

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-55307

(P2005-55307A)

(43) 公開日 平成17年3月3日(2005.3.3)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 21/64	GO 1 N 21/64	Z 2GO 4 3
GO 1 N 21/00	GO 1 N 21/00	B 2GO 5 9
GO 1 N 21/71	GO 1 N 21/71	

審査請求 有 請求項の数 2 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2003-286624 (P2003-286624)	(71) 出願人	391012338 埼玉大学長 埼玉県さいたま市桜区下大久保255
(22) 出願日	平成15年8月5日(2003.8.5)	(74) 代理人	100089635 弁理士 清水 守
		(72) 発明者	鎌田 憲彦 埼玉県さいたま市南区别所3-19-14 -101
		Fターム(参考)	2G043 CA05 DA08 EA01 EA06 GA25 GB28 HA12 JA01 JA02 KA01 KA02 KA03 KA05 KA09 LA02 2G059 AA03 BB16 DD16 EE06 EE07 EE11 FF05 GG01 GG03 GG07 HH01 HH02 HH06 JJ01 JJ02 JJ24 KK02 PP05

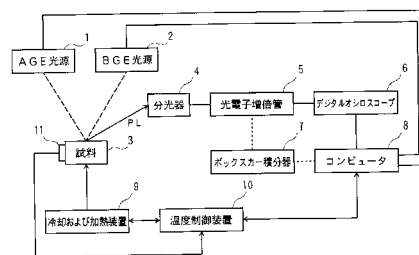
(54) 【発明の名称】 熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定方法およびその測定装置

(57) 【要約】

【課題】 捕獲準位を始めとする禁制帯内準位のエネルギーを簡便、かつ正確に測定することができる熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定方法およびその装置を提供する。

【解決手段】 発光・受光および電子材料中の禁制帯内準位を定量的に測定する際に、これら材料の禁制帯エネルギー幅以上の励起光と、禁制帯エネルギー幅以下の励起光と、熱エネルギーとを有機的に組み合わせることによって、捕獲準位から放出された電子・正孔による発光を観測し、非破壊、非接触で簡便かつ確実に禁制帯内準位のエネルギーを個別分離し測定する。これにより、禁制帯内準位の成因を明示し、その除去を通して材料組成、作製プロセス、デバイス構造等の最適化を容易とし、発光・表示デバイスの効率改善をもたらす。

【選択図】 図4



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

フォトルミネッセンス ( P L ) による禁制帯内準位の測定方法において、

( a ) 発光・受光および電子材料に低温下で予め光子エネルギー  $E_{exc}$  の A G E 光または B G E 光を照射して、励起キャリア ( 電子又は正孔 ) を禁制帯内の捕獲準位に捕獲させ

( b ) A G E 光または B G E 光を遮断後、一定昇温率で温度を上昇させながら、捕獲準位から熱放出されたキャリアによる発光を温度の関数として観測するとき、ある中間温度で光子エネルギー  $E_B$  の B G E 光を照射して、照射しなければその後熱放射されたであろう捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位のキャリアを B G E により光励起して、一度に発光を生成させ、この後の昇温では、捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位にキャリアは存在しないため発光は生じず、捕獲エネルギー  $E_T > E_B$  の準位からのキャリアが熱放出される温度に達して初めて次の発光を生じさせ、

( c ) 前記光励起と熱励起の相反的關係から、特定の光子エネルギー  $E_{exc}$  と  $E_B$ 、あるいは相異なる複数の  $E_{exc}$  と  $E_B$  の組み合わせを利用して禁制帯内準位のエネルギーを検出することを特徴とする熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定方法。

