

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4928321号  
(P4928321)

(45) 発行日 平成24年5月9日(2012.5.9)

(24) 登録日 平成24年2月17日(2012.2.17)

(51) Int. Cl. F I  
 HO 1 S 3/05 (2006.01) HO 1 S 3/05  
 HO 1 S 5/10 (2006.01) HO 1 S 5/10

請求項の数 5 (全 8 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2007-78817 (P2007-78817)                  (22) 出願日 平成19年3月26日 (2007. 3. 26)                  (65) 公開番号 特開2008-243915 (P2008-243915A)                  (43) 公開日 平成20年10月9日 (2008. 10. 9)                  審査請求日 平成21年12月21日 (2009. 12. 21)</p>	<p>(73) 特許権者 503360115                  独立行政法人科学技術振興機構                  埼玉県川口市本町四丁目1番8号                  (74) 代理人 110001069                  特許業務法人京都国際特許事務所                  (74) 代理人 100095670                  弁理士 小林 良平                  (72) 発明者 野田 進                  京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舎231号                  (72) 発明者 山口 真                  京都市西京区川島玉頭町21-2 グリーンビュー101号</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 発光素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

微小光共振器に発光体を導入して成る発光素子において、  
 前記微小光共振器の光子寿命の2倍とラビ振動周期の半周期とが一致するように設定されていることを特徴とする発光素子。

【請求項2】

微小光共振器の共振周波数を  $\omega_{cav}$ 、微小光共振器と発光体の結合定数を  $g_k$  とすると、微小光共振器のQ値が次の式

$$Q = \omega_{cav} / 4g_k$$

(但し、結合定数は、電子系位置の電界を  $E_{cav}(r)$ 、共振モード電界の最大値を  $E_{cav,max}$ 、共振モードの有効モード体積を  $V_{eff}$ 、電子系がもつ電気双極子モーメントを  $d_{21}$ 、発光体周囲の屈折率を  $n$ 、発光体位置における偏光の単位ベクトルを  $e_{cav}$  とすると前記結合定数  $g_k$  は次の式

【数1】

$$g_k = \frac{|E_{cav}(r)|}{E_{cav,max}} \frac{e_{cav} \cdot d_{21}}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar \omega_{cav}}{2 n^2 \epsilon_0 V_{eff}}}$$

で求められる。) )

を満たすように設計されることを特徴とする請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 3】

微小光共振器の共振周波数を  $\omega_{cav}$ 、微小光共振器と発光体の結合定数を  $g_k$ 、発光体から微小光共振器以外に漏れるエネルギーの割合のうち非発光エネルギーの割合を  $2\Gamma_{res}$ 、自然放出エネルギーの割合を  $2\Gamma_{spon}$  とすると、微小光共振器の Q 値が次の式

【数 2】

$$Q = \frac{\omega_{cav}}{4g_k + 2(\Gamma_{spon} + \Gamma_{res})}$$

10

(但し、電子系位置の電界を  $E_{cav}(r)$ 、共振モード電界の最大値を  $E_{cav,max}$ 、共振モードの有効モード体積を  $V_{eff}$ 、電子系がもつ電気双極子モーメントを  $d_{21}$ 、発光体周囲の屈折率を  $n$ 、発光体位置における偏光の単位ベクトルを  $e_{cav}$  とすると前記結合定数  $g_k$  は次の式【数 1】

$$g_k = \frac{|E_{cav}(r)|}{E_{cav,max}} \frac{e_{cav} \cdot d_{21}}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar \omega_{cav}}{2 n^2 \epsilon_0 V_{eff}}}$$

で求められる。) )

20

を満たすように設計されることを特徴とする請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 4】

前記微小光共振器が、スラブ状の母材に該母材とは屈折率の異なる異屈折率領域を周期的に設けて成るフォトニック結晶の前記異屈折率領域の周期的配列を点状に欠陥させることにより構成されたフォトニック結晶共振器であることを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 5】

前記発光体が量子ドットであることを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の発光素子。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、単一光子光源に利用可能な発光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

微小光共振器に発光体を導入すると発光遷移割合(発光速度)が増大することから(Purcell効果)、高性能な発光素子の実現が期待されている(例えば特許文献1参照)。

次の式は、Purcell効果による発光遷移割合  $W_{spon}$  と Q 値との関係を表す式である。

【数 3】

$$W_{spon} = 4 g_k^2 \frac{Q}{\omega_{cav}} \quad (1)$$

40

(但し、 $d_{21} \cdot e_{cav} = 0$ )

ここで、 $g_k$  は光共振器と発光体の結合定数、 $\omega_{cav}$  は光共振器の共振振動数、 $2$  は 2 準位電子系の振動数を示す。

また、光共振器と発光体の結合定数  $g_k$  は次の式で表される。

【数4】

$$g_k = \left| \frac{E_{\text{cav}}(r)}{E_{\text{cav,max}}} \right| \frac{e_{\text{cav}} \cdot d_{21}}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar \omega_{\text{cav}}}{2 n^2 \epsilon_0 V_{\text{eff}}}} \quad (2)$$

