - 36) K. Cho, Y. Ohfuti and K. Arima: "Study of scanning near-field optical microscopy (SNOM) by nonlocal response theory," *Proc. Int. Conf. on Optical Properties of Nanostructures*, Sendai (1994), *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, Suppl. **34-1** (1995) 267-270.
 - 37) 清水富士夫: "原子干渉計", 応用物理, **62** (1993) 871-880.
 - 38) E. T. Jaynes and F. W. Cummings: "Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser," *Proc. IEEE*, **51** (1963) 89-109.
 - 39) S. Haroche and D. Kleppner: "Cavity quantum electrodynamics," *Phys. Today*, **42** January (1989) 24-30.
 - 40) M. G. Raizen, R. J. Thompson, R. J. Brecha, H. J. Kimble and H. J. Carmichael: "Normal-mode splitting and linewidth averaging for two-state atoms in an optical cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 240-243.
 - 41) C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa and Y. Arakawa: "Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity," *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 3314-3317.
 - 42) R. J. Thompson, G. Rempe and H. J. Kimble: "Observation of normal-mode splitting for an atom in an optical cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992) 1132-1135.
 - 43) Y. Zhu, D. J. Gauthier, S. E. Morin, Q. Wu, H. J. Carmichael and T. W. Mossberg: "Vacuum rabi splitting as a feature of linear-dispersion theory: Analysis and experimental observations," *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990) 2499-2502.
 - 44) R. Shimano, S. Inouye, M. Kuwata-Gonokami, T. Nakamura, M. Yamanishi and I. Ogura: "Efficient phase conjugation wave generation from a GaAs single quantum well in a microcavity," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L817-L820.
 - 45) 花村榮一: "励起子系の非線形光学現象", 応用物理, **63** (1994) 873-884.
 - 46) G. P. Collins: "Three-dimensional optical molasses binds a new type of crystal," *Phys. Today*, **46** June (1993) 17-19.