## 【請求項 2】

フォトルミネッセンス ( P L ) による禁制帯内準位の測定装置において、

( a ) A G E 光を照射する A G E 光源と、

( b ) B G E 光を照射する B G E 光源と、

( c ) 試料としての発光材料に作用する冷却および加熱装置と、

( d ) 該冷却および加熱装置の温度を制御する温度制御装置と、

( e ) 試料の温度を検出するセンサとを備え、

( f ) 発光・受光および電子材料に低温下で予め光子エネルギー  $E_{exc}$  の A G E 光または B G E 光を照射して、励起キャリア ( 電子又は正孔 ) を禁制帯内の捕獲準位に捕獲させ、A G E 光または B G E 光を遮断後、前記センサ及び温度制御装置により、一定昇温率で温度を上昇させながら、捕獲準位から熱放出されたキャリアによる発光を温度の関数として観測するとき、ある中間温度で光子エネルギー  $E_B$  の B G E 光を照射すると、照射しなければその後熱放射されたであろう捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位のキャリアを B G E により光励起させ、一度に発光を生じさせ、この後の昇温では、捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位にキャリアは存在しないため発光は生じず、捕獲エネルギー  $E_T > E_B$  の準位からのキャリアが熱放出される温度に達して初めて次の発光を生じさせ、この光励起と熱励起の相反的關係から特定の光子エネルギー  $E_{exc}$  と  $E_B$ 、あるいは相異なる複数の  $E_{exc}$  と  $E_B$  の組み合わせを利用して、禁制帯内準位のエネルギーを測定することを特徴とする熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、発光・受光および電子材料中に存在し、素子効率や安定性、信頼性を低下させるために、その成因解明と除去が望まれている禁制帯内準位 ( 欠陥や残留不純物等の作る、本来あってはならないエネルギー準位で、捕獲準位や非発光再結合準位として作用する ) を高精度に検出、評価するための非破壊、非接触の光学的測定方法およびその測定装置に関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

これまでのフォトルミネッセンス ( P L ) では、異なる試料間での発光強度の相対比を求めることは容易であるが、素子効率や安定性、信頼性を定める非発光再結合準位や捕獲準位のふるまいを定量的に調べることは不可能であった。

## 【0003】

10

20

30

40

50

これに対して本願発明者らは、禁制帯エネルギー幅以上の励起 (Above - Gap Excitation, AGE) 光と、禁制帯エネルギー幅以下の励起 (Below - Gap Excitation, BGE) 光の 2 波長励起 PL の手法により、非発光再結合準位として作用する禁制帯内準位のエネルギー、空間分布、濃度、電子・正孔捕獲率等の非発光再結合パラメータを定量的に導出可能であることを示した。また、パルス励起での時分解 PL 応答から、より容易に非発光再結合パラメータの導出が可能であることを示した (下記特許文献 1 参照)。

【0004】

しかしながら、ここで非発光再結合準位のエネルギー分布は BGE エネルギーを変化させて測定可能であるが、実際上はそれに十分な強度の光源を赤外領域まで準備すること、特に捕獲準位を分けて測定することはさほど容易でない。 10

【0005】

これとは別に、捕獲準位にキャリアを捕獲させた後、一定速度で昇温させながら熱放出キャリアによる発光を温度の関数として観測する方法 (熱ルミネッセンス法) がある。

【0006】

この方法では、昇温速度を変えながら複数回の測定を行うと、捕獲準位のエネルギーが求められるが、測定に時間がかかる上に精度が十分でなく、また他の非発光再結合準位の影響を分離することができなかった。

【特許文献 1】特開 2002 - 286640 号公報 (第 2 - 3 頁 図 2)

【非特許文献 1】E. Kanoh, K. Hoshino, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa, J. Lumin, 63, pp. 235 - 240, 1995. 20

【非特許文献 2】N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, K. Hoshino, K. Yamada, M. Nishioka, T. Someya and Y. Arakawa, Recent Res. Developments in Quantum Electronics, 1, pp. 123 - 135, 1999.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

発光・受光および電子材料・デバイスの素子効率や安定性、信頼性を改善するために、禁制帯内準位を高精度に検出、評価するための非破壊、非接触の測定手法が産業界から強く望まれている。 30