尚、 $E_{\text{cav}}(r)$ は光共振器中の電子系位置における電界、 $E_{\text{cav,max}}$ は共振モード電界の最大値、 $e_{\text{cav}}$ は電子系位置における偏光の単位ベクトル、 $n$ は電子系周囲の屈折率、 $d_{21}$ は電子系が有する電気双極子モーメント、 $V_{\text{eff}}$ は共振モードの有効モード体積を示す。

従って、式(1)及び式(2)から発光遷移割合 $W_{\text{spon}}$ は次の式(3)で表される。

10

【数5】

$$W_{\text{spon}} = 4 g_k^2 \frac{Q}{\omega_{\text{cav}}} = \left| \frac{E_{\text{cav}}(r)}{E_{\text{cav,max}}} \right|^2 \frac{2 |e_{\text{cav}} \cdot d_{21}|^2}{n^2 \hbar \epsilon_0} \frac{Q}{V_{\text{eff}}} \propto \frac{Q}{V_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式(3)より、発光遷移割合は $Q/V_{\text{eff}}$ に比例することが分かる。つまり、光共振器の $Q$ 値を大きくするほど、また、 $V_{\text{eff}}$ を小さくするほど、発光体は発光しやすくなる。

【特許文献1】特開2001-267682号公報

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

Purcell効果は共振器モードと発光体の結合の強さが弱い弱結合領域でのみ成り立つ。また、共振器モードと発光体の結合が強い強結合領域ではラビ(Rabi)振動が生じることが期待される。従って、弱結合領域や強結合領域における発光遷移割合は摂動近似から予想できるが、中間領域では摂動近似が破綻する。

本発明が解決しようとする課題は、微小光共振器と発光体の結合の強さに関係なく、微小光共振器に発光体を導入したときの発光遷移割合を最大化することができる発光素子を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0004】

上記課題を解決するために成された本発明は、微小光共振器に発光体を導入して成る発光素子であって、前記微小光共振器の光子寿命の2倍とラビ振動周期の半周期とが一致するように設定したことを特徴とする。

微小光共振器としては、スラブ状の母材に該母材とは屈折率の異なる異屈折率領域を周期的に設けて成るフォトニック結晶の前記異屈折率領域の周期的配列を点状に欠陥させることにより構成されたフォトニック結晶共振器を用いることができる。また、発光体としては、量子ドットを用いることができる。

【発明の効果】

40

【0005】

本発明によれば、微小光共振器に発光体を導入したことにより発光遷移割合が増大する効果を最大限に引き出すことができる。これにより、高効率光源、単一光子光源などの発光効率を最大化することができる。また、電子注入から光子放出までのタイミングジッターを最小化することができ、量子暗号通信や量子演算に利用する上で優れた単一光子光源を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0006】

本発明者は、光共振器と発光体との結合が弱い弱結合領域及び結合が強い強結合領域における発光は摂動近似を用いて求めることができるのに対して、中間結合領域では摂動近

50

似が破綻することから、摂動近似を用いず、環境系も含めてシュレディンガー方程式を解くことで、発光遷移割合及び発光の振動周波数を解析的に求め、この解析結果に基づき発光遷移割合を最大化するための条件を得た。

【 0 0 0 7 】

具体的には、図 1 に示す物理モデルから発光遷移割合及び振動周波数を解析的に求めた。この物理モデルでは、光共振器に 2 準位電子系を導入し、そのときの共振モードエネルギー、自由空間中の光子エネルギー（共振器から漏れる光子エネルギー）、光共振器以外に漏れるエネルギーを考えたものである。

発光遷移割合を求める式を次に示す。

【 数 6 】

$$(\text{遷移割合}) = \Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}} + \frac{\omega_{\text{cav}}}{2Q} - \text{Re} \left[ \sqrt{\left( \frac{\omega_{\text{cav}}}{2Q} - i\delta\omega_{21,\text{cav}} - (\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}}) \right)^2 - 4g_k^2} \right]$$

$$\text{但し、} \omega_{\text{cav}}/Q > 2\Gamma_{\text{spon}} + 2\Gamma_{\text{res}}$$

また、振動周波数を求める式を次に示す。

【 数 7 】

$$(\text{振動周波数}) = \text{Im} \left[ \sqrt{\left( \frac{\omega_{\text{cav}}}{2Q} - i\delta\omega_{21,\text{cav}} - (\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}}) \right)^2 - 4g_k^2} \right]$$

