

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13374

研究課題名(和文)ドレスト光子Si製LEDの光新機能発現の為に微視・巨視構造接続工学の開拓

研究課題名(英文)Developing micro-macro-structure connection engineering for novel functions of Si-LED based on dressed photons

研究代表者

大津 元一(OHTSU, Motoichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70114858

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文):ドレスト光子フォノン(DPP)援用アニール法によりSi製の高効率・高パワーLEDを作製した。DPP発生源としてのボロン原子は対をつくり、両原子の距離はSi結晶格子定数の3倍であった。また、原子対はDPP援用アニールの際に照射する光の入射方向と垂直面内、かつ偏光方向と垂直方向に向いた。同時に、メソスコピック領域を記述する新しい数理科学モデルを構築し現象解明を試み、実験結果とよい一致をみた。また、ドレスト光子を介したランダム媒質中のエネルギー移動の統計モデルを構築した。

研究成果の概要(英文): Highly efficient and high power Si-LEDs were fabricated by dressed-photon-phonon (DPP)-assisted annealing. It was found that Boron atoms, a DPP-creation source, formed a pair, and the separation between the two atoms in the pair was three-times the lattice constant of the Si crystal. The atom pair aligned along the plane normal to the direction of the incident light beam used for the annealing. It was also normal to the polarization direction of this light. Simultaneously with these experimental works, novel mathematical scientific model was developed to analyze the light-matter interaction in a mesoscopic space. The results of the analyses agreed well with the experimental results. Furthermore, statistical model of energy transfer in a random medium via dressed photons was developed.

研究分野: ドレスト光子工学

キーワード: シリコン 間接遷移 フォノン アニール 偏光 格子定数 確率モデル

## 萌芽

### 1. 研究開始当初の背景

シリコン(Si)製の発光素子(LED等)が実現すれば電子デバイスと整合し、また有毒元素を含む化合物半導体が駆逐され環境保護上有利である。しかしSiは間接遷移型半導体なので発光効率が著しく低くこれ迄に多孔質Si等による素子開発の試みが多数あるが実用に至っていない。

しかしこれまでに研究代表者の大津は従来の材料工学とは全く異なる手法により世界初のSi製の高效率・高パワーLEDを実現した(近赤外域で外部量子効率15%、出力光パワー1W)。即ちSi結晶をジュール熱アニールする際に光を照射し(光子1)ドレスト光子(DP: ナノ寸法領域で光子と電子が結合した準粒子、仮想光子)がフォノンと結合したドレスト光子フォノン(DPP)を発生させ不純物(ボロン:B)濃度分布を制御し作製した。更に光子複製(Photon breed: PB)という新機能(LED出力光(光子2)の光子エネルギー(周波数)、光子スピン(偏光)が光子1のそれらと同一)を発見した。

この機能はLED応用上極めて有用でその設計法の確立が待望されている。これは多孔質Siの例のように物質のナノ構造のみに注目したのでは実現しないので、材料工学から脱却し光と電子系の結合を詳細に研究して設計する必要がある。

更にPBはB原子とDPPからなる微視系の分布がアニールで自己組織的に変化し、独特のメゾスコピック構造を形成した結果、光子2(巨視系)に具現する機能なので、微視的理論と巨視的理論の何れでも説明できず、物質構造と光機能を一体として捉える必要がある。更にDP及びDPPを発生させ電子系から新機能を引き出すには光子は如何に物質励起エネルギーの衣を纏うかを考察する必要がある。以上を基に微視系と巨視系との構

造を接続する設計工学の開拓が待望されている。

### 2. 研究の目的

Si製LEDを作製・評価し、DP及びDPP発生源としてのBの空間分布を分析する。メゾスコピック領域を扱う事が必須なので、必要な空間分解能と感度を持つ分析法を複数使い、光学特性評価法と連携し評価する。大津が開発したDP理論に加えメゾスコピック領域を記述しうる確率過程等の新しい数理学モデル(ダイナミカルなランダム点過程モデルなど)を構築して使い、上記分析結果を解析する。