【0008】

本発明は、上記状況に鑑みて、捕獲準位を始めとする禁制帯内準位のエネルギーを簡便、かつ正確に測定することができる熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定方法およびその測定装置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】

【0009】

本発明は、上記目的を達成するために、

(1) 熱励起を加えたフォトルミネッセンス (PL) による禁制帯内準位の測定方法において、 40

(a) 発光・受光および電子材料に低温下で予め光子エネルギー  $E_{exc}$  の AGE 光または BGE 光を照射して、励起キャリア (電子又は正孔) を禁制帯内の捕獲準位に捕獲させ、

(b) AGE 光または BGE 光を遮断後、一定昇温率で温度を上昇させながら、捕獲準位から熱放出されたキャリアによる発光を温度の関数として観測するとき、ある中間温度で光子エネルギー  $E_B$  の BGE 光を照射して、照射しなければその後熱放射されたであろう捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位のキャリアを BGE により光励起して、一度に発光を生成させ、この後の昇温では、捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位にキャリアは存在しないため発光は生じず、捕獲エネルギー  $E_T > E_B$  の準位からのキャリアが熱放出 50

される温度に達して初めて次の発光を生じさせ、

(c) 前記光励起と熱励起の相反的關係から、特定の光子エネルギー  $E_{exc}$  と  $E_B$ 、あるいは相異なる複数の  $E_{exc}$  と  $E_B$  の組み合わせを利用して、禁制帯内準位のエネルギーを検出することを特徴とする。

【0010】

ここで、簡単化のために2つの捕獲準位(エネルギー  $E_{T1}$  および  $E_{T2}$ )と1つの非発光再結合準位(エネルギー  $E_{NT}$ )を有する半導体を図1に例示し、電子の捕獲、放出過程に関し説明する。

【0011】

図1は、2つの捕獲準位(エネルギー  $E_{T1}$  および  $E_{T2}$ )と1つの非発光再結合準位(エネルギー  $E_{NT}$ )を持つ半導体のエネルギーバンド図(簡単化するため電子のみを考慮するもの)である。ここで、上記(a)でAGE光により捕獲準位1および2に電子が捕獲される。この場合、通常の熱ルミネッセンス測定では、捕獲準位1から非発光再結合準位および伝導帯への電子放出(要するエネルギー  $E_1 = E_{NT} - E_{T1}$ ,  $E_2 = E_g - E_{T1}$ )が温度  $T_1$ ,  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ )で起こるが、このうち温度  $T_2$  での放出過程のみが発光として観測される。このとき捕獲準位2からの電子放出は  $E_3 = E_{NT} - E_{T2}$  および  $E_4 = E_g - E_{T2}$  に対応する温度が高すぎるため観測されず、結局捕獲準位2および非発光再結合準位は検出されない。

10

【0012】

これに対し、上記(b)で前述の温度  $T_2$  まで昇温を行うと、図2に示す通り、捕獲準位1の電子は既に放出されており、電子は捕獲準位2のみに捕獲されている。この状態に温度を保ち光子エネルギー  $E_{B2} = E_g - E_{T2}$  のBGE光を照射すると、捕獲準位2から伝導帯への電子放出が発光として観測される。また再度AGE光での電子捕獲、温度  $T_2$  までの昇温後、今度は  $E_{B2}$  でなく、まず  $E_{B1} = E_{NT} - E_{T2}$  のBGE光を照射し、その後先に  $E_{B2}$  のBGE光を照射すると、捕獲準位2の電子は非発光再結合準位を介して非発光再結合してしまっているため、発光は生じない(図2参照)。

20

【0013】

このことから、従来手法では測定不能であった捕獲準位2および非発光再結合準位のエネルギーを定量的に検出することができる。なお、図3に示すように、最初にAGE光でなく光子エネルギー  $E_{exc} = E_{T2}$  のBGE光を用いると、直接捕獲準位2のみに電子を捕獲させることができる。したがって、前述の通り捕獲準位へキャリアを捕獲させる光子エネルギー  $E_{exc}$  および捕獲準位からキャリアを放出させる光子エネルギー  $E_B$  の組み合わせによって、禁制帯内の捕獲準位、非発光再結合準位を個別に分離し、しかもその個々を定量測定することが可能となる。