ここで、電子系位置の電界を  $E_{\text{cav}}(r)$ 、共振モード電界の最大値を  $E_{\text{cav,max}}$ 、共振モードの有効モード体積を  $V_{\text{eff}}$ 、電子系がもつ電気双極子モーメントを  $d_{21}$ 、発光体周囲の屈折率を  $n$ 、電子系位置における偏光の単位ベクトルを  $e_{\text{cav}}$  とすると結合定数  $g_k$  は次の式から求められる。

【 数 8 】

$$g_k = \left| \frac{E_{\text{cav}}(r)}{E_{\text{cav,max}}} \right| \frac{e_{\text{cav}} \cdot d_{21}}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar \omega_{\text{cav}}}{2 n^2 \epsilon_0 V_{\text{eff}}}}$$

【 0 0 0 8 】

図 2 は、 $\delta\omega_{21,\text{cav}} = 0$ 、かつ  $\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}} < 2g_k$  のときの、光共振器の  $Q$  値に対する発光遷移割合(実線)及び発光の振動周波数(一点鎖線)の解析結果を示している。尚、参考として、摂動論の Purcell 効果から予想される発光遷移割合を波線で示す。

【 0 0 0 9 】

$Q$  値の増大に伴い、発光遷移割合は  $(\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}})$  に漸近し、発光の振動周波数は  $\{ 4g_k^2 - (\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}})^2 \}^{1/2}$  に漸近する。そして、図 2 に示すように、 $Q$  値が小さい極限の弱結合領域では Purcell 効果が、 $Q$  値が大きい極限の強結合領域ではラビ振動が生じ、摂動近似と同一の結論が得られた。一方、中間領域では、発光遷移割合に極値(最大値：図 2 中、矢印で示す)が存在することが分かった。発光遷移割合が最大となるときの共振器の  $Q_0$  値は次の式で表される。

10

20

30

40

【数 9】

$$Q_0 = \frac{\omega_{\text{cav}}}{4g_k + 2(\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}})} \quad (4)$$

また、発光遷移割合の最大値  $M$  は次の式で表される。

【数 10】

$$\Gamma_M = 2g_k + 2(\Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}}) \quad (5)$$

10

従って、Q 値が上記式 (4) を満たすように光共振器を設計することにより、発光遷移割合を最大化することができる。

【0010】

特に、共振器以外に漏れるエネルギー ( $2\Gamma_{\text{spon}} + 2\Gamma_{\text{res}}$ ) を 0 とすると、共振器の Q 値は次の式で表される。

【数 11】

$$Q = \omega_{\text{cav}} / 4g_k \quad (6)$$

20

ラビ振動の振動数  $\Omega_{\text{Rabi}}$  及び 1 周期  $T_{\text{Rabi}}$  と結合定数  $g_k$  との間には次の関係がある。

【数 12】

$$\Omega_{\text{Rabi}} = 2g_k = \frac{2\pi}{T_{\text{Rabi}}} \quad (7)$$

また、共振器の光子寿命  $\tau_{\text{ph}}$  と共振器の Q 値及び振動数  $\omega_{\text{cav}}$  との間には次の関係がある。

30

【数 13】

$$\tau_{\text{ph}} = \frac{Q}{\omega_{\text{cav}}} \quad (8)$$

式 (6) ~ (8) より、共振器の光子寿命  $\tau_{\text{ph}}$  とラビ振動の 1 周期  $T_{\text{Rabi}}$  との間には次の関係式が成り立つ。

【数 14】

$$\frac{T_{\text{Rabi}}}{2} = 2\pi\tau_{\text{ph}}$$

40

つまり、ラビ振動の半周期が光共振器の光子寿命の 2 倍と一致するように光共振器を設定すれば、発光遷移割合を最大化することができる。

【実施例】

【0011】

図 3 は、2 次元フォトリック結晶共振器に発光体としての量子ドットを導入したときの解析結果を示す。2 次元フォトリック結晶共振器は、三角格子状に周期的に配置された多

50

数の異屈折率領域を有する2次元フォトニック結晶に、3個の異屈折率領域を欠損させることにより点状欠陥を形成したものであり、前記点状欠陥に量子ドットを導入した。

2次元フォトニック結晶共振器及び量子ドットについての各条件は次のように設定した。

- フォトニック結晶の母材の屈折率： $n = 3.4$
- 自然放出割合： $2\Gamma_{\text{spon}} = 1 / 17.0 [1/\text{nsec}]$
- 非発光割合： $2\Gamma_{\text{res}} = 0.0 [1/\text{nsec}]$
- 量子ドットの電気双極子モーメント：  
【数15】

$$d_{21} = 7.5 [\text{e}\text{\AA}]$$

10

共振モードの有効モード体積： $V_{\text{eff}} = 0.67 (\lambda/n)^3$

2準位のエネルギー差： $\omega_{21} = 1.64 \times 10^{15} [\text{rad}/\text{sec}]$

上記条件のときの結合定数  $g_k$  は、 $1.99 \times 10^2 [1/\text{nsec}]$  であり、発光遷移割合が最大値となる  $Q$  値は  $Q_0 = 2060$  であった。

