(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2013 年 2 月 7 日(07.02.2013)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2013/018583 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 33/34 (2010.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2012/068684

(22) 国際出願日: 2012 年 7 月 24 日(24.07.2012)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2011-167423 2011 年 7 月 29 日(29.07.2011) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人大阪大学(OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 Osaka (JP). 独立行政法人産業技術総合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関１丁目３番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 水落 憲和(MIZUOCHI Norikazu) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 山崎 聡(YAMASAKI Satoshi) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園１－１－１ 中央第２ 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 牧野 俊晴(MAKINO Toshiharu) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園１－１－１ 中央第２ 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 加藤 宙光(KATO Hiromitsu) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園１－１－１ 中央第２ 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 竹内 大輔(TAKEUCHI Daisuke) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園１－１－１ 中央第２ 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 小倉 政彦(OGURA Masahiko) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園１－１－１ 中央第２ 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).

(74) 代理人: 前井 宏之(MAEI Hiroyuki); 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜２丁目５番２３号小寺プラザ６階 Osaka (JP).

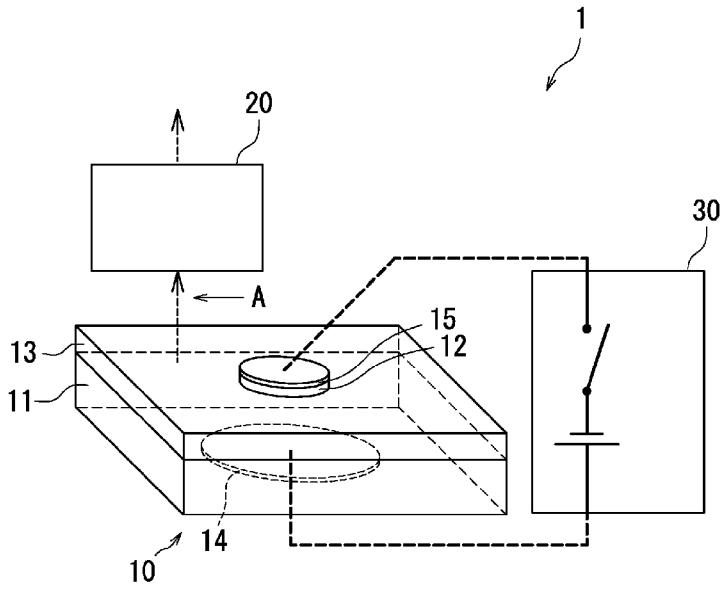
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST,

[続葉有]

(54) **Title**: PHOTON OUTPUT DEVICE, PHOTON OUTPUT METHOD, AND METHOD FOR MANUFACTURING SEMICONDUCTOR USED IN PHOTON OUTPUT DEVICE

(54) 発明の名称 : 光子出力装置、光子出力方法、及び光子出力装置に用いる半導体の製造方法

[図1]



(57) **Abstract**: A photon output device according to the present invention is provided with a light-emitting element (10) including a PIN semiconductor comprising a p-type diamond layer (11), an n-type diamond layer (12), and an i-type diamond layer (13) laminated between the p-type diamond layer (11) and the n-type diamond layer (12); and an optical element (20) that transmits photons generated in the i-type diamond layer. Preferably, the optical element (20) transmits photons generated at a specified position in the i-type diamond layer (13) and cuts off photons generated at other positions in the i-type diamond layer (13) and photons generated in the p-type diamond layer (11) and the n-type diamond layer (12).

(57) 要約: 本発明による光子出力装置は、ｐ型ダイヤモンド層１１、ｎ型ダイヤモンド層１２、及びｐ型ダイヤモンド層１１とｎ型ダイヤモンド層１２との間に積層されたｉ型ダイヤモンド層１３からなるＰＩＮ構造の半導体を含む発光素子１０と、ｉ型ダイヤモンド層内において発生した光子を通過させる光学素子２０とを備える。光学素子２０は、ｉ型ダイヤモンド層１３の所定の位置において発生した光子を通過させ、ｉ型ダイヤモンド層１３の別の位置、ｐ型ダイヤモンド層１１およびｎ型ダイヤモンド層１２において発生した光子をカットすることが好ましい。

WO 2013/018583 A1

SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

明　細　書

発明の名称 ：

光子出力装置、光子出力方法、及び光子出力装置に用いる半導体の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、光子出力装置に関し、特に、量子暗号通信等において利用される単一光子を、効率良く生成し出力するための技術に関する。

背景技術

[0002] 近年、デジタル通信による送金や電子商取引等の普及に伴い、通信される重要な情報を第三者による盗聴や改竄から守る、安全性を向上させる為の技術への要求が高まっている。安全性を向上させる為の有効な技術の１つに暗号（ｃｒｙｐｔｏｇｒａｐｈｙ）がある。暗号方式には、主に公開鍵暗号方式と秘密鍵暗号方式とがある。これらの詳細は、池野信一、小山謙二著「現代暗号理論」（電子情報通信学会）に記載がある。公開鍵暗号方式では、送信側が公開鍵を保持し、公開鍵を用いて機密情報を暗号化し、受信側が秘密鍵を保持し、秘密鍵を用いて機密情報を復号する。

[0003] 公開鍵暗号方式の公開鍵と秘密鍵とを更新するには、通常、受信側のそれぞれが公開鍵と秘密鍵との鍵ペアを生成して、公開鍵を送信側へ普通に送る。秘密鍵は送る必要がないので伝達時に第三者に知られる心配はなく、公開鍵は第三者に知られても機密情報が復号される事はないと考えられているので、鍵伝達時の機密管理が不要である。また公開鍵は保存時においても機密に管理する必要がないので、配信側の負担が小さい。

[0004] 公開暗号鍵方式の安全性は、暗号化鍵から復号化鍵を生成することが容易でないという数学的な理論に基づいて担保されている。一般的に用いられているＲＳＡ暗号方式において暗号化鍵から復号化鍵を求めるためには、暗号化鍵である非常に大きな整数を素因数分解するという非常に難解な演算を行わなければならない。例えば最新のスーパーコンピュータを用いてこの演算

を行ったとしても、非現実的な時間を要するため、暗号化鍵から復号化鍵を生成することは実質的に不可能であると考えられている。

[0005] しかしながら、大きな整数の素因数分解を比較的短時間で行うことができるような高性能なコンピュータが今後登場すれば、暗号化鍵から復号化鍵を生成することが可能になるので、将来的に公開暗号鍵方式は使用できなくなってしまうかもしれない。

[0006] 一方、秘密鍵暗号方式では、送信側と受信側とが同一の共通鍵を秘密に保持し、送信側が共通鍵を用いて機密情報を暗号化し、受信側が共通鍵を用いて機密情報を復号する。秘密鍵暗号方式の共通鍵を更新するには、例えば送信側か受信側かのいずれか一方で新しい共通鍵を生成して、他方に新しい共通鍵を秘密に伝達しなければならない。新しい共通鍵が第三者に知られると機密情報が復号されて第三者に知られてしまうので、鍵伝達時の機密管理を徹底しなければならない。

[0007] なお安全対策上、暗号化や復号に用いる鍵は、定期的、或いは必要に応じて頻繁に更新することが望ましい。また暗号化前の機密情報と長さが同じ秘密鍵を１回で使い捨てるＶｅｒｎａｍ暗号という暗号方式は、理論的に絶対に安全であることが理論的に証明されている。

[0008] そこで、この共通鍵を秘密に伝達する手段として、量子暗号通信に対する期待が高まっている。量子暗号通信では、単一光子の量子状態の１つに情報を与え、単一光子を伝送媒体として伝送する。光子の量子状態には、光子の偏光（光の波の向き）、位相、スピンなどの様々な種類がある。

[0009] 観測者が単一光子の量子状態の１つを測定すると必ず他の量子状態に影響を及ぼすという量子力学的な原理があるので、量子暗号通信において第三者によって盗聴が行われた場合には、盗聴が行われた可能性がある事を、正規の通信者達が知ることができると考えられている。よって盗聴が行われた可能性があるときには伝達された共通鍵を破棄し、盗聴が行われた可能性がないときに伝達された共通鍵のみを用いて暗号化通信を行えば、通信の安全性が確保される。

[0010] 以下に量子暗号通信の原理の概要について説明する。

[0011] まず送信者は、１ビットの情報を送ろうとする度に、Ａという種類の量子状態を用いて送信するかＢという種類の量子状態を用いて送信するかをランダムに決め、選択した種類の量子状態が、送ろうとする１ビットの情報に対応する状態である単一光子を送信する。このとき同一の単一光子において、選択しなかった方の種類の量子状態は、量子力学的な原理により不確定であり、どういう状態なのかを量子状態を変えずに知ることができない。

[0012] 受信者は、送られてきた単一光子について、Ａという種類の量子状態を測定するかＢという種類の量子状態を測定するかをランダムに決め、選択した種類の量子状態を測定して１ビットの情報を得る。このとき選択した種類の量子状態を測定すると、他の量子状態が変わってしまうので、選択しなかった方の種類の量子状態を正しく知ることはできない。

[0013] その後、送信者と受信者とが同じ選択をしたか否かの答え合わせを行い、同じ選択をした場合には得られた情報を有効な情報として保持し、同じ選択をしていなかった場合には得られた情報を破棄する。このような１ビット毎の通信を繰り返すことで、所定量の情報の通信を行うことができる。ここで、盗聴者がいない場合には情報は正しく通信される。

