

(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
2011年8月18日(18.08.2011)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2011/099191 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 22/00 (2006.01) H01L 21/66 (2006.01)
 - (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/065227
 - (22) 国際出願日: 2010年9月6日(06.09.2010)
 - (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 2010-030658 2010年2月15日(15.02.2010) JP
 - (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人東京農工大学(National University Corporation Tokyo University of Agriculture and Technology) [JP/JP]; 〒1838538 東京都府中市晴見町3丁目8番地の1 Tokyo (JP).
 - (72) 発明者; および
 - (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 鮫島 俊之 (SAMESHIMA Toshiyuki) [JP/JP]; 〒1838538 東京都府中市晴見町3丁目8番地の1 国立大学法人東京農工大学内 Tokyo (JP).
 - (74) 代理人: 特許業務法人信友国際特許事務所(Shin-yu International Patent Firm); 〒1510073 東京都渋谷区笹塚1-64-8 笹塚サウスビル Tokyo (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, 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, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, 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))

(54) Title: PHOTOINDUCED CARRIER LIFETIME MEASURING METHOD, LIGHT INCIDENCE EFFICIENCY MEASURING METHOD, PHOTOINDUCED CARRIER LIFETIME MEASURING DEVICE, AND LIGHT INCIDENCE EFFICIENCY MEASURING DEVICE

(54) 発明の名称: 光誘起キャリアライフタイム測定方法、光入射効率測定方法、光誘起キャリアライフタイム測定装置、および光入射効率測定装置

[図3]

FIG. 3A

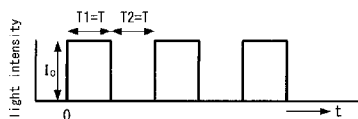


FIG. 3B

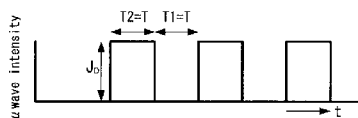
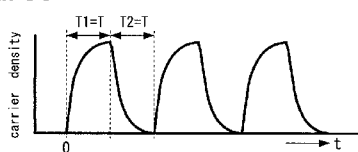


FIG. 3C



(57) Abstract: Disclosed is a photoinduced carrier lifetime measuring method enabling measurement of the effective lifetime of photoinduced carriers in a semiconductor substrate with high accuracy irrespective of the surface state of the sample. A semiconductor substrate is periodically irradiated with a pulse of induction light and with a microwave. The microwave transmitted through the semiconductor substrate or reflected from the semiconductor substrate is detected. On the basis of the irradiation time T1 of the pulse irradiation with the induction light, the nonirradiation time T2, and the integrated value of each microwave intensity measured by the detection, the effective lifetime of the photoinduced carriers produced in the semiconductor substrate when the semiconductor substrate is irradiated with the pulse of the induction light is determined.

(57) 要約: 【課題】半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムを、試料の表面状態によらず高精度に得ることが可能な光誘起キャリアライフタイム測定方法を提供する。【解決手段】半導体基体に対して周期的に誘起光をパルス照射すると共に、当該半導体基体にマイクロ波を照射する。半導体基体を透過するかまたは当該半導体基体で反射した前記マイクロ波を検出する。誘起光のパルス照射に際しての照射時間 T1 および非照射時間 T2 と、前記検出によって得られた各マイクロ波強度の積分値とに基づいて、当該誘起光のパルス照射によって前記半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る。

WO 2011/099191 A1

明 細 書

発明の名称：

光誘起キャリアライフタイム測定方法、光入射効率測定方法、光誘起キャリアライフタイム測定装置、および光入射効率測定装置

技術分野

[0001] 本発明は、光照射によって半導体基体内で発生させた光誘起キャリアの実効ライフタイムを測定する光誘起キャリアライフタイム測定方法、およびこの測定方法を行うための光誘起キャリアライフタイム測定装置に関する。また本発明は、実効ライフタイムから半導体基体の光入射効率を得るための光入射効率測定方法、およびこの測定方法を行うための光入射効率測定装置に関する。

背景技術

[0002] 半導体基体の内部欠陥を評価する指標の1つとして、光誘起キャリアライフタイムが用いられている。光誘起キャリアライフタイムとは、光照射によって半導体基体中に発生させた光誘起キャリア（少数キャリア）のライフタイムである。

[0003] 光誘起キャリアライフタイムを測定するための方法および装置の第1例として、 μ -PCD (microwave photoconductive decay) 法が知られている（例えば、非特許文献1参照）。この方法では、マイクロ波を半導体基体に照射した状態で、レーザー光のパルス照射を極めて短時間行う。このとき、半導体基体に照射しているマイクロ波の反射率が、光パルスによって誘起されたキャリア密度によって変化する。このため、この反射率の時間変化を測定することにより、半導体基体における光誘起キャリアの実効的なライフタイム（以下、実効ライフタイムと記す）が得られる。

[0004] また、半導体基体の光誘起キャリアライフタイムを測定する方法および装置の第2例として、QSSPC (quasi steady state photoconductivity) 法が知られている（例えば、非特許文献2参照）。この方法では、半導体基

体にインダクタンスコイルを直面して配置し、RF周波を印加する。そして、半導体基体にレーザ光のパルス照射を極めて短時間行う。このとき、光パルスによって誘起されたキャリアによって、RF周波数の電磁波が反射される。この反射波の時間変化を、コイルに流れる電流の変化として測定することにより、半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムが得られる。

