

複雑系としてのドレスト光子とその応用

大津 元一^{1,2}, 香取 眞理³

¹東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

²(任)ドレスト光子研究起点(〒221-0022 横浜市神奈川区守屋町3-13-19)

³中央大学 理工学部(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Complex System of Dressed Photons and Applications

Motoichi OHTSU^{1,2} and Makoto KATORI³

¹The University of Tokyo, 2-11-26 Yohoi, Bunkyo, Tokyo 113-8656

²Research Origin for Dressed Photon, 3-13-19 Moriya, Kanagawa, Yokohama 221-0022

³Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo, Tokyo 112-8551

(Received October 12, 2016)

By noting that a dressed photon is a complex quasi-particle composed of photons, electrons, and phonons, creation of the dressed photon and its characteristics are reviewed from the viewpoint of the quantum field in an off-shell space. After applications to silicon light emitting diodes and lasers are presented, their fabrication and operating principle are analyzed by the stochastic model of a complex system.

Key Words: Dressed photon, Silicon, Light emitting diode, Laser, Complex system

1. はじめに

光の波長より大きな寸法の物質中を伝搬する光が電子・正孔対(励起子)と相互作用すると新しい定常状態が物質全体にわたり形成される。この定常状態は励起子ポラリトンと呼ばれる準粒子で記述することができる。その運動量とエネルギーの間の分散関係をグラフ化すると放物線となり、この曲線は量子場の理論でオンシェル(on shell)と呼ばれている^{1,2)}。一方この曲線から外れた広い領域はオフシェル(off shell)と呼ばれている。

ドレスト光子(DPと略記)はオフシェルの領域に発生する量子場であるが、本稿ではそれが光子、電子、フォノンからなる複合粒子であることに注目しDPの発生の原理、性質を解説する。応用例としてシリコン(Si)結晶を材料とする発光ダイオード(LED)、レーザーを紹介する。これらの製作過程、発光の起源を複雑系として捉え、確率過程モデルを用いたシミュレーション結果を提示して今後の研究の方向を展望する。

2. オフシェル光子としてのドレスト光子

オフシェル領域に準粒子が存在するとすれば、それは次の2つの性質を持つ。

(1)運動量の取り得る範囲が広いので、運動量と位置に関する不確定性原理から決まる準粒子の局在寸法は

光の波長以下である。この準粒子は物質中または表面にあるナノ構造の位置に発生するが、後者の場合に表面近傍の電磁場は「近接場光」と呼ばれている³⁾。

(2)エネルギーの取り得る範囲は広いので、エネルギーと時間に関する不確定性原理から決まる準粒子の存在時間は短い。従ってこれは「仮想光子」と呼ばれている。

以上の2つの性質を持つ量子場がDPに対応する^{4,5)}。上記(1)のようにDPは物質のナノ構造の位置に発生するが、その発生のためには物質に光(オンシェルの光子)を照射するのがもっとも簡単である。このとき照射光がナノ物質中の励起子と相互作用する様子を記述するには系のエネルギーを量子化する必要がある。しかしDPのナノ寸法の局在性を表現しようとすると、そのような小さな空間では入射電磁場のモードを定義するために必要な共振器を構成することができない。そこで無限数のモードの場を考える。一方、(2)に記したようにエネルギー範囲が広いので、物質中の励起子のエネルギー準位も無限数考える。こうしてハミルトニアンを書き下すことができ、この相互作用を表す準粒子の生成・消滅演算子が導出される。これらの演算子は光子の演算子と励起子の演算子の和からなることから、光子は励起子の衣をまとうと考えられ、DPと呼ばれている^{4,5)}。これまでに明らかになっているDPの主な性質は次のとおりである。

(a)近接して置かれた複数のナノ物質の間でDPを授受す

る過程は湯川関数で表され、その空間的広がりは一ナノ寸法と同等である⁶⁾。

(b)DPは励起子の局在性に起因して周囲の物質系のフォノンとも結合してその衣をまとい、DPフォノン(DPPと略記)と呼ばれる新たな準粒子を形成する⁷⁾。

このときDPが空間的に局在し、エネルギー範囲が広いことから、DPと結合するのは多モードのコヒーレントフォノンである。

(c)DPPは物質の突起部、物質中の不純物原子の位置に選択的に局在する⁸⁾。

DPおよびDPPは光子、電子、フォノンを構成要素とする複合粒子である。従ってこれらに関わる現象を考察するとき、DPおよびDPPをその構成要素に分解・還元してしまうと意味を持たなくなる。すなわち扱う問題を素粒子に還元せず、メソスコピックの系としてとらえるべきであり、ここに「複雑系」との接点がある。