[0014] ところが、盗聴者がいる場合には、盗聴者が盗聴することにより単一光子の量子状態が変化して、一定確率で情報に間違いが生じる。

[0015] 盗聴者は盗聴する時点で、送信者が選択した量子状態の種類を知ることができないので、受信者と同様にＡという種類の量子状態を測定するかＢという種類の量子状態を測定するかをランダムに決め、選択した種類の量子状態を測定して１ビットの情報を得ることになる。ここで、たまたま盗聴者が送信者と同じ選択をした場合には、盗聴者は正しい情報を得ることができ、かつ、選択した種類の量子状態を同じ状態にした単一光子を送信し直せば、盗聴していることを正規の通信者達に知られることはない。

[0016] ところが、偶然に送信者と同じ選択をし続けることは到底不可能であり、通常５０％の確率で受信者と異なる選択をすることになる。盗聴者が受信者

と異なる選択をした場合には、異なる選択をした５０％のうちのさらに５０％（合わせて２５％）が間違った情報となる。ここで、単一光子を送信し直しても、５０％の確率で、間違った情報に対応する状態である単一光子を送信してしまう。このような単一光子は、さらに受信者が送信者と同じ選択をした場合に間違った情報を受信者に与えることになる。従って、盗聴者は、送信者が送ろうとした情報を全部盗聴しても、そのうちの２５％は間違った情報である上に、盗聴することによって、正規の受信者が受信する情報のうちの２５％を間違った情報に変えてしまう。

[0017] よって、送信者と受信者とが、所定量の情報の通信を行った後に、ランダムにいくつかのビットを抜き出して、正しい情報が送信されているか否かを確認すれば、１００％正しいと確認された場合には盗聴が行われた可能性がないとわかるので、安心してこのときに受信した情報を共通鍵として用いることができる。

[0018] ここで量子暗号通信には、単一光子を繰り返し出力することができる光子出力装置が不可欠である。例えば、従来の単一光子を生成させる方法としては、量子ドットに短波長の光を照射する光励起による第１の方法（例えば、特許文献１）や、半導体のｐ－ｎ接合を利用して量子ドットに電気的に電荷を注入し、電子と正孔を再結合させることによって単一光子を発生させる第２の方法（例えば、特許文献２）等がある。また、本願の発明と関連が深い発光素子に関する技術が特許文献３に開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0019] 特許文献1：特開２００４－２５３６５７号公報

特許文献2：ＷＯ２０１１００９４６５

特許文献3：特開２００８－０７８６１１号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0020] しかしながら、上記第１の方法では、高品質の単一光子を発生させるために励起パルス光の波長を正確に調整しなければならないので、高価な光源装置が必要であり装置規模が大きくなりコストが高くなる。

[0021] また上記第２の方法では、不必要な波長の発光が混在するなどの不具合が発生しやすく、高品質の単一光子を得ることが難しい。また電気的に電荷を注入による方法では、本願の発明者が知る限り室温で動作した例がなく、別途冷却設備が必要であり、第１の方法と同様に装置規模が大きくなりコストが高くなる。

[0022] 以上のように、単一光子を効率良く生成するための技術は未だ確立しておらず、新しい技術の開発が望まれている。そこで、本発明は、光源装置や冷却設備を必要とせず、単一光子を効率良く生成し出力することができる光子出力装置、光子出力方法、及び光子出力装置に用いる半導体の製造方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0023] 本発明による光子出力装置は、ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に設けられたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体を含む発光素子と、前記ｉ型ダイヤモンド層内において発生した光子を通過させる光学素子とを備える。

[0024] ある実施形態において、前記光学素子は、前記ｉ型ダイヤモンド層の所定の位置において発生した光子を通過させ、前記ｉ型ダイヤモンド層の別の位置、前記ｐ型ダイヤモンド層および前記ｎ型ダイヤモンド層において発生した光子をカットする。

[0025] ある実施形態において、前記光子出力装置は、前記ＰＩＮ構造の半導体に電圧を印加して、前記発光素子に電流を注入する電流注入部をさらに備える。

[0026] ある実施形態において、前記ｉ型ダイヤモンド層内に、窒素と空孔とが隣接する窒素－空孔複合体欠陥中心が形成されている。

[0027] ある実施形態において、前記ｉ型ダイヤモンド層内に、窒素がイオン注入されている。

[0028] ある実施形態において、前記光学素子は、対物レンズと、当該対物レンズの焦点付近に配置されたピンホールとを含む。

[0029] ある実施形態において、前記光学素子は、外部へ単一光子を出力する。

[0030] ある実施形態において、前記ｉ型ダイヤモンド層における不純物の濃度は０．１ｐｐｂ以下である。

[0031] ある実施形態において、前記ｉ型ダイヤモンド層の主面は、前記ｐ型ダイヤモンド層、及び、前記ｎ型ダイヤモンド層のうちの少なくとも一方の層の主面よりも小さく、前記ｉ型ダイヤモンド層の主面には、外気に対して露出している領域があり、前記光学素子は、前記外気に対して露出している領域内を通過した光子を外部へ出力する。

[0032] ある実施形態において、前記ｉ型ダイヤモンド層の前記外気に対して露出している領域がクリーニングされている。

[0033] ある実施形態では、前記発光素子において、前記ｐ型ダイヤモンド層となる材料基板の表面に、前記ｉ型ダイヤモンド層が積層され、前記ｉ型ダイヤモンド層の上の一部に前記ｎ型ダイヤモンド層が積層され、前記ｎ型ダイヤモンド層の上に電極が形成されており、前記外気に対して露出している領域は、前記ｉ型ダイヤモンド層の上に前記ｎ型ダイヤモンド層が積層されていない部分に相当し、当該外気に対して露出している領域が、前記電極の形成後に、異なる複数の方法で段階的にクリーニングされている。

[0034] ある実施形態において、前記光子出力装置は、室温において動作する。

[0035] 本発明による光子出力方法は、ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に積層されたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体を含む発光素子を用意する用意ステップと、前記発光素子を発光させる発光ステップと、前記発光ステップにて前記ｉ型ダイヤモンド層内において発生した光子を光学素子に通過させる光子通過ステップとを包含する。

[0036] ある実施形態において、前記発光ステップは、前記ＰＩＮ構造の半導体に電圧を印加して、前記発光素子に電流を注入するステップを含む。

[0037] 本発明による半導体の製造方法は、ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に積層されたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体の製造方法であって、前記ｉ型ダイヤモンド層内に窒素をイオン注入する注入ステップを含む。

発明の効果

[0038] 本発明によれば、発光素子をＰＩＮ構造の半導体にすることで、半導体の特性を生かして電流注入を容易に行うことができるのと同時に、非常に光るものを少なくしたようなきれいな膜であるｉ型ダイヤモンド層からの発光を見るような仕組みにすることによって、１個の不純物等から発生する光子のみを比較的容易に出力することができるという優れた効果を有する。

図面の簡単な説明

[0039] [図1]本実施の形態の光子出力装置１の概略構成を示す図である。

[図2]本実施の形態における光学素子２０の一例の概略を示す図である。

[図3]本実施の形態における光学素子２０の別の例の概略を示す図である。

[図4]（ａ）は比較例の光子出力装置における発光素子からの発光を示す図であり、（ｂ）は（ａ）の一部拡大図である。

[図5]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図6]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図7]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図8]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図9]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図10]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図11]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図12]発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。

[図13]（ａ）は本実施の形態の光子出力装置の光励起による発光を示す図で

あり、（ｂ）は本実施の形態の光子出力装置の電流注入による発光を示す図である。

[図14]本実施の形態における発光素子１０を評価した際の評価システムの概略を示す図である。

[図15]（ａ）は光励起で発光した本実施の形態の光子出力装置におけるアンチバンチングを示すグラフであり、（ｂ）は電流注入で発光した本実施の形態の光子出力装置におけるアンチバンチングを示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0040] （実施の形態）

＜概要＞

実施の形態は、ＰＩＮ構造の半導体の特性を生かして電流を注入することにより、世界で初めて、室温において、電流注入によりｉ型ダイヤモンド層から単一光子を出力させることを可能にした光子出力装置である。

[0041] ＜構成＞

図１は、本実施の形態の光子出力装置１の概要を示す図である。図１に示すように、本実施の形態の光子出力装置１は、光子を出力するシステムであり、発光素子１０、光学素子２０、及び電流注入部３０を備える。発光素子１０は、ｐ型ダイヤモンド層１１、ｎ型ダイヤモンド層１２、及びｐ型ダイヤモンド層１１とｎ型ダイヤモンド層１２との間に設けられたｉ型ダイヤモンド層１３の３層からなるＰＩＮ構造の半導体を含む。

[0042] ｐ型ダイヤモンド層１１は、ダイヤモンドにｐ型のドーパントがドープされた半導体層である。例えば、ｐ型ダイヤモンド層１１は、１立法センチあたり１０の２０乗個程度のほう素（元素記号Ｂ）が添加されたダイヤモンド基板を元に形成される。

[0043] ｎ型ダイヤモンド層１２は、ダイヤモンドにｎ型のドーパントがドープされた半導体層である。例えばｎ型ダイヤモンド層１２は、膜厚が５００ｎｍ程度であり、１立法センチあたり１０の１８乗個程度のリン（元素記号Ｐ）が添加されている。

[0044] ｉ型ダイヤモンド層１３は、ｐ型やｎ型のドーパントをほとんど含有していないほぼノンドープの状態であるダイヤモンドからなる真性半導体層である。例えば、ｉ型ダイヤモンド層１３は、膜厚が１０μｍ程度であり、不純物の濃度が０．１ｐｐｂ（パーツ・パー・ビリオン、ｐａｒｔｓ　ｐｅｒ　ｂｉｌｌｉｏｎ、１０億分の１）以下に抑えられている。また微量の窒素（元素記号Ｎ）が意図的に、ｎ型ダイヤモンド層１２側の主面側（図１における上側の面）からイオン注入され、その後にイオン注入された窒素と空孔とを結合させるためにアニーリングされている。