30

【0014】

(2) 熱励起を加えたフォトルミネッセンス(PL)による禁制帯内準位の測定装置において、AGE光を照射するAGE光源と、BGE光を照射するBGE光源と、試料としての発光材料に作用する冷却および加熱装置と、この冷却および加熱装置の温度を制御する温度制御装置と、試料の温度を検出するセンサとを備え、発光・受光および電子材料に低温下で予め光子エネルギー  $E_{exc}$  のAGE光またはBGE光を照射して、励起キャリア(電子又は正孔)を禁制帯内の捕獲準位に捕獲させ、AGE光を遮断後、前記温度制御装置により、一定昇温率で温度を上昇させながら、捕獲準位から熱放出されたキャリアによる発光を温度の関数として観測するとき、ある中間温度で光子エネルギー  $E_B$  のBGE光を照射すると、照射しなければその後熱放射されたであろう捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位のキャリアをBGEにより光励起させ、一度に発光を生じさせ、この後の昇温では、捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位にキャリアは存在しないため発光は生じず、捕獲エネルギー  $E_T > E_B$  の準位からのキャリアが熱放出される温度に達して初めて次の発光を生じさせ、この光励起と熱励起の相反的關係から、特定の光子エネルギー  $E_{exc}$  と  $E_B$ 、あるいは相異なる複数の  $E_{exc}$  と  $E_B$  の組み合わせを利用して、禁制帯内準位のエネルギーを測定することを特徴とする。

40

50

## 【発明の効果】

## 【0015】

本発明によれば、以下のような効果を奏することができる。

## 【0016】

(A) 非破壊、非接触の光学測定であり、電極が不要であるため試料形状によらない、各プロセスごとの測定評価が可能である。

## 【0017】

(B) 励起光スポットサイズを絞ることにより、局所的な評価が可能である。この極限として、近接場光学技術を用いて、単分子、単一量子ドット測定までが可能である。一方、スポットサイズを広げると、広範囲な領域の平均情報が容易に得られる。

10

## 【0018】

(C) 発光観測による準位のエネルギー、空間分布測定が、さらに広いエネルギー領域で簡便に可能となる。

## 【0019】

(D) 捕獲準位以外の非発光再結合準位に関する情報は従来の熱ルミネッセンス測定では得られないが、本発明ではそれが可能である。これにより、禁制帯内準位を総合的に分類評価することができる。

## 【0020】

(E) 熱ルミネッセンス測定で問題であった測定時間を大幅に短縮し、測定精度を改善することができる。

20

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0021】

発光・受光および電子材料に低温下で予め光子エネルギー  $E_{exc}$  の A G E 光または B G E 光を照射し、励起キャリア（電子又は正孔）を禁制帯内の捕獲準位に捕獲させる。A G E 光または B G E 光を遮断後、一定昇温率で温度を上昇させながら、捕獲準位から熱放出されたキャリアによる発光を温度の関数として観測する。このときある中間温度で光子エネルギー  $E_B$  の B G E 光を照射すると、照射しなければその後熱放射されたであろう捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位のキャリアは B G E により光励起され、一度に発光を生じる。この後の昇温では、捕獲エネルギー  $E_T < E_B$  の捕獲準位にキャリアは存在しないため発光は生じず、捕獲エネルギー  $E_T > E_B$  の準位からのキャリアが熱放出される温度に達して初めて次の発光が生じる。

30

## 【0022】

この光励起と熱励起の相反的關係から、特定の光子エネルギー  $E_{exc}$  と  $E_B$ 、あるいは相異なる複数の  $E_{exc}$  と  $E_B$  の組み合わせを利用して、本発明は禁制帯内の捕獲準位、非発光再結合準位のエネルギーを簡便、確実に測定する。また、この測定手法、並びにこの測定を行うために、試料を一定温度に保ち、また、一定速度で昇温しながら 2 波長励起発光測定が可能な測定装置を提供する。