尚、本発明は、2次元フォトニック結晶共振器以外の例えばマイクロピラー、マイクロディスク等の微小光共振器に発光体を導入して成る発光素子に適用可能である。また、発光体としては、量子ドット以外に量子井戸、色素分子、ランタン系原子等がある。

20

【図面の簡単な説明】

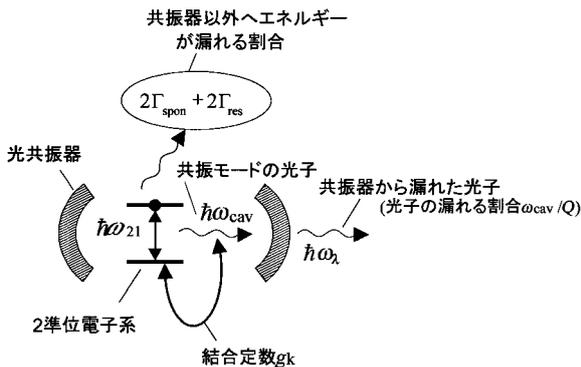
【0012】

【図1】本発明の発光素子の物理モデルを示す図

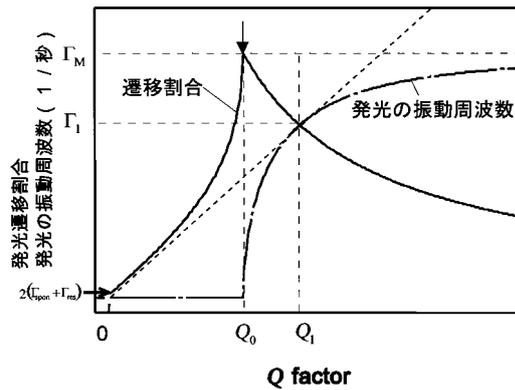
【図2】発光遷移割合及び発光の振動周波数と共振器のQ値の関係を示す解析結果

【図3】2次元フォトニック結晶の点状欠陥に量子ドットを導入したときの発光遷移割合及び発光の振動周波数と共振器のQ値の関係を示す解析結果

【図1】



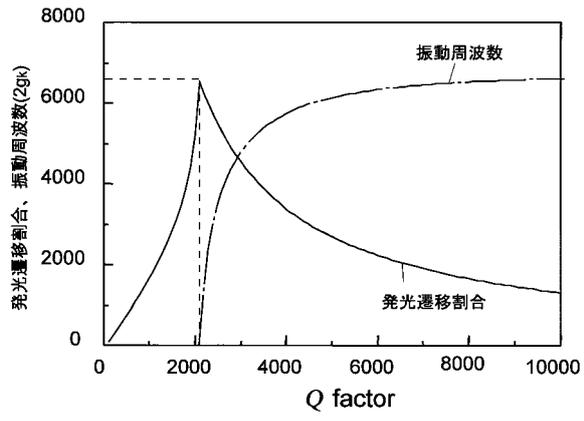
【図2】



- $Q$  : 共振器のQ値
- $\hbar\omega_{21}$  : 2準位電子系のエネルギー差
- $\hbar\omega_{\text{cav}}$  : 共振モードエネルギー
- $\hbar\omega_{\lambda}$  : 自由空間中の光子エネルギー
- $2\Gamma_{\text{res}}$  : 非発光割合
- $2\Gamma_{\text{spon}}$  : 自然放出割合

$$\delta\omega_{21,\text{cav}} = \omega_{21} - \omega_{\text{cav}} = 0 \quad \text{かつ} \quad \Gamma_{\text{spon}} + \Gamma_{\text{res}} < 2g_k \quad \text{のとき}$$

【 図 3 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 浅野 卓

京都市西京区川島五反長町65の3 桂第二合同宿舎2-108号

審査官 傍島 正朗

(56)参考文献 特表2008-513988(JP,A)

特開2008-135591(JP,A)

特開2001-267682(JP,A)

特表2004-529387(JP,A)

特開2003-298153(JP,A)

特開2004-006567(JP,A)

国際公開第06/095648(WO,A1)

国際公開第06/103850(WO,A1)

特開平03-291985(JP,A)

山口 真 M Yamaguchi, 2次元フォトリック結晶ナノ共振器を用いた発光制御についての考察, 応用物理学関係連合講演会講演予稿集2007春3 Extended Abstracts (The 54th Spring Meeting, 2007);The Japan Society of Applied Physics and Related Societies No.3, (社) 応用物理学学会

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00 - 5/50

Science Direct

IEEE Xplore

CiNii

JSTPlus(JDreamII)