[0045] また本実施の形態では、ｎ型ダイヤモンド層１２の主面がｉ型ダイヤモンド層１３の主面よりも小さく、ｉ型ダイヤモンド層１３の主面の一部の領域が外気に対して露出している。このようにｉ型ダイヤモンド層１３の主面の一部の領域が外気に対して露出している理由は、ｉ型ダイヤモンド層１３内の所定の位置から発生する光子（図１中矢印Ａ）を外部へ出力する際に、この外気に対して露出している領域内を通過した光子を外部へ出力することにより、光子を取り出し易くするためである。

[0046] ここで、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置とは、窒素と空孔とが分子構造レベルで隣接する、窒素－空孔複合体欠陥中心（ｎｉｔｒｏｇｅｎ　ｖａｃａｎｃｙ　ｃｅｎｔｅｒ、以下「ＮＶ中心」と記す）が形成されているいくつかの地点の１つを、製造段階で任意に選択したものである。本実施の形態では、ｉ型ダイヤモンド層１３が外気に対して露出した領域内の何れかの位置の直下に存在するＮＶ中心を、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置として選択している。

[0047] ここでｉ型ダイヤモンド層１３における不純物の濃度を０．１ｐｐｂ以下に抑えている理由は、単一光子発生源から発生する光子を１個１個見るためには、隣り合う単一光子発生源同士の間隔を３００ｎｍ程度以上にする必要があると考えられるので、これから逆算をして濃度を出すと、不純物の濃度が０．１ｐｐｂ程度になるからである。従って、ｉ型ダイヤモンド層１３では単一光子発生源同士の間隔の平均が３００ｎｍ以上離れており、単一光子

発生源から発生する光子を１個１個見ることが可能な状態になっている。

[0048] ちなみに、半導体中の不純物の濃度を０．１ｐｐｂ以下にすることが可能なのは、現在の技術ではシリコンとダイヤモンドくらいしかなく、化合物半導体では不可能である。また、ｐ型ダイヤモンド層１１、及びダイヤモンド層１２では、ｉ型ダイヤモンド層１３に比べると不純物の濃度が桁違いに高いので高い濃度で様々な発光中心が存在し、いたる所が光っているような状態になっており、ｉ型ダイヤモンド層１３のように単一光子発生源から発生する光子を１個１個見ることは不可能だと思われる。

[0049] なお、本実施の形態では、製造の容易さからｎ型ダイヤモンド層１２の主面をｉ型ダイヤモンド層１３の主面よりも小さくしているが、ｎ型ダイヤモンド層１２ではなくｐ型ダイヤモンド層１１の主面をｉ型ダイヤモンド層１３の主面よりも小さくしてもよい。要は、ｐ型ダイヤモンド層１１とｎ型ダイヤモンド層１２のうちの少なくとも一方の層の主面をｉ型ダイヤモンド層の主面よりも小さくし、ｉ型ダイヤモンド層１３の少なくとも一方の主面の一部の領域を、外気に対して露出させればよい。

[0050] また、本実施の形態ではＰＩＮ構造を出射方向に対して縦方向に積んで、ｉ型ダイヤモンド層１３の主面から光子を外部へ出力しているが、ＰＩＮ構造を出射方向に対して横方向に積んで、ｉ型ダイヤモンド層の断面から光子を外部へ出力してもよい。

[0051] 発光素子１０は、さらに、ｐ型ダイヤモンド層１１におけるｉ型ダイヤモンド層１３と接していない側の主面（図１におけるｐ型ダイヤモンド層１１の下側の面）の一部に形成された電極１４と、ｎ型ダイヤモンド層１２におけるｉ型ダイヤモンド層１３と接していない側の主面（図１におけるｎ型ダイヤモンド層１２の上側の面）の全面に形成された電極１５を含む。なお、図１では、図面が過度に複雑になることを避けるために、１つの発光素子１０に、電極１４および電極１５が１つずつ設けられているが、電極１４および／または電極１５は、必要に応じて複数設けられてもよい。

[0052] 電極１４、及び電極１５はそれぞれ、ワイヤーボンディング等により電気

的に接続することを容易にするために設けられた金属皮膜であり、電極１４と電極１５との間に電圧を印加すれば、発光素子１０におけるＰＩＮ構造の半導体に電圧を印加することができる。例えば、電極１４は半径４００μｍの円形パターンであり、電極１５は半径２００μｍの円形パターンであり、それぞれ下層から順に、チタン３０ｎｍ、白金３０ｎｍ、及び金１００ｎｍの３層からなる。

[0053] ここで電極１４、及び電極１５において、最下層をチタンにしたのはダイヤモンドとのコンタクト性がよいからであり、この上にチタンの酸化を防止するために白金を積層し、さらに、ワイヤーボンディング性をよくするために金を積層している。なお、電極１４、及び電極１５は、電気的な信頼性を向上させるため、及び加工を容易にするために設けられたものであるので、必ずしも必要な構成ではない。

[0054] また、発光素子１０の製造方法については別途下記に記載する。

[0055] 光学素子２０は、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置において発生した光子を通過させる。このように、発光素子１０から出た光子は光学素子２０を通過して光子出力装置１の外部に出力される。このため、このような光学素子２０は出力部とも呼ばれる。

[0056] 図２は、本実施の形態における光学素子２０の一例の概略を示す図である。図２に示すように光学素子２０は、対物レンズ２１、及び対物レンズ２１の焦点付近に配置されたピンホール２２を含み、共焦点レーザ顕微鏡と同様の原理を用いて、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置を含む３次元的に狭小な領域から発せられる光子（図２中矢印Ａ）を、選択的に外部へ出力するように調整されている。例えば、ここでは、視野方向が３５０ｎｍくらいの円状、かつ深さ方向が１μｍくらいの領域しか見えないようにしており、この領域外から光が入ったとしても、ピンホール２２の開口部分とは違う位置に焦点を結ぶので、ピンホール２２に遮られて排除され、この領域から発せられた光しか通過しない。このため、ｉ型ダイヤモンド層１３の特定の領域において発生した光子を高い分解能で外部に出力させることができる

。

[0057] なお、図２に示した光学素子２０は、対物レンズ２１及びピンホール２２を含んでいたが、本実施の形態はこれに限定されない。ｉ型ダイヤモンド層１３内のＮＶ中心間の間隔が比較的大きい場合、光学素子２０はピンホールを含むことなく、対物レンズ２１を含んでいてもよい。

[0058] あるいは、対物レンズ２１、及びピンホール２２の代わりに、伝送用の光ファイバーを、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置に最も近いｉ型ダイヤモンド層１３の表面に光学的に直接接続してもよい。図３に、光学素子２０として光ファイバー２３を用いた構成の概略図を示す。光ファイバー２３は、コア２３ａと、コア２３ａを囲むクラッド２３ｂとを有している。ｉ型ダイヤモンド層１３の発光中心において発生した光子はコア２３ａ内を伝搬する。

[0059] なおこのような接続方法は、ｉ型ダイヤモンド層１３内の比較的外気に近い浅い地点から発生する光子を出力させる場合に特に有効である。光ファイバー２３は、コア２３ａの径および／またはｉ型ダイヤモンド層１３と光ファイバー２３との距離を調整することにより、光ファイバー２３を通過可能な光子の発生する領域の範囲を制御することができる。

[0060] このように、光学素子２０は、ｐ型ダイヤモンド層１１およびｎ型ダイヤモンド層１２を介することなくｉ型ダイヤモンド層１３の露出した部分と対向している。このため、光学素子２０は、ｉ型ダイヤモンド層１３の所定の位置において発生した光子を通過させ、ｉ型ダイヤモンド層１３の別の位置、ｐ型ダイヤモンド層１１およびｎ型ダイヤモンド層１２において発生した光子をカットできる。

[0061] 電流注入部３０は、電極１４と電極１５との間に電圧を印加して、発光素子１０に電流を注入する電流源である。電流注入部３０により、室温において適宜電流が注入されることにより、ｉ型ダイヤモンド層１３内の上記所定の位置から光子が発生する。例えば電流注入部３０は、発光素子１０に１～２０ｍＡ程度の順電流を注入する。

[0062] なお、他の一般の装置において電源部分を自装置外に備えることは珍しくないので、本実施の形態の光子出力装置１においても電流注入部３０を自装置外に備えることとし、発光素子１０と光学素子２０からなる構成にしてもよい。

[0063] ここで、比較例の光子出力装置と比較して本実施の形態における光子出力装置１の利点を説明する。比較例の光子出力装置は発光素子および電流注入部を有しているものの、光学素子を有していない。詳細を省略するが、比較例の光子出力装置における発光素子は、ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及びｐ型ダイヤモンド層とｎ型ダイヤモンド層との間に設けられたｉ型ダイヤモンド層の３層からなるＰＩＮ構造の半導体を有している。

[0064] 以下に、図４を参照して、比較例の光子出力装置における発光素子からの発光を説明する。図４（ａ）は比較例の光子出力装置における発光素子からの発光を示す図であり、図４（ｂ）は図４（ａ）の一部拡大図である。この光子出力装置では、２箇所に電極が設けられており、図４（ａ）および図４（ｂ）から、２つの電極の近傍において発光していることが理解される。

[0065] 上述したように、ｉ型ダイヤモンド層ではＮＶ中心から発光するが、ｐ型ダイヤモンド層およびｎ型ダイヤモンド層ではドープされている不純物を発光中心として発光する。このため、ｐ型ダイヤモンド層およびｎ型ダイヤモンド層の発光中心の濃度はｉ型ダイヤモンド層からの発光中心の濃度よりも数桁以上多い。したがって、発光素子からの発光はｉ型ダイヤモンド層からの発光成分を含んでいるが、この発光のほとんどの成分がｐ型ダイヤモンド層およびｎ型ダイヤモンド層からの発光である。これに対して、本実施の形態の光子出力装置１は、発光素子１０のｉ型ダイヤモンド層１３において発生した光子を光学素子２０に通過させるため、高い空間分解能で光子を外部に出力させることができる。