## 【実施例】

## 【0023】

図 4 は本発明の実施例を示す熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定装置（システム）の構成図である。

40

## 【0024】

この図において、1 は A G E 光源、2 は B G E 光源、3 は試料、4 は分光器、5 は光電子増倍管、6 はデジタルオシロスコープ、7 はボックスカー積分器、8 はコンピュータ、9 は冷却および加熱装置、10 は温度制御装置、11 は温度センサである。

## 【0025】

一例として、試料 3 として青色発光半導体である G a N を評価する場合、A G E 光源 1 としては重水素ランプに干渉フィルターを組み合わせたもの、B G E 光源 2 としては連続発振 N d : Y A G レーザー類、または波長可変の N d : Y A G レーザー励起光パラメトリック発振器 ( O P O )、色素レーザー、T i : サファイアレーザー等のパルス発振レーザ

50

一類を用いる。試料 3 からの発光は分光器 4 で分光後、光電子増倍管 5 で受光し、その時間応答波形（連続発振レーザー励起の場合はその光チョッパーによる断続に対する波形変化）がデジタルオシロスコープ 6、またはボックスカー積分器 7 等を通してコンピュータ 8 に記録される。また、コンピュータ 8 は A G E 光源 1 または B G E 光源 2 に接続されて、これらの励起光を得ることができるようになっている。

【0026】

さらに、本発明では、試料 3 の温度を制御するための構成を有している。つまり、試料 3 に作用する冷却および加熱装置 9 と、この冷却および加熱装置 9 の温度を制御する温度制御装置 10 と、試料 3 の温度を検出する温度センサ 11 とを備えている。

【0027】

以下、本発明の熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位のエネルギーの測定の実施例について説明する。

【0028】

図 5 は、本発明にかかる B G E 照射を加えた場合の発光強度の温度依存性を示す図、図 6 は本発明にかかる B G E 照射を加えない場合の発光強度の温度依存性と、各ピークをもたらす捕獲準位のエネルギーを示す図である。

【0029】

標準的な赤色蛍光体として  $Y_2O_2S : Eu^{3+}$  が知られている。そこで、母体の  $Y_2O_2S$  結晶を光励起すると、励起キャリアが  $Eu^{3+}$  に移動し、 $Eu^{3+}$  の  $f-f$  遷移により固有の赤色発光（波長 626 nm）を生じる。この  $Y_2O_2S : Eu^{3+}$  蛍光体（4.5 mol %）を 15 K に冷却し、波長 240 nm（光子エネルギー  $E_{exc} = 5.17 eV$ ）の A G E 光を強度  $0.25 nW/mm^2$  で 300 sec 照射して禁制帯内の捕獲準位をキャリアで満たした。

【0030】

次に、 $3.17 K/min$ （K/分）の速度で 60 K まで昇温し、波長 1064 nm（光子エネルギー  $E_B = 1.17 eV$ ）の B G E 光を強度  $7.87 mW/mm^2$  で照射したところ、図 5 に示すように、 $Eu^{3+}$  の  $f-f$  遷移による発光強度の一時的増大が観測された。その後、B G E 照射を続けながら、 $3.17 K/min$ （K/分）の速度で昇温し発光強度を温度の関数として調べたところ、260 K 付近に次のピークが観測された。

【0031】

一方、同一の試料を 15 K に冷却し、波長 240 nm（光子エネルギー  $E_{exc} = 5.17 eV$ ）の A G E 光を強度  $0.25 nW/mm^2$  で 300 sec 照射して禁制帯内の捕獲準位をキャリアで満たした。