3. 応用

DPおよびDPPはこれまでに加工、デバイス、システムに広く応用されている⁹⁾。ここでは前節の性質(c)のうち物質中の不純物原子の位置に局在するDPPの応用例としてSi結晶を材料とするLEDおよびレーザーを紹介する。

Siは間接遷移型半導体であり、帯間遷移のためには運動量の異なる電子と正孔とが再結合しなければならない。その際、運動量の保存則を満たすためには光子の他にフォノンも同時に放出する必要があるが、それを満たす確率は低い。しかしDPPはフォノンを含むので、これが伝導帯中の電子と相互作用すれば運動保存則が満たされ、発光デバイスが実現する。そのためには製作時、および動作時にDPPを使う。

3.1 製作

ここでは近赤外光を発生するLEDを例にとり、その製作方法について概説する。まずn型Si結晶基板の表面にイオン注入法によりボロン(B)原子を注入しp型とする。これに順方向電流を流し、ジュール熱によりアニールする。これによりB原子は熱拡散するが、その際基板表面に波長約1.3 μmの近赤外光を照射する。この光の光子エネルギーはSiのバンドギャップエネルギー $E_g (= 1.12 \text{ eV})$ に比べ小さいので吸収されず、結晶内部に侵入し、前節(c)の性質によりB原子の位置にDPPが生成・局在する。

このDPPの付近にある伝導帯中の電子はDPP中のフォノンと運動量を授受し発光する。これはDPPにより駆動された誘導放出光であり、結晶外部に伝搬する。言い換えると、与えられたジュール熱は光エネルギーとなって外部へ散逸する。この散逸によりDPPの発生した位置ではSi結晶の過熱が局部的に抑えられ、B原子の拡散は制限される。

このようなDPPの発生、誘導放出、エネルギー散逸が各所で生じ、発光強度は次第に増加して定常値に達し製

作が終了する。この製作方法はDPP援用アニールと呼ばれている¹⁰⁾。なお、このアニールが効率よく進行する為の最適条件は、順方向電流および照射光によりpn接合部に毎秒注入される電子数と光子数の比がほぼ1:1であることが確認されている¹¹⁾。これは上記のジュール加熱と誘導放出による冷却のつり合いを表している。

3.2 動作

製作されたLEDを動作させるには上記の照射光は不要である。また製作時の順方向電流に比べ低電流を流せばよい。その際、結晶内部ではDPPが発生し、これが発光源となる。Fig. 1中の曲線Aは30分間のDPP援用アニールにより作製されたLEDの発光スペクトルである¹²⁾。このLEDの外部量子効率の値は15%、発光パワーは1.1 Wに達し、高効率・高パワー発光していることが確認されている。参考のためにアニール前の微弱な発光スペクトルを曲線Bに示す。

曲線Aの形は曲線Bと大きく異なっており、発光スペクトルは E_g 以下の低エネルギー側に広がっている。 E_g の位置に明瞭な発光ピークは存在せず、製作の際に照射した光の光子エネルギー(0.95 eV、波長1.30 μm)に相当する領域にピーク(下向き矢印)が現れている。すなわち発光は照射光の複製になっており、この現象は光子エネルギーに関する光子ブリーディング(PBと略記)と呼ばれている¹³⁾。なお、二つの上向き矢印はDPPが各々一つの光学フォノン、二つの光学フォノンを放出することにより生じた側波帯である。