[0066] ＜製造方法＞

図５～図１２は、発光素子１０の製造方法の概略を示す図である。以下に図５～図１２を用いて、発光素子１０の製造方法について、順を追って説明

する。

[0067] （１）図５に示すように、ｐ型ダイヤモンド層１１の元になるｐ型ダイヤモンド基板１０１を準備して、ＣＶＤ装置（Ｃｈｅｍｉｃａｌ Ｖａｐｏｒ Ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ ｓｙｓｔｅｍ）１００にセットする。ｐ型ダイヤモンド基板１０１は、最終的に図１に示したｐ型ダイヤモンド層１１になる。

[0068] 本実施の形態では、高温高圧法（ＨＰＨＴ：Ｈｉｇｈ Ｐｒｅｓｓｕｒｅ Ｈｉｇｈ Ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ Ｔｒｅａｔｍｅｎｔ）により合成された、一般に販売されているｐ型ダイヤモンド（ロシアのＴＩＳＮＣＭ研究所製）を購入してこれを使用した。また本実施の形態で用いたＣＶＤ装置１００は、日本のセキテクノトロン株式会社から販売されているＡＳＴｅＸ（アステックス）社製のマイクロ波プラズマＣＶＤ装置であり、同型のＣＶＤ装置、又は同等の機能を持つ他のＣＶＤ装置を購入して、本実施の形態と同様の特性になるように調整するか、あるいは同様の条件を用いれば、誰でも発光素子１０を製造することが可能である。

[0069] （２）図６に示すように、ＣＶＤ装置１００を用いて、メタンガス（CH_4）と水素ガス（H_2）とをＣＶＤ反応室に供給し、化学気相堆積によってｉ型ダイヤモンド１０３を、ｐ型ダイヤモンド基板１０１の表面全体に厚さを管理して１０μｍ程度まで積層する。

[0070] （３）図７に示すように、ＣＶＤ装置１００を用いて、メタンガスと水素ガスに、さらに微量のホスフィン（ｐｈｏｓｐｈｉｎｅ、PH_3）を混ぜてＣＶＤ反応室に供給し、化学気相堆積によってｎ型ダイヤモンド１０２を、ｉ型ダイヤモンド１０３の層の表面全体に厚さを管理して５００ｎｍ程度まで積層する。

[0071] （４）図８に示すように、ｎ型ダイヤモンド１０２を積層したものをＣＶＤ装置１００から取り出し、ｎ型ダイヤモンド１０２の層の一部を酸素ガスによるドライエッチングで抜いて、ｉ型ダイヤモンド１０３の層の一部の領域を外気に対して露出させる。本実施の形態では、２００ミクロンの直径の

円を残して、その周りのｎ型ダイヤモンド１０２の層を除去して、図１に示したｎ型ダイヤモンド層１２が形成される。

[0072] （５）図９に示すように、ｉ型ダイヤモンド１０３の層の外気に対して露出している領域は、ｎ型ダイヤモンド１０２の層の一部をドライエッチングで抜いた部分に相当し、この領域に窒素をイオン注入する。ここでｉ型ダイヤモンドに窒素をイオン注入すると、付随して空孔もいっしょにできる。例えばこの外気に対して露出している領域に、１平方センチあたり１０の９乗個程度の窒素を１８０ｋｅＶでイオン注入する。

[0073] なお、ここでは、選択的に上記外気に対して露出している領域だけにイオン注入しているわけではなく、イオン注入に際して特にｎ型ダイヤモンド層１２にマスクをかけるようなことはしていないので、ｎ型ダイヤモンド層１２にも同時に窒素がイオン注入されてしまう。しかしながら、ここで注入する窒素の量はｎ型ダイヤモンド層１２にドープしたドーパントの量に比べて極めて微量なので、ｎ型ダイヤモンド層１２の特性は窒素がイオン注入されてもほとんど変わることはないと考えられる。また、窒素をイオン注入する位置を空間的に制御することにより、ＮＶ中心が形成される位置を格子状等のように任意に配置することも可能である。

[0074] （６）図１０に示すように、窒素と空孔とを結合させるためにアニーリングする。空孔は６００℃くらいで動くということが知られている。また窒素と空孔とが結合すると安定した状態になる。そこで窒素をイオン注入した後に、８００℃くらいで１時間程度アニーリングすると、空孔が動いてたまたま近くにあった窒素と空孔とがくっついてＮＶ中心ができる。ここでは例えば、８００℃で２時間程度アニーリングし、図１に示したｉ型ダイヤモンド層１３が形成される。

[0075] （７）図１１に示すように、ｎ型ダイヤモンド層１２の外気に対して露出した部分の全体に電極１５を形成し、ｐ型ダイヤモンド層１１の外気に対して露出した部分の一部に電極１４を形成する。ここでは、フォトリソで不要部分はマスクをし、必要部分だけにチタン、白金、金を順に全体に蒸着した

後で、フォトリソで不要な部分のマスクを取り除くことにより、電極１４と電極１５とを形成する。またここでは、電極１４と電極１５とを形成した後に、各電極の特性を向上させるためにアルゴンガス中で４２０℃、３０分程度アニーリングする。

[0076] （８）図１２に示すように、上記外気に対して露出している領域に対して、熱フィラメントを用いて水素分子を水素原子にして照射してクリーニングし、さらに、プラズマを用いて酸素を原子にして照射してクリーニングすることにより、表面の有機物等の不純物を除去する。また上記外気に対して露出している領域を、このように異なる複数の方法により、段階的にクリーニングすることにより、各電極への損傷を抑えながら上記外気に対して露出している領域の表面の不純物を十分に除去することができる。

[0077] なお、図１に示した子出力装置１では、発光素子１０は電流注入部３０からの電流注入によって光子を発生したが、本実施の形態はこれに限定されない。発光素子１０は光励起によって光子を発生してもよい。

[0078] 図１３（ａ）は、光励起によってｉ型ダイヤモンド層１３内において発生した光子の共焦点顕微鏡蛍光像を示す図である。光励起をした場合でもｉ型ダイヤモンド層１３からの発光は光学素子２０を介して観察される。図１３（ｂ）は、電流注入によってｉ型ダイヤモンド層１３内において発生した光子の共焦点顕微鏡蛍光像を示す図である。いずれの場合でも、ＮＶ中心から単一光子が同様に出力されていることが理解される。

[0079] ＜評価方法＞

ここでは、ＹＡＧレーザを用いて光励起させる場合と、電流を注入する場合の両方について、発光素子１０から、意図した通りに１個の単一光子発生源から光子が出力されているか否かを、アンチバンチングと言われている学術的な証明を用いて評価することとする。アンチバンチングは、光子相関法による測定で、１個の光子を検出したときにその近くにもう１個別の光子を検出する確率が小さくなっている場合に観測される強度相関から示される。ＮＶ中心の場合、励起後に光子を１個放出した後は励起状態から基底状態に

戻ってしまうので、再び励起状態に戻るまではもう１個別の光子を放出できず、時間的に近接した２つの光子の存在する確率が小さくなり、アンチバンチングが観測される。

[0080] 図１４は、本実施の形態における発光素子１０の動作を評価した際の評価システムの概略を示す図である。図１４に示す評価システムにおいて、ピエゾステージ２００に発光素子１０が設置され、予め試料台２００（ピエゾステージ）を微細に動かして、評価対象の位置を含む３次元的に狭小な領域から発せられる光子のみを選択的に検出することができるように調整しておく。

[0081] ・光励起させる場合

（１）ＹＡＧレーザ発生装置２０１からレーザ光が出力され、ダイクロイックミラー２０２によって反射して進行方向が変えられ、対物レンズ２０３を通って、発光素子１０内の所定の位置で焦点を結ぶ。

[0082] （２）ここで発光した光は、レーザ光とはエネルギーが異なり波長が違うため、対物レンズ２０３で集光されてダイクロイックミラー２０２を通過し、ピンホール２０４によって狭小な領域から発せられるもののみが選択的に通過する。

[0083] （３）ピンホール２０４を通過した光をビームスプリッタ２０５に入れて分け、２台のＡＰＤ（アバランシェフォトダイオード）２０６においてそれぞれ検出する。ここでＡＰＤ２０６は１個フォトンを検出すると、１個のＴＴＬ信号を出すフォトンカウンティングモジュールである。

[0084] （４）２台のＡＰＤ２０６において光子が検出されることにより出力された信号は、パソコン２０７に入力されて処理される。パソコン２０７は２台のＡＰＤ２０６よりそれぞれ出力された２つの信号の時間差を計り、数ｎｓ程度のオーダーで時間差ごとにカウントしてヒストグラムを作る。

[0085] （５）時間差ごとのカウントしたヒストグラムを、縦軸が０から１までのスケールになるようにノーマライズし、時間差ゼロのところのディップが０．５より小さいか否かを判定する。時間差ゼロのところのディップが０．５

より小さければ、１個の単一光子発生源から光子が出力されていることの証明になる。

・電流を注入する場合

（１）電流注入部３０を用いて、電極１４と電極１５との間に電圧を印加して、発光素子１０に電流を注入する。

[0086] （２）～（５）光励起させる場合の（２）～（５）と同様である。

[0087] ＜評価結果＞

図１５（ａ）は光励起で発光した本実施の形態の光子出力装置１におけるアンチバンチングを示すグラフであり、図１５（ｂ）は電流注入で発光した本実施の形態の光子出力装置１におけるアンチバンチングを示すグラフである。光励起させる場合においては、時間差ゼロのところのディップはおよそ０．３５であった。電流を注入する場合においては、時間差ゼロのところのディップはおよそ０．４５であった。