【0032】

次に、 $3.17 K/min$ （K/分）の速度で 300 K まで昇温したところ、少なくとも 6 つの発光ピークが観測された。図 6 に示すように、これらのうち低温側から 4 つの発光ピークに着目し、それらをもたらす捕獲準位からの発光を伴うキャリア放出に要するエネルギー（図 1 の捕獲準位 1 では  $E_2 = E_g - E_{T1}$ 、図 2 の捕獲準位では  $E_4 = E_g - E_{T2}$  に対応するエネルギー）を  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  とし、それらの値を、昇温率を  $\gamma_1, \gamma_2$  の 2 段階に変えた測定でのピーク温度  $T_{m1}, T_{m2}$  から求めた。その結果は、  
 $\epsilon_1 = 0.22 eV$  ( $T_{m1} = 62.8 K, T_{m2} = 53.7 K, \gamma_1 = 13 K/min, \gamma_2 = 0.36 K/min$ )、  
 $\epsilon_2 = 0.55 eV$  ( $T_{m1} = 107.4 K, T_{m2} = 98.1 K, \gamma_1 = 9.0 K/min, \gamma_2 = 0.5 K/min$ )、  
 $\epsilon_3 = 0.69 eV$  ( $T_{m1} = 132.9 K, T_{m2} = 121.6 K, \gamma_1 = 9.0 K/min, \gamma_2 = 0.5 K/min$ )、  
 $\epsilon_4 = 1.10 eV$  ( $T_{m1} = 192.9 K, T_{m2} = 179.7 K, \gamma_1 = 4.0 K/min, \gamma_2 = 0.33 K/min$ ) であった。

【0033】

ここで、60 K まで昇温した後に、B G E 光（光子エネルギー  $E_B = 1.17 eV$ ）を照射した図 5 と照射していない図 6 とを比較すると、図 6 の発光ピーク  $\epsilon_2$ （0.55 eV）、 $\epsilon_3$ （0.69 eV）、 $\epsilon_4$ （1.10 eV）は、図 5 では検出されていないこと

10

20

30

40

50

が分かる。これは図5において照射したBGE光の光子エネルギー $E_B$ が $1.17\text{ eV}$  ( $> 2, 3, 4$ )のため、図6の $2, 3, 4$ で示される発光ピークをもたらす捕獲準位はこのBGE照射でキャリアを全て放出してしまい、その後の昇温で十分な熱エネルギーを得ても、もはやキャリア放出が起こらないからである。また、図5で $260\text{ K}$ 付近の発光ピークが得られたことから、この発光ピークをもたらす捕獲準位のキャリア放出エネルギーは $1.17\text{ eV}$ 以上であることが判明する。

#### 【0034】

すなわち、昇温途中で照射したBGE光の光子エネルギーと、それにより消失した熱ルミネッセンスをもたらす捕獲準位のキャリア放出エネルギーとが対応しており、禁制帯内準位の挙動とキャリア捕獲、放出過程並びに発光・非発光再結合過程を総合的に観測する新たな測定手法が実証された。

10

#### 【0035】

上記した実施例の具体的作用について説明する。

#### 【0036】

発光・受光および電子材料の禁制帯エネルギー幅にも依存するが、BGEによる光励起は紫外～可視の光子エネルギー領域で有利であり、簡便迅速な測定が可能であるが、赤外の低エネルギー領域測定はさほど容易ではない。一方、熱励起は低エネルギー領域での測定に有効だが、時間を要し精度が不十分である上にエネルギーが高くなるにつれ測定は困難となる。そこで、AGEおよびBGE光による光励起と熱励起プロセスを有機的に組み合わせることにより、試料禁制帯エネルギー幅の全エネルギー領域において、簡便かつ高精度な測定を実現し、上記課題を解決することができる。

20

#### 【0037】

さらに、2波長励起PLの利点により、禁制帯内準位として捕獲準位のみならず、他の非発光再結合準位までを一括して評価することが初めて可能となる。

#### 【0038】

なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0039】

本発明の熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の定量的測定方法およびその装置は、禁制帯内準位の成因を明示し、その除去を通して材料組成、作製プロセス、デバイス構造等の最適化を容易とすることができる発光・受光および電子材料・デバイスの測定ツールに適している。