PBの起源を探るためにアトムプローブ法を用いB原子の空間分布が測定された¹⁴⁾。ここでは一つのB原子とその近隣にあるもう一つのB原子に注目し、両者をB原子対とみなしてその長さや方向が評価された。なぜならば性質(c)に加え、不純物の対があるとフォノンはさらに局在しやすくなるため、この対はDPPを生成するためのフォノン局在中心として働くからである¹⁵⁾。この性質に留意し、上記の測定結果を分析したところ、DPP援用アニール前にはB原子分布は不規則であるが、アニール後にはB原子対の長さ d はSi結晶の格子定数 a の3倍($d = 3a$)、かつその方向は入射光の伝搬方向と垂直面内(すなわち結晶基板表面内)となり、B原子の空間分布に

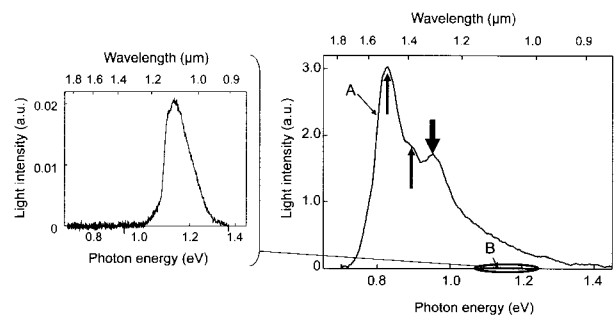


Fig. 1 Light emission spectra. Curve A is the spectrum of the fabricated device. Curve B is the spectrum acquired before the DPP-assisted annealing. Curve B is magnified and is displayed in the left part of this figure.

規則性が生じることが確認された¹⁴⁾。これをSi結晶のエネルギー帯構造をもとに考察すると次のようになる。

近赤外光の発生に関わる電子の伝導帯の底はX点近傍にあり、価電子帯の頂上はΓ点にある。この位置にある電子と正孔が再結合し発光するにはX点とΓ点の差に相当する運動量を電子とフォノンとの間で授受する必要がある。X点とΓ点の差に相当する運動量は h/a (h はプランク定数)であるが、 $d = 3a$ の場合、このB原子対に局在するフォノンの運動量は $h/3a$ となり、必要な値の1/3である。ここでDPPを構成するフォノンはコヒーレント状態であることから複数のフォノンを含み、従ってフォノン三分の運動量を電子と授受することができる。その結果、上記の要求に応えることができ電子は正孔と再結合して発光する。このとき発光の光子エネルギーは $E_g - 3E_{\text{phonon}}$ (E_{phonon} はフォノンのエネルギー)であり、これが製作の際に照射した光の光子エネルギーに相当する。これが光子エネルギーに関するPBである。言い換えると、製作の際にB原子は自律的にその空間分布を変え、電子とフォノンとの運動量の授受、それによる発光、さらにはPBの効果を実現させているのである。

なお、DPP援用アニールの際に直線偏光を照射することにより、製作されたLEDからの発光も同様に直線偏光していることが確認されている¹⁴⁾。これは光子スピンの関係するPBである。その起源としてアニール後のB原子対の長さ、方向は上記と同等であり、さらに結晶基板表面内で直線偏光の方向と垂直に配列することが確認された。製作の際にはDP中の横モードの光学フォノンがDPP援用アニールに寄与するが、このフォノンの格子振動の方向はDPP援用アニールの際の照射光の直線偏光の方向と平行である。動作時にもこのフォノンが発光に寄与するので、発光の偏光方向は照射光の偏光方向と一致するのである。

Si結晶に共振器構造を作りつけることにより、上記LEDと同様の近赤外光を発するレーザーも同様のDPP援用アニールにより製作されている¹⁶⁾。まず、幅10 μm 、厚さ2 μm 、長さ550 μm のリッジ導波路を作りつけたデバイスが製作され、室温でのレーザー発振のしきい値電流密度1.1 kA/cm^2 、注入電流60 mAのときの外部微分子効率1%が得られた。これら直接遷移型半導体のIn-GaAsP/InPを用いた波長1.3 μm の二重ヘテロ構造のレーザーの値と同等の値である¹⁷⁾。発振しきい値以上(直流電流56 mA)で波長1.271 μm (DPP援用アニールの際の照射光波長と同等)における鋭い単一モード発振が実現したが、これはPBの証左である。次に導波路内への光閉じ込め係数の増大化などの改良がなされ、しきい値電流密度は40 A/cm^2 まで減少した¹⁸⁾。