[0088] また、電流を注入する場合の発光強度は、光励起の場合と遜色ないものであった。よって、光励起させる場合、及び電流を注入する場合のいずれの場合でも、予め調整した３次元的に狭小な領域において、１個の単一光子発生源から光子が出力されているという事がわかった。よって、このような単一光子発生源から発生する単一光子を選択的に出力することが可能である事が検証された。なお、光励起では、ｉ型ダイヤモンド層１３内のＮＶ中心間距離が短い場合、光の波長の限界から、隣接するＮＶ中心から発生した光子を区別できないことがある。これに対して、電流注入では、微細加工した電極を用いると、ＮＶ中心間距離が比較的短くても、電流を注入する電極を制御することにより、隣接するＮＶ中心から発生した光子を区別できる。

[0089] ＜まとめ＞

以上に説明したように、本実施の形態によれば、室温において、電流注入によりｉ型ダイヤモンド層から単一光子を出力させることができるので、非常に効率良く単一光子を生成し出力することができる。よって、量子暗号通信や分散処理型量子コンピュータなどの分野における単一光子を必要とする

様々な装置の利用に供し、実用化に大きく貢献することができる。

産業上の利用可能性

[0090] 本発明は、量子暗号通信や分散処理型量子コンピュータなどの分野における様々な装置に適用することができる。本発明によって、光源装置や冷却設備を必要とせずに単一光子を効率良く生成し出力することができ、装置規模が大きくならずコストを大幅に抑えることができるので、その産業的利用価値は極めて高い。

符号の説明

[0091]

１	光子出力装置
１０	発光素子
１１	ｐ型ダイヤモンド層
１２	ｎ型ダイヤモンド層
１３	ｉ型ダイヤモンド層
１４	電極
１５	電極
２０	光学素子
２１	対物レンズ
２２	ピンホール
３０	電流注入部

請求の範囲

[請求項1] ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に設けられたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体を含む発光素子と、

前記ｉ型ダイヤモンド層内において発生した光子を通過させる光学素子と

を備える、光子出力装置。

[請求項2] 前記光学素子は、前記ｉ型ダイヤモンド層の所定の位置において発生した光子を通過させ、前記ｉ型ダイヤモンド層の別の位置、前記ｐ型ダイヤモンド層および前記ｎ型ダイヤモンド層において発生した光子をカットする、請求項１に記載の光子出力装置。

[請求項3] 前記光子出力装置は、前記ＰＩＮ構造の半導体に電圧を印加して、前記発光素子に電流を注入する電流注入部をさらに備える、請求項１または２に記載の光子出力装置。

[請求項4] 前記ｉ型ダイヤモンド層内に、窒素と空孔とが隣接する窒素－空孔複合体欠陥中心が形成されている、請求項１から３のいずれかに記載の光子出力装置。

[請求項5] 前記ｉ型ダイヤモンド層内に、窒素がイオン注入されている、請求項４に記載の光子出力装置。

[請求項6] 前記光学素子は、対物レンズと、当該対物レンズの焦点付近に配置されたピンホールとを含む、請求項１から５のいずれかに記載の光子出力装置。

[請求項7] 前記光学素子は、外部へ単一光子を出力する、請求項１から６のいずれかに記載の光子出力装置。

[請求項8] 前記ｉ型ダイヤモンド層における不純物の濃度は０．１ｐｐｂ以下である、請求項７に記載の光子出力装置。

[請求項9] 前記ｉ型ダイヤモンド層の主面は、前記ｐ型ダイヤモンド層、及び、前記ｎ型ダイヤモンド層のうちの少なくとも一方の層の主面よりも

小さく、

前記ｉ型ダイヤモンド層の主面には、外気に対して露出している領域があり、

前記光学素子は、前記外気に対して露出している領域内を通過した光子を外部へ出力する、請求項１から８のいずれかに記載の光子出力装置。

[請求項10] 前記ｉ型ダイヤモンド層の前記外気に対して露出している領域がクリーニングされている、請求項９に記載の光子出力装置。

[請求項11] 前記発光素子において、

前記ｐ型ダイヤモンド層となる材料基板の表面に、前記ｉ型ダイヤモンド層が積層され、

前記ｉ型ダイヤモンド層の上の一部に前記ｎ型ダイヤモンド層が積層され、

前記ｎ型ダイヤモンド層の上に電極が形成されており、

前記外気に対して露出している領域は、前記ｉ型ダイヤモンド層の上に前記ｎ型ダイヤモンド層が積層されていない部分に相当し、当該外気に対して露出している領域が、前記電極の形成後に、異なる複数の方法で段階的にクリーニングされている、請求項１０に記載の光子出力装置。

[請求項12] 前記光子出力装置は、室温において動作する請求項１から１１のいずれかに記載の光子出力装置。

[請求項13] ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に積層されたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体を含む発光素子を用意する用意ステップと、

前記発光素子を発光させる発光ステップと、

前記発光ステップにて前記ｉ型ダイヤモンド層内において発生した光子を光学素子に通過させる光子通過ステップと

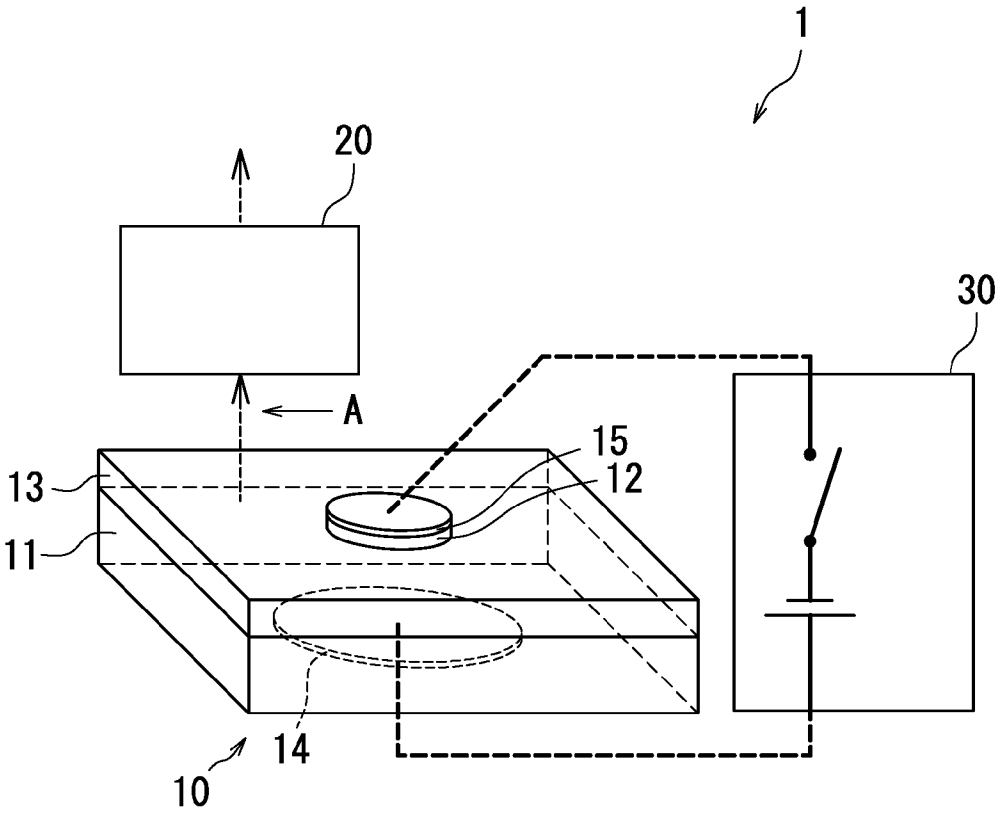
を包含する、光子出力方法。

［請求項14］ 前記発光ステップは、前記ＰＩＮ構造の半導体に電圧を印加して、前記発光素子に電流を注入するステップを含む、請求項１３に記載の光子出力方法。

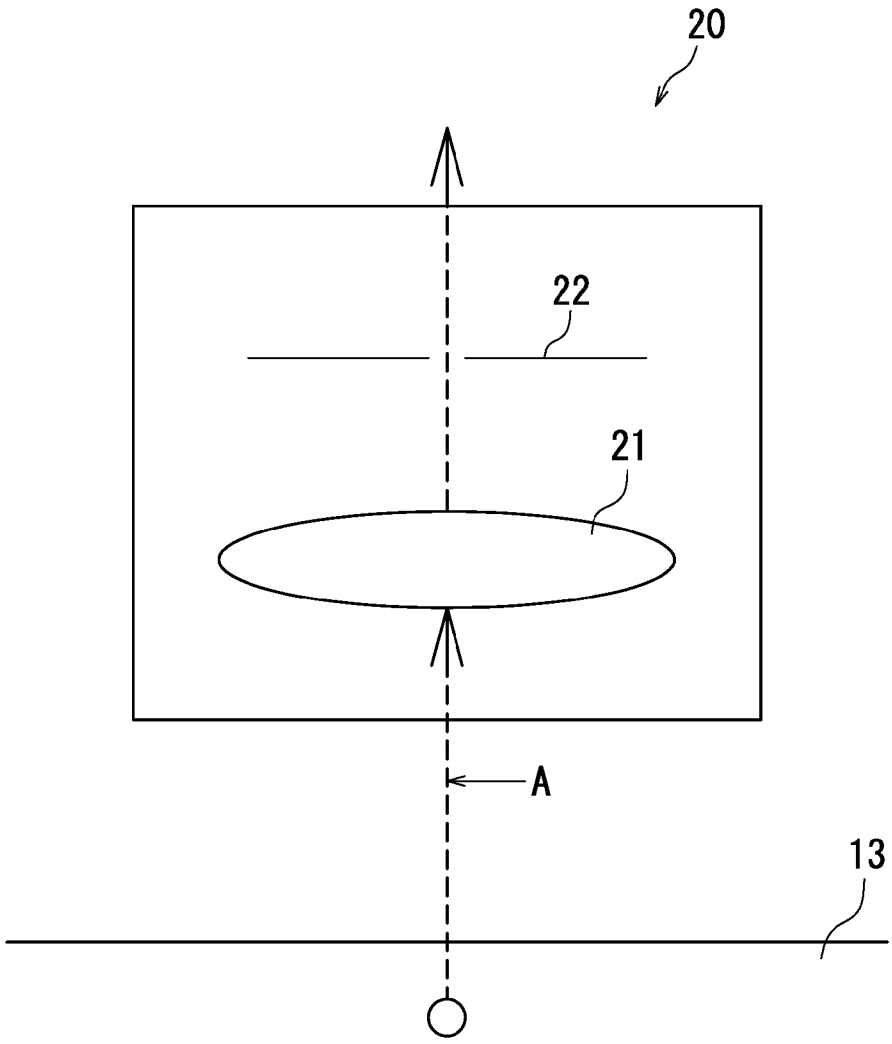
［請求項15］ ｐ型ダイヤモンド層、ｎ型ダイヤモンド層、及び、前記ｐ型ダイヤモンド層と前記ｎ型ダイヤモンド層との間に積層されたｉ型ダイヤモンド層からなるＰＩＮ構造の半導体の製造方法であって、