30

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0040】

【図1】本発明にかかる2つの捕獲準位(エネルギー $E_{T1}$ および $E_{T2}$ )と1つの非発光再結合準位(エネルギー $E_{NT}$ )を持つ半導体のエネルギーバンド図である。

【図2】AGE光で捕獲準位1および2に電子を捕獲させた後、図1における温度 $T_2$ まで昇温すると、捕獲準位2のみに電子が捕獲されている状態を示す説明図である。

【図3】AGE光で全ての捕獲準位に電子を捕獲させる他に、本発明の方法により、特定のBGE光で単一の捕獲準位(たとえば光子エネルギー $E_{exc} = E_{T2}$ で捕獲準位2)のみに選択的に電子を捕獲させる状態を示す説明図である。

40

【図4】本発明の実施例を示す熱励起を加えたフォトルミネッセンスによる禁制帯内準位の測定装置(システム)の構成図である。

【図5】本発明にかかるBGE照射を加えた場合の発光強度の温度依存性を示す図である。

【図6】本発明にかかるBGE照射を加えない場合の発光強度の温度依存性と、各ピークをもたらす捕獲準位のエネルギーを示す図である。

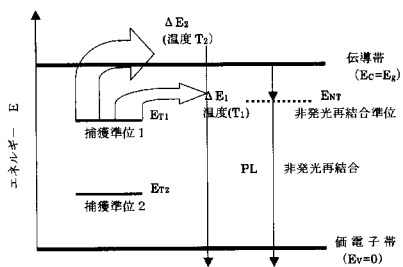
#### 【符号の説明】

#### 【0041】

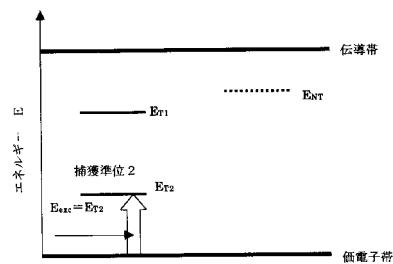
50

- 1 AGE光源
- 2 BGE光源
- 3 試料
- 4 分光器
- 5 光電子増倍管
- 6 デジタルオシロスコープ
- 7 ボックスカー積分器
- 8 コンピュータ
- 9 冷却および加熱装置
- 10 温度制御装置
- 11 温度センサ

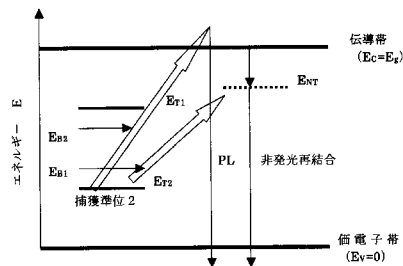
【 図 1 】



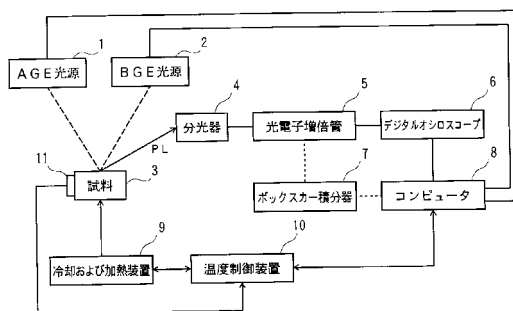
【 図 3 】



【 図 2 】

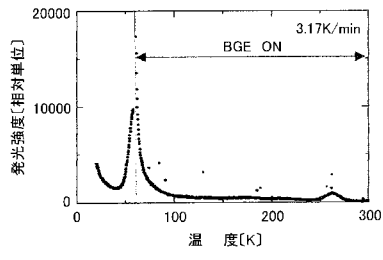


【 図 4 】





【 图 5 】



【 图 6 】