さらに赤外光に対する吸収損失が低いことに注目し、高出力化を目的として狭ストライプ導波路を使わない長共振器(長さ1 mm)構造が採用された。その結果共振器両端面出力パワー200 mW、しきい値電流密度は12.5 A/cm^2 (上記の直接遷移型半導体の場合の約1/100)が得られた。以上により上記のLEDと同様に高効率・高パワー発光が実現した¹⁹⁾。

4. 複雑系としての取り扱い

前節のPBの起源において重要な役割を演じたのはSi結晶に注入されたB原子であった。すなわちDPP援用アニールの結果B原子の配置に規則性が生じ、そこにLED製作時に照射した光の情報(光子エネルギーや偏光の情報)が埋め込まれるのである。すなわちB原子の空間分布と配置はPBにおいて、いわば遺伝子の役割を担っている。

ここで注意すべきことは、「遺伝情報」であるB原子配置は、Si-LED製作者が材料内に意図的に定めたものではないという点である。照射光の波長や偏光に応じてSi-B系が自律的に応答することにより、PBを可能とするB原子配置が形成され安定化するのである。複雑系科学では多体系(大規模自由度系)が見せるこのような予定調和的な応答を自己組織化現象とよび、その表現の仕方が研究されている²⁰⁾。この方法に沿い最近では香取・小林によりLEDのPBを一つの自己組織化現象として捉えた数理的モデルが提案され、このモデルを数値シミュレーションした結果、LED製作と動作の実験結果が再現されている²¹⁾。本節では、この複雑系科学に基づくPBのモデル化について紹介する。

寸法3 mm \times 3 mm \times 625 μm のSi結晶基板に注入されたB原子は、基板表面から1.5 μm –2.0 μm のごく薄い層内に分布する¹⁴⁾。そこでこの層を2次元正方格子で表し、Si結晶中のB原子の熱拡散を、この正方格子上のN個の粒子のランダムウォークとしてモデル化する。ここで各粒子は熱活性状態($\alpha = +$)と不活性状態($\alpha = -$)の二状態をとり、 $\alpha = +$ 状態のときにだけ最近接格子点へホッピングできる。またB原子の熱拡散は順方向電流によって与えられるジュール熱によって駆動されるので、順方向電流の大きさを表す外部パラメータIを導入し、 $\alpha = +$ 状態のランダムウォーカーのホッピング率をIの適当な単調増加関数で与える。また、照射光の強度を表す外部パラメータを P^0 と表す。

前節の後半で述べたように、B原子はPBが起こるように間隔 $d = 3a$ をもつ対構造を作る。この対構造ができるとそこでPBが起こり光の誘導放出によりエネルギー散逸が生じるため、B原子の拡散運動は抑えられ対構造は安定化する。この秩序化現象の原因を、還元論的な考察に従って探ろうとすると、「鶏が先か卵が先か」という循環論に陥ってしまう。そこで複雑系科学においては、そのような還元論的な原因追究は止め、実現された機能を一つのサイクルとして捉え、それを単位として系全体の時間発展を議論することにするのである。この考え方にもとづくと数理モデルにおける基本サイクルは次のようになる²¹⁾。

- ① ランダムウォークの結果、格子上に間隔 $d = 3a$ の対構造がいくつかできたとする。この条件の下、各々の粒子対の位置において、局所的にそれぞれ次のプロセスを考える。
- ② 順方向電流を表す外部パラメータIに比例する平均値をもつポアソン分布に従って、乱数 $X(\geq 0)$ を生成さ