前記ｉ型ダイヤモンド層内に窒素をイオン注入する注入ステップを含む、半導体の製造方法。

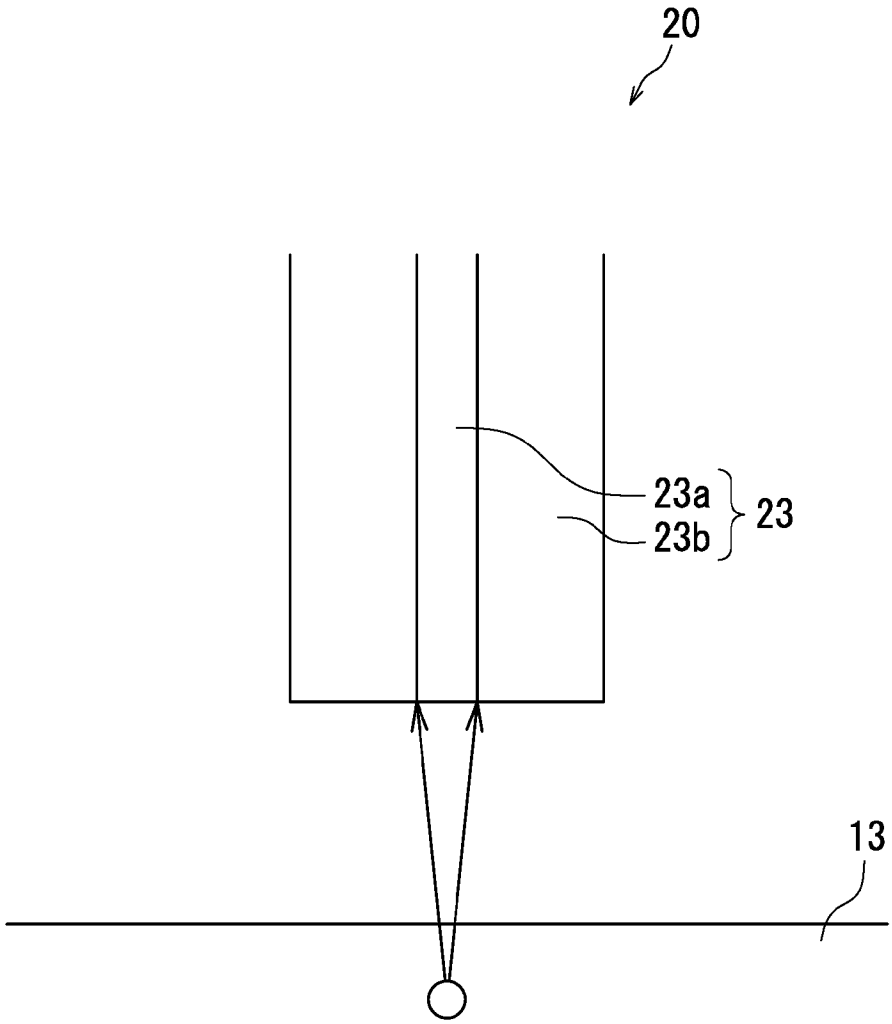
[図1]



[図2]

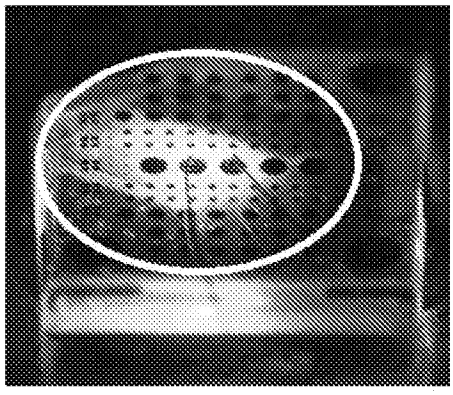


[図3]

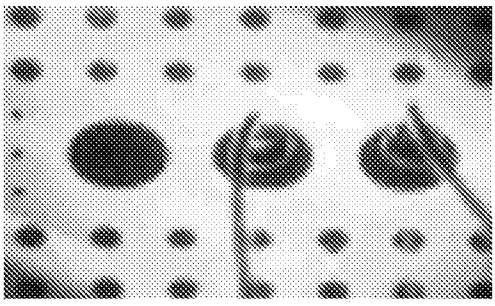


[図4]

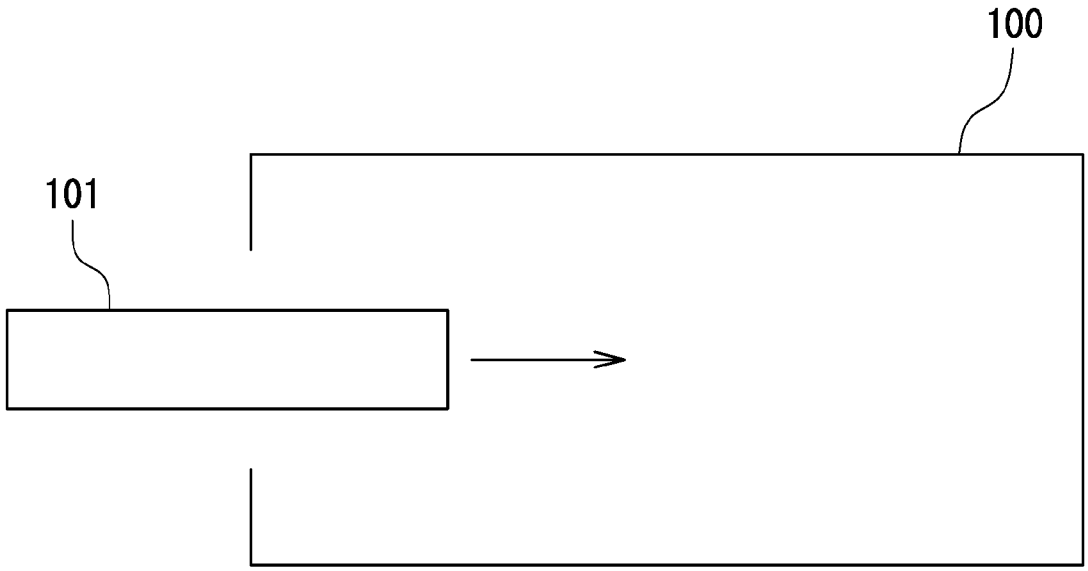
(a)



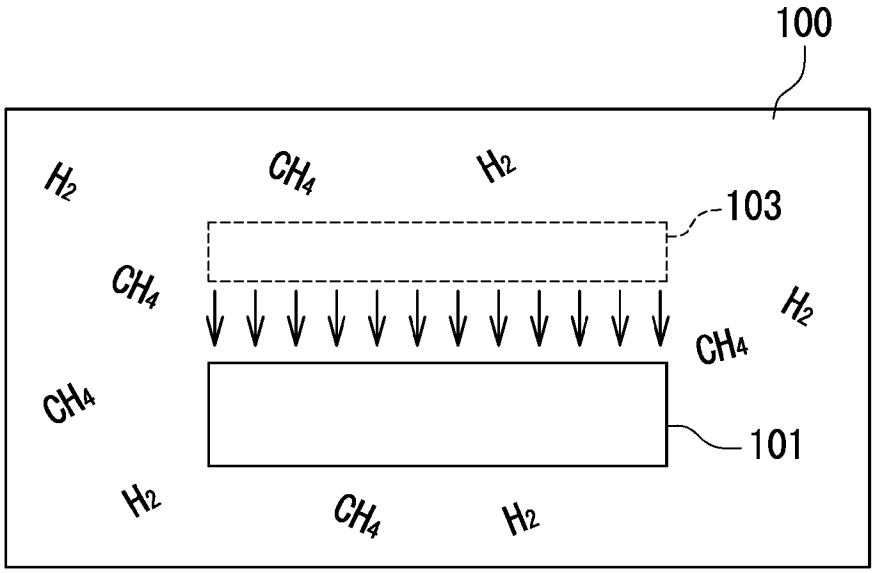
(b)