- [0005] また、半導体基体の光誘起キャリアライフタイムを測定する方法および装置の第3例として、マイクロ波光干渉吸収法が知られている（例えば、非特許文献3参照）。この方法では、導波管で形成したマイクロ波干渉計に半導体基体を挿入し、この半導体基体に対してマイクロ波を照射した状態で連続光を照射する。この際、連続光の照射によって誘起されたキャリアによって、マイクロ波が吸収されるため、マイクロ波の透過率の減少を測定することによって光誘起キャリアの実効ライフタイムが得られる。

先行技術文献

非特許文献

- [0006] 非特許文献1：J. M. Borrego, R. J. Gutmann, N. Jensen, and O. Paz: Solid-State Electron. 30 (1987) 195.
非特許文献2：G. S. Kousik, Z. G. Ling, and P. K. Ajmera: J. App. Phys. 72 (1992) 141.
非特許文献3：T. SAMESHIMA, H. HAYASAKA, and T. HABA, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 021204-1-6.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] 上述の第1例で示した μ -PCD法および第2例で示したQSSPC法は、強い光パルスを半導体基体に照射して、半導体基体中に電子およびホールなどの光誘起キャリアを発生させ、この発生した光誘起キャリアの時間減衰率を測定する方法である。この方法は、簡便であるため広く使用されている

- 。
- [0008] しかしながらこれらの方法は、1回の光パルスで発生させた光誘起キャリアの減衰を、マイクロ波または電磁波の反射率の時間変化として測定する方法であるため、測定の精度を保つには高密度に光誘起キャリアを生成する必要がある。したがって、光誘起キャリアが低密度である場合においての実効ライフタイムを得ることが困難であった。
- [0009] また以上の方法を実施するために開発されている測定システムでは、マイクロ波またはRF電場の試料への入射率の特定、および試料中で発生したキャリアによるマイクロ波の吸収やRF電場の吸収を解析することができない。このため、測定で得られた信号からキャリア密度を算出することができなかった。したがって、精度の高い実効ライフタイムを得ることができなかった。
- [0010] 一方、第3例として上述したマイクロ波光干渉吸収法では、半導体基体に連続光を照射して発生させた光誘起キャリアによるマイクロ波の透過率の変化を測定する方法であって、マイクロ波の透過率はキャリア密度に依存している。このため、 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度の低密度の光誘起キャリアの検出が可能である。
- [0011] つまり、測定されたマイクロ波の透過率から得られた光誘起キャリアのキャリア密度を n とするとき、実効ライフタイム τ_{eff} は、入射光強度 I 、光子エネルギー $h\nu$ 、試料表面反射率 r を用いて下記式(1)で与えられる。
- [0012]
$$\tau_{\text{eff}} = n h \nu / (1 - r) I \dots (1)$$
- [0013] 式(1)からも明らかなように、精密なキャリア密度の測定は、精度良い実効ライフタイムの測定を可能にする。したがって、マイクロ波光干渉吸収法を用いることにより、 $2 \mu\text{s}$ の小さい実効ライフタイムを得ることが可能である。
- [0014] しかしながら、上記式(1)からもわかるように、上述したマイクロ波光干渉吸収法では、半導体基体の表面の試料表面反射率 r が予め求められていなければならない。このため、例えばテクスチャ構造を有するソーラーセルの

ような半導体基板の場合、試料表面反射率 r を決定することはできない。また入射光強度 I も、検出器の信号－光強度変換特性の任意性が残る。

[0015] そこで本発明は、試料となる半導体基体の表面状態によらずに、当該半導体基体の光誘起キャリアの実効ライフタイムを高精度に得ることが可能な光誘起キャリアライフタイム測定方法を提供することを目的とする。また本発明は、この測定方法を実現するための光誘起キャリアライフタイム測定装置を提供することを目的としている。さらに本発明は、この測定方法によって得られた実効ライフタイムから試料に対する光入射効率を得ることが可能な光入射効率測定方法を提供すること、およびこの方法を行う測定装置を提供することを目的としている。

課題を解決するための手段

[0016] このような目的を達成するための本発明の光誘起キャリアライフタイム測定方法は、次の手順で行うことを特徴としている。先ず、半導体基体に対して周期的に誘起光をパルス照射すると共に、当該半導体基体にマイクロ波を照射する。この状態で、半導体基体を透過するかまたは当該半導体基体で反射した前記マイクロ波を検出する。次いで、誘起光のパルス照射に際しての照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 と、検出によって得られたマイクロ波強度の積分値とに基づいて、誘起光によって半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る。

[0017] また本発明の光入射効率測定方法は、以上のようにして得られた実効ライフタイムを用いて、下記式 (2) から光入射効率 $(1-r)$ を求めることを特徴としている。

[数1]

$$n = (1-r)G\tau_{eff} \quad \dots \quad (2)$$

ただし式 (2) 中、 r は表面反射率、 n は光誘起キャリア密度、 G は光強度 (フォトン1個のエネルギー) である。

[0018] このような本発明の光誘起キャリアライフタイム測定方法および光入射効

率測定方法によれば、半導体基体に対して誘起光を周期的にパルス照射した状態で、この半導体基体を透過するかまたは半導体基体で反射したマイクロ波を検出している。このため、誘起光の照射によって半導体基体内に発生した光誘起キャリアが低密度であっても、周期的な複数回のパルス照射毎に検出したマイクロ波強度の積分値を得ることにより、感度の高い測定結果を得ることができる。したがって、微弱な誘起光の照射であっても、感度の高い測定結果を得ることができる。さらに、照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 を変化させて、誘起光を複数回にわたって周期的にパルス照射することで、 T_1 、 T_2 の変化に対するマイクロ波検出強度の積分値の変化が得られ、この変化からもキャリア減衰率を知ることができる。このため、測定対象である半導体基体の表面反射率等の情報を必要とすることなく、光誘起キャリアの実効ライフタイムが得られる。

[0019] また本発明は