せる。この値をPBに關与する可能性のある仮想電子の数とする。

- ③ PBの結果新たに生成された光の強度 P^{PB} (一つ前のサイクルの⑤で定義される)と P^0 とを適当な重みで足し合わせ $P^{total} = c_1 P^0 + c_2 P^{PB}$ とする。この値に比例した平均値をもつポアソン分布に従って②とは独立に乱数 Y (≥ 0)を発生させる。これに自然放出の分も加え $Y' = Y + 1$ とし、この値をPBに關与する可能性のある仮想光子の数とする。
- ④ 3.1節の最後に述べた電子数と光子数のつり合い則⁽¹¹⁾により、 $Z = \min\{X, Y'\}$ と定め、これが粒子対上で局所的に複製された光子の個数を与えるものとする。
- ⑤ ②~④のプロセスをすべての粒子対の上で行い、得られた Z の値をすべて加えたものを P^{PB} とする。
- ⑥ 強度 P^{PB} の複製された光は伝搬し、系の外にエネルギーを放出する。複製光子数 Z が1以上であった粒子対においては、その粒子対を形成していたランダムウォーカーはエネルギーを失い不活性化するものとする($\alpha = + \rightarrow -$)。
- ⑦ 依然として $\alpha = +$ 状態にあるランダムウォーカーをホッピングさせ、①に戻る。

このサイクルでは格子上の間隔 $d = 3a$ の粒子対構造の形成がフォノン生成を意味し、これが仮想電子(その個数は X)および仮想光子(その個数は Y')と相互作用した結果 Z 個の複製光子を生む過程を表現している。その意味でこのサイクルそのものがDPPであると言うこともできる。このサイクルが間隔 $d = 3a$ の粒子対という局所的な構造の上で巡回することが、(湯川関数で表される)DPの局所性に対応している。

DPが仮想的な複合粒子(すなわち、オフシェル粒子)であることに呼応し、上述のサイクルもまた一つのシナリオとして仮想されたものにすぎない。数理モデルを用いた複雑系研究においては、数値シミュレーションによってこのサイクルを何度も回したときに、実際にどのように機能するかを調べることがポイントになるのである。実際の数値シミュレーションでは格子寸法 $L = 200$ の系において、 $N = 400$ 個のランダムウォーカーをランダムに初期配置した(Si結晶中のB原子数密度 $\rho = N/L^2 = 0.01$ に相当)⁽²¹⁾。上記①~⑦の基本サイクルに要する時間をシミュレーション時間 t の単位と考えた。初期条件として、全粒子の活性状態 α を $+$ 、外部パラメータ $I = 40$ 、 $P^0 = 80$ 、 $P^{PB}(0) = 0$ とした。

数値シミュレーションの結果をFig. 2に示した。強度 $P^{PB}(t)$ は指数関数的に増大して(振動を伴いながら)大きな値をもつ平衡値に達し(図中の領域A)、その後は平衡値の周りで揺動する様子が見られる(領域B)。また、活性状態 $\alpha = +$ にあるランダムウォーカーの個数の全粒子数 N に対する割合は指数関数的に減少した後、低い平衡値に達することが確認されている。このことは、間隔 $d = 3a$ の粒子対を多数もつ平衡状態が実現し、そこではPBが安定的に繰り返されていることを示している。(本稿では詳しく述べないが、実際に数値シミュレーションしたモデルでは、上記の基本サイクルの④で光子複製に

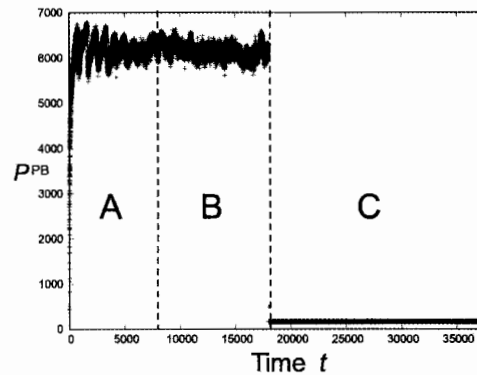


Fig. 2 Simulation results of the Si-LED model. Time dependence of the power of emitted light by PB, $P^{PB}(t)$, is shown. For the fabrication process ($0 \leq t \leq t_0 = 18000$), $P^0 = 80$, $I = 40$, and for the operation process ($t > t_0$), $P^0 = 0$, $I = 4$. The following three states were realized. A: $0 \leq t < 8000$, transient state in the fabrication process. B: $8000 \leq t \leq t_0$, equilibrium in the fabrication process. C: $t > t_0$, stable state in the operation process.