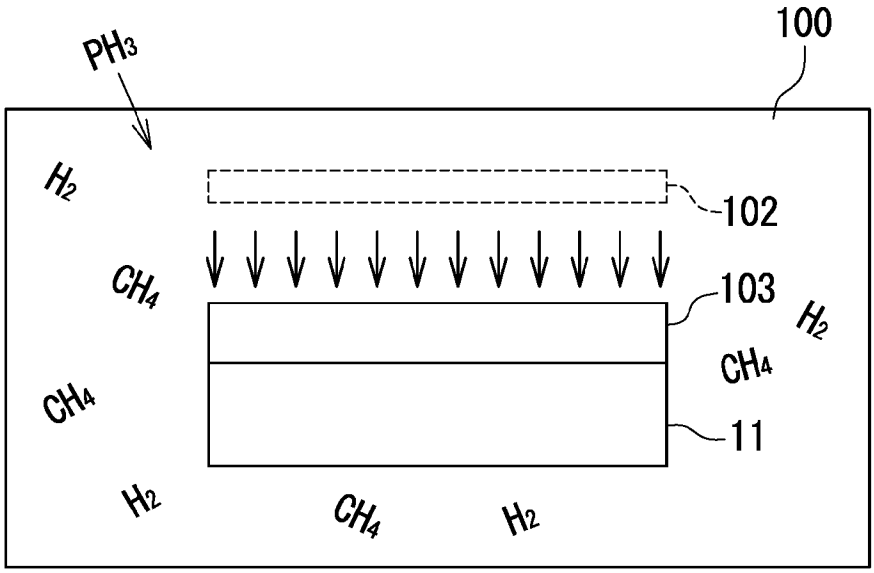
[図5]



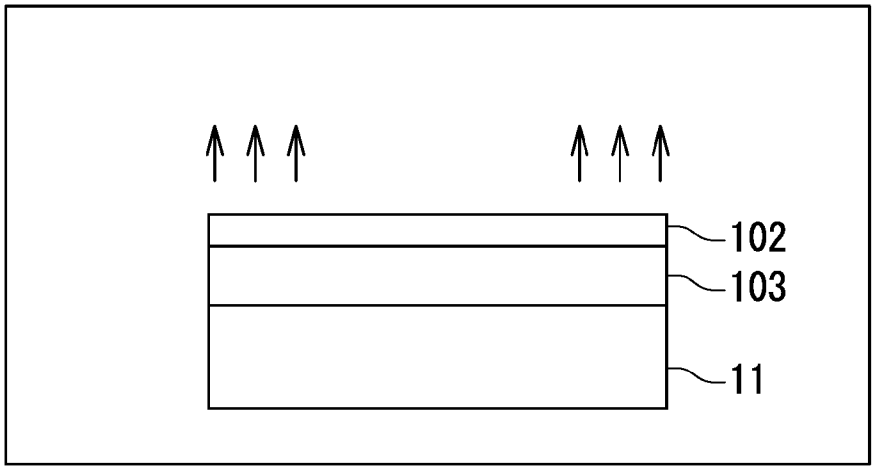
[図6]



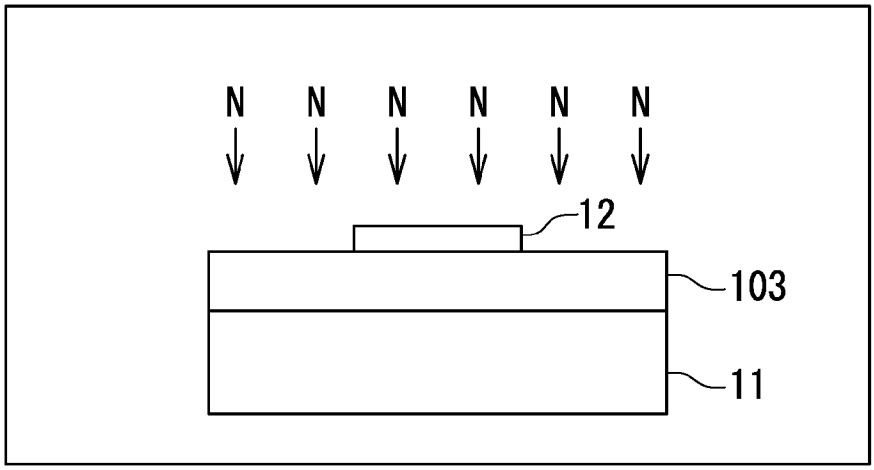
[図7]



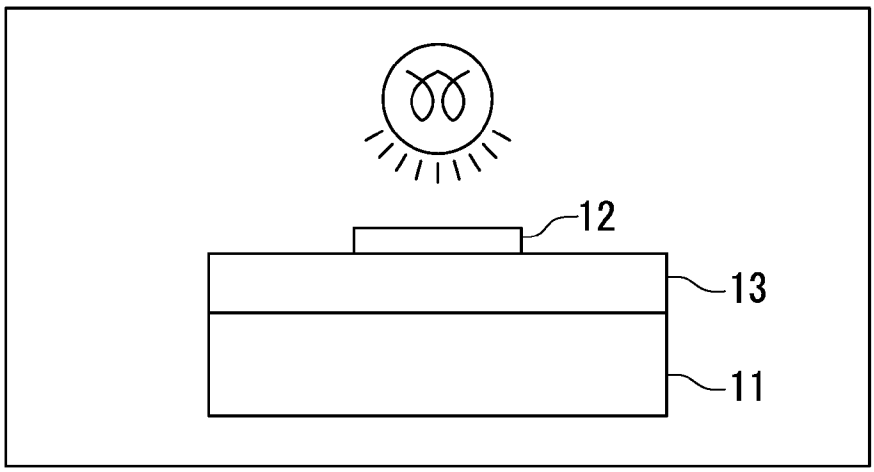
[図8]



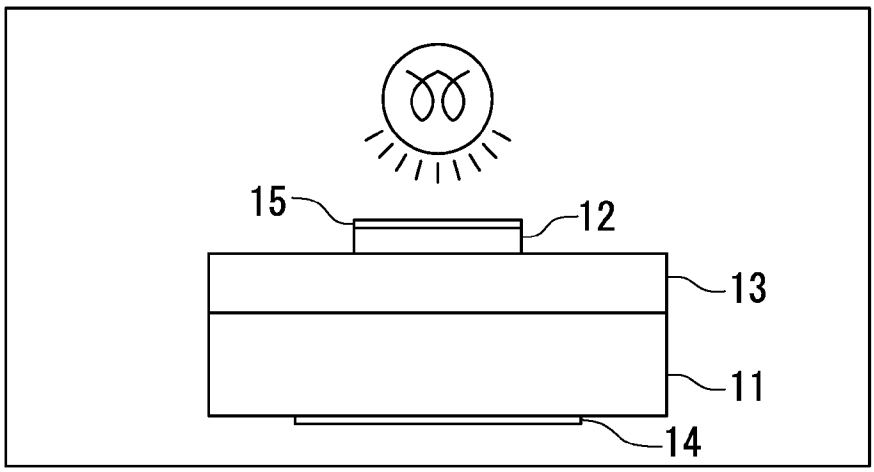
[図9]



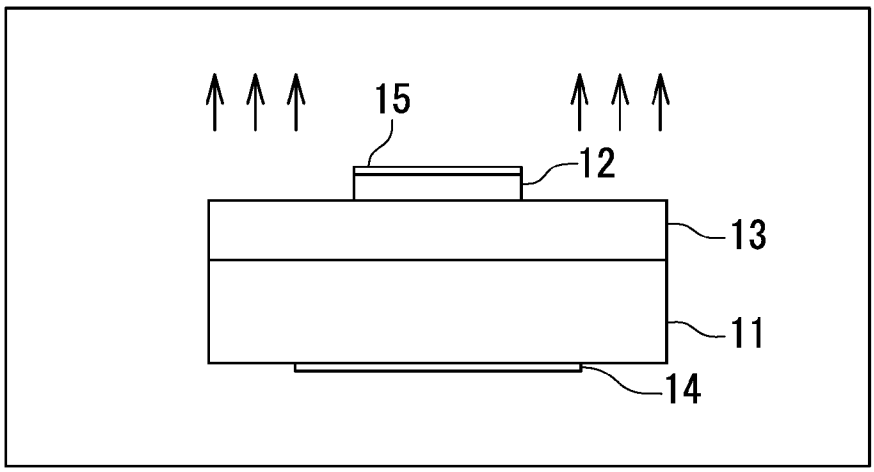
[図10]



[図11]

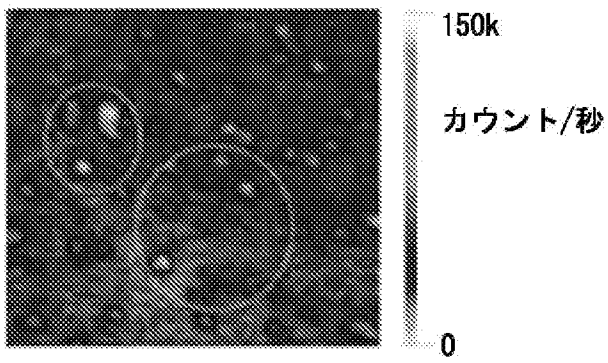


[図12]

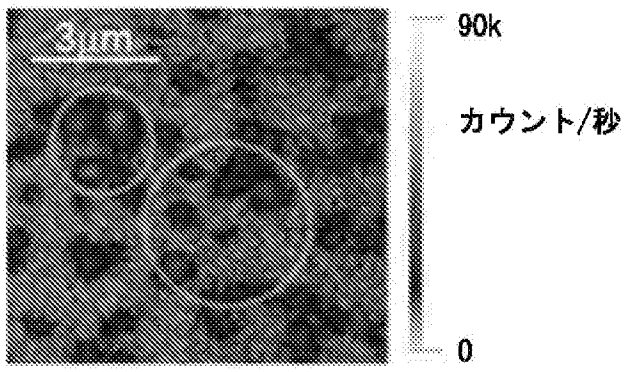


[図13]