以上を統合し、Si製LEDの光新機能発現の為に最適な光・物質融合状態を微視的構造から巨視的構造へと接続する工学の開拓に必要な実験、シミュレーション、理論の条件を明確化する。

### 3. 研究の方法

#### 《実験》

近赤外LEDを製作・評価しPBの効果を確認する。B濃度空間分布を高分解能計測しPBの効果とB濃度の空間分布の相関を評価する。Bの位置とDP発生位置・発生効率の関係を分析する。光子1照射アニールによるB濃度空間分布の制御限界とB位置制御精度限界を推定する。Bの最適配列により実現される新構造の光学的、電気的特性を明確化する。

#### 《シミュレーション》

B濃度空間分布を統計処理し、微視系から巨視系へ至る分布特性変化を評価する。

#### 《理論》

ダイナミカルなランダム点過程モデルを導入しB濃度空間分布の特性を解析する。DP理論を基に微視系での光と電子系の結合の特性を解析する。非平衡統計力学および空間点過程に対する確率論の手法を基に微視系と巨視系を接続する構造の特性を解析する。

## 《総括》

以上の三つの結果を統合し物質構造と光機能を一括して捉え微視的構造と巨視的構造を接続する工学の確立の条件を明確化し総括する。

## 4. 研究成果

ドレスト光子フォノン (DPP) 援用アニール法によりSi製の高效率・高パワーLEDを製作し、このLEDが示すに光子複製 (Photon breed: PB) の新機能を説明するため、DPP発生源としてのボロン(B)のSi結晶中での空間分布を高分解能測定した。

その結果、B原子は対をつくり、2つのB原子の距離はSi結晶格子定数の3倍であることがわかった。これは伝導帯中の電子が、3つのフォノンと運動量を授受し、発光することを示し、まさにPBの原因になっていることが確認された。

また、B原子対はDPP援用アニールの際に照射する光の入射方向と垂直面内に配列することがわかった。これが発光の際の光子の運動量に関するPBの原因であることが確認された。

さらに、DPP援用アニールの際に直線偏光を照射した場合、B原子対は偏光方向と垂直方向に向くことがわかった。これが発光の際の光子のスピン(偏光)に関するPBの原因であることが確認された。

次に、これまでのDP理論に加え、メゾスコピック領域を記述する新しい数理科学モデルを構築し現象解明を試みた。具体的には、DPP援用アニール中のBの熱拡散と対形成を、格子点をランダムウォークする粒子集団の凝集プロセスとしてシミュレートする独自の確率モデルを構築し、実験結果と整合した傾向を得ることに成功した。

また、ドレスト光子(DP)を介したランダム媒質中のエネルギー移動の統計モデルを構築し、DPと伝搬光ではパーコレーションの

傾向が明確に異なることを新規に見出した。

以上を統合し光新機能発現に最適な光・物質融合状態を微視的構造から巨視的構造に接続する基本的条件を明確化することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) T. Kawazoe, K. Nishioka, M. Ohtsu, "Polarization control of an infrared silicon light-emitting diode by dressed photons and analysis of the spatial distribution of doped boron atoms," Applied Physics B **121** (2015) 1409 - 1415

〔学会発表〕(計2件)

(1) 高橋幹, 香取眞理, 成瀬誠, 川添忠, 大津元一, 「ドレスト光子によるフォトンブリーディング過程に関する確率モデル」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月18日、関西大学千里山キャンパス

(2) K. Nishioka, T. Kawazoe, M. Ohtsu, "Polarization control of Si-LED by photon breeding effect," The 10<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, 2015年7月7日、函館市国際水産・海洋センター

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日：

国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

大津 元一 (OHTSU, Motoichi)

東京大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70114858

### (2)研究分担者

香取 眞理 (KATORI, Makoto)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：60202016

成瀬 誠 (NARUSE, Makoto)

国立研究開発法人情報通信研究機構・

光ネットワーク研究所・主任研究員

研究者番号：20323529

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：