寄与しなかった電子と光子の余剰エネルギーの蓄積が粒子の再活性化 $\alpha = - \rightarrow +$ を促すというプロセスも考慮した。(これが上述の平衡状態での揺動に寄与している。)

次にLEDの動作時の条件の数値シミュレーションを行うため、系が平衡状態に達した後(時刻 $t = t_0$ 、すなわちLED製作終了後)、外部パラメータの値を $P^0 \rightarrow 0$ 、 $I \rightarrow I/10$ とした。つまり外部からの照射光をなくし、また順方向電流の値を極端に小さくした。その結果、Fig. 2の領域Cに示すように $P^{PB}(t)$ の値は領域Bの値に比べ小さいものの、正の値を維持していることが示された。これは $t > t_0$ ($= 18000$)では順方向電流の値が小さいためランダムウォークが起こらず、その結果、間隔 $d = 3a$ の粒子対構造はいわば凍結され存在し続け、その上でPBの基本サイクル中の②~⑤が繰り返されることを意味する。

Fig. 1に示したように、実験ではPBの際にDPPが1, 2個の光学フォノンを放出するプロセスが観測されている⁽²²⁾。これは実際のDPP援用アニールにおいて間隔 $d = 5a$ や $d = 7a$ をもつB原子対も形成され、その構造がPBによる複製光のスペクトルを豊富なものに行っていることを示唆している⁽¹⁴⁾。数値シミュレーションモデルでは、間隔の異なる複数の粒子対を含むように基本サイクルを多様化することで、この効果も再現されている⁽²¹⁾。また、照射光の偏光状態もPBにおいて「遺伝」される実験結果⁽¹⁴⁾も基本サイクルの③で扱う仮想光子に縦偏光と横偏光の区別を考え、正方向格子の粒子対の配向に応じて別のポアソン分布を用いてそれぞれの仮想光子の発生個数を別々にカウントすることで再現されている⁽²¹⁾。

5. 今後の展望

本稿の冒頭で述べたように、DPはオフシェル領域の量子場であり、その定式化は未だ完成していない。他方、Si結晶を材料とするLEDとレーザーはこのメソスコピックなオフシェル量子場の効果を利用して通常のマク

ロな伝搬光, すなわちオンシエルの光を複製することを
実現している. ミクロな基礎理論が不在の中で, マクロ
な現象, それも自己組織的に時間発展する系を記述する
ために, ここでは複雑系科学の手法²⁰⁾を応用した結果を
紹介した. この方法は現象論的モデル化といわれるもの
である. 系の微細構造や原理が分からない研究段階にお
いて, コアと思われる仕組みを仮定し, それを単位とし
た粗視化モデルを提案する. そして, そのモデルを数値
シミュレーションすることにより, 系の総合的な振舞い
を再現することを試みるという方法論である. 本稿で紹介
した香取・小林のモデル²¹⁾をさらに改良することによ
り, LEDとレーザーの製作方法やその動作に対して, 理
論面から示唆を与えることが可能となるであろう.

ここで取り扱ったLEDはミクロな視点においても非平
衡開放系である. 流体力学系のようなマクロな非平衡ダイ
ナミクスを, 非平衡統計力学とよばれるミクロな視点
に基づいた理論から導出する際には, 局所平衡状態とい
うメソスコピックな概念が重要である²²⁾. しかし本稿で
紹介したDPやB原子の対構造の空間的拡がりには原子ス
ケールである. 温度場や熱拡散といった既存の概念だけ
でPBを説明することには困難がある. また, 順方向電
流が供給するジュール熱を利用することによって照射光
の情報をB原子配置としてSi結晶内に記憶させ, それに
基づいて高能率・高パワーでエネルギーを系の外部に放
出するLEDとレーザーのメカニズムを理解するには従来
の熱力学の範囲を超えた情報理論的な視点も重要になる
ように思われる. DPの研究を進めることは, メソスコ
ピック領域におけるオフシェル量子場というミクロ科学
だけでなく, 複雑系科学や非平衡統計力学, さらに情報
熱力学の研究に資するものと期待される.

6. むすび

ナノ寸法の空間において励起子のエネルギーの衣をま
とった光子であるドレスト光子について, オフシェル領
域に発生する量子場の観点から発生する原理, 性質を紹介
した. またドレスト光子は多モードのコヒーレントフォ
ノンと結合し, ドレスト光子フォノンと呼ばれる新たな
準粒子を形成して物質の突起部, 物質中の不純物原子の
位置に局在することを記した.