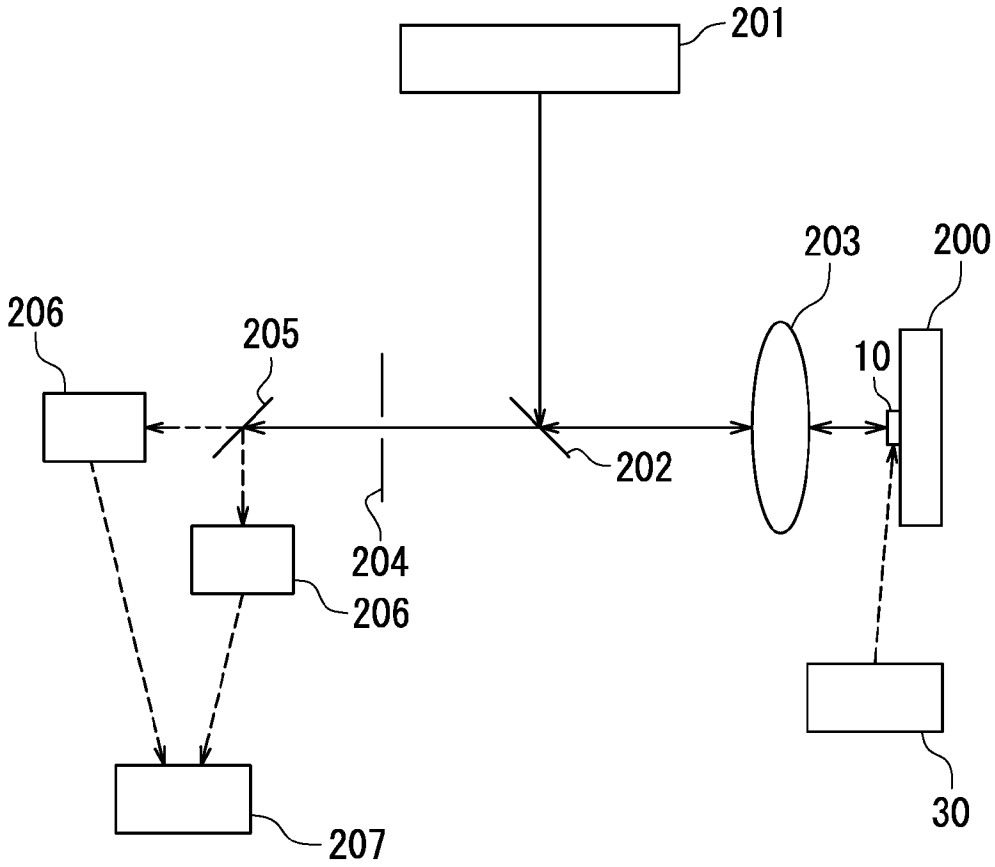
(a)



(b)

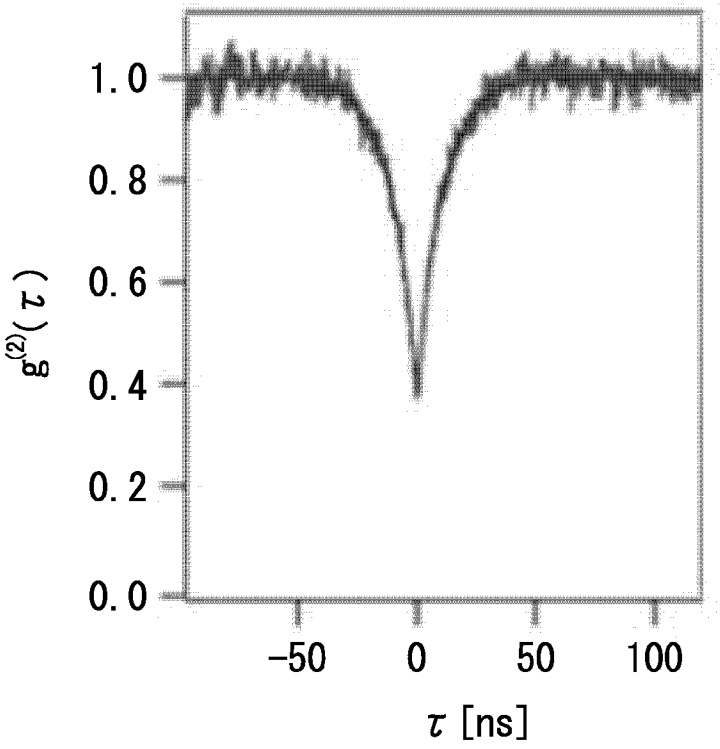


[図14]

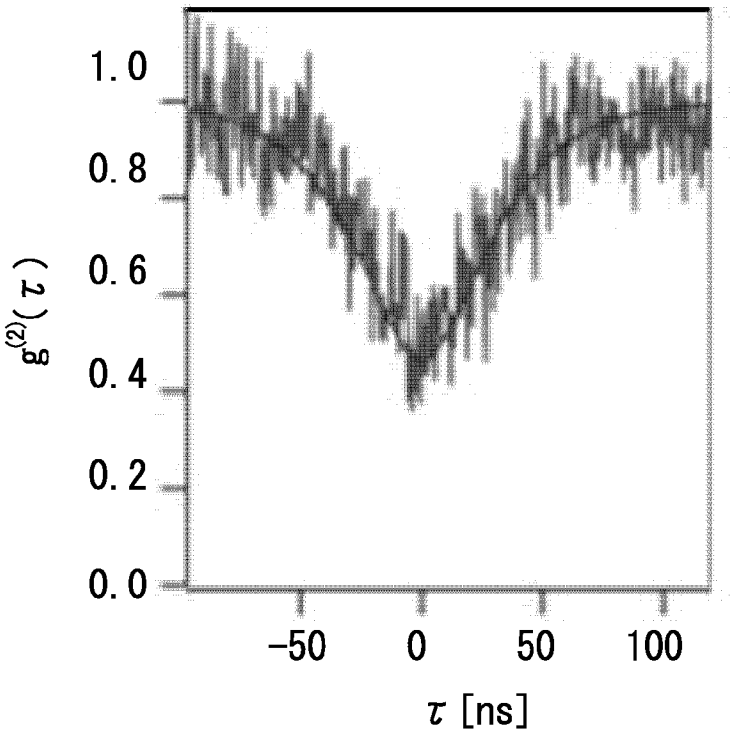


[図15]

(a)


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
$g^{(2)}(\tau)$
-50
0
50
100
τ [ns]

(b)


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
$g^{(2)}(\tau)$
-50
0
50
100
τ [ns]

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2012/068684

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01L33/34(2010.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H01L33/00-33/64, H01S5/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
WPI, JSTPlus(JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2007-526639 A (THE UNIVERSITY OF MELBOURNE), 13 September 2007 (13.09.2007), entire text; all drawings (particularly, paragraph [0002]) & US 2007/0277730 A1 & EP 1735659 A1 & WO 2005/085946 A1 & KR 10-2007-0004012 A & CN 100465752 C & AU 2005219894 A & AT 478358 T	1-15
Y	Zhiliang YUAN,et.al., Electrically Driven Single-Photon Source, Science, 2002.01.04, Vol.295, pp.102-105	1-15

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
08 August, 2012 (08.08.12)	21 August, 2012 (21.08.12)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2012/068684

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2010/010344 A1 (ELEMENT SIX LTD.), 28 January 2010 (28.01.2010), entire text; all drawings (particularly, claim 50) & JP 2011-529265 A & US 2011/0163291 A1 & EP 2304083 A1 & AU 2009275378 A & CA 2725050 A & CN 102077222 A	5,9-11,15
Y	JP 2008-078611 A (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), 03 April 2008 (03.04.2008), entire text; all drawings (particularly, paragraph [0037]) & US 2010/0001292 A1 & EP 2056365 A1 & WO 2008/023592 A1	9-11
P,X	N.MIZUOCHI,et.al., Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond, Nature photonics, 2012.04.15, Vol.6, pp.299-303	1-15
P,A	A.LOHRMANN,et.al., Diamond based light-emitting diode for visible single-photon emission at room temperature, Applied Physics Letters, 2011.12.21, Vol.99, p.251106	1-15

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１２／０６８６８４

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L33/34(2010.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L33/00-33/64, H01S5/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１２年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

WPI, JSTPlus(JDreamII)

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	JP 2007-526639 A (THE UNIVERSITY OF MELBOURNE) 2007.09.13, 全文、全図（特に、[0002]） & US 2007/0277730 A1 & EP 1735659 A1 & WO 2005/085946 A1 & KR 10-2007-0004012 A & CN 100465752 C & AU 2005219894 A & AT 478358 T	1-15
Y	Zhiliang YUAN, et.al., Electrically Driven Single-Photon Source, Science, 2002.01.04, Vol.295, pp.102-105	1-15

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 ０８．０８．２０１２	国際調査報告の発送日 ２１．０８．２０１２
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｋ　３１５４ 佐藤　秀樹 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５５

Ｃ（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	WO 2010/010344 A1 (ELEMENT SIX LIMITED) 2010.01.28, 全文、全図（特に、請求項50） & JP 2011-529265 A & US 2011/0163291 A1 & EP 2304083 A1 & AU 2009275378 A & CA 2725050 A & CN 102077222 A	5,9-11,15
Y	JP 2008-078611 A（独立行政法人産業技術総合研究所）2008.04.03, 全文、全図（特に、[0037]） & US 2010/0001292 A1 & EP 2056365 A1 & WO 2008/023592 A1	9-11
P,X	N.MIZUOCHI,et.al., Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond, Nature photonics, 2012.04.15, Vol.6, pp.299-303	1-15
P,A	A.LOHRMANN,et.al., Diamond based light-emitting diode for visible single-photon emission at room temperature, Applied Physics Letters, 2011.12.21, Vol.99, p.251106	1-15