本稿ではシリコン結晶を材料とする発光ダイオード,
レーザーを紹介した. これらのデバイスが発する光の光
子エネルギーは製作時に照射する光の光子エネルギーの
複製になっていること, すなわち光子ブリーディングと
呼ばれる性質を示すことを指摘した.

その上で, 発光ダイオードに対して, 複雑系科学の手

法を応用することにより提案されたモデル²¹⁾を紹介し
た. この現象論的なモデル(粗視化モデル)は発光ダイ
オードの製作過程と動作特性を再現することに成功して
おり, 将来的には, より高性能のデバイスを製作するた
めの理論的指針を与えるものと期待される.

謝 辞

オフシェル科学の観点からご教示頂いた小嶋 泉(元京
都大学), 西郷 甲矢人(長浜バイオ大学), 岡村 和弥(名
古屋大学)の各氏に感謝します. 一方, 実験研究にご協
力頂いた川添 忠(NPOナノフォトニクス工学推進機構),
八井 崇, 金 俊亨(共に東京大学)の各氏に感謝します.
またLEDのモデル化とその計算機シミュレーションによ
る研究は, 小林 博継氏(ビジネス・ブレイクスルー大
学)との共同研究に基づく. 本記事に関する研究の一部
は日本学術振興会研究拠点形成事業(A, 先端拠点形成
型), 科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究)の支援を受け
た.

参考文献

- 1) R. P. Feynman: *The Theory of Fundamental Processes* (W. A. Benjamin, New York, 1962) p. 95.
- 2) 大津 元一: 応用物理 **85** (2016) 1023.
- 3) M. Ohtsu: *Progress in Nanophotonics 4* ed. M. Ohtsu (Springer, Heidelberg, 2016) p. 1.
- 4) 大津 元一: ドレスト光子(朝倉書店, 東京, 2013)p. 10.
- 5) M. Ohtsu: *Dressed Photons* (Springer, Heidelberg, 2013) p. 11.
- 6) K. Kobayashi and M. Ohtsu: *J. Microscopy* **194** (1999) 249.
- 7) Y. Tanaka and K. Kobayashi: *Physica E* **40** (2007) 297.
- 8) Y. Tanaka and K. Kobayashi: *J. Microscopy* **229** (2008) 228.
- 9) M. Ohtsu: *Progress in Nanophotonics 1* ed. M. Ohtsu (Springer, Heidelberg, 2011) p. 1.
- 10) M. Ohtsu: *Silicon light emitting diodes and lasers* (Springer, Heidelberg, 2016) p. 16.
- 11) J. H. Kim, T. Kawazoe, and M. Ohtsu: *Appl. Phys. A* **121** (2015) 1395.
- 12) T. Kawazoe, M. A. Mueed, and M. Ohtsu: *Appl. Phys. B* **104** (2011) 747.
- 13) M. Ohtsu: *Progress in Nanophotonics 4* ed. M. Ohtsu (Springer, Heidelberg, 2015) p. 10.
- 14) T. Kawazoe, K. Nishioka, and M. Ohtsu: *Appl. Phys. A* **9**(2015) 1.
- 15) D. N. Payton and W. M. Visscher: *Phys. Rev.* **154** (1967) 802.
- 16) T. Kawazoe, M. Ohtsu, K. Akahane, and N. Yamamoto: *Appl. Phys. B* **107** (2012) 659.
- 17) Zh. I. Alferov: *Semiconductors* **32** (1998) 1.
- 18) H. Tanaka, T. Kawazoe, M. Ohtsu, and K. Akahane: *Fluoresc. Mater.* **1** (2015) 1.
- 19) M. Ohtsu: *Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers* (Springer, Heidelberg, 2016) p. 77.
- 20) 香取 眞理: 複雑系を解く確率モデル(講談社, 東京, 1997) p. 145.
- 21) M. Katori and H. Kobayashi: *Progress in Nanophotonics 4* ed. M. Ohtsu and T. Yatsui (Springer, Heidelberg, 2016) p. 19.
- 22) 香取 眞理: 非平衡統計力学(裳華房, 東京, 1999)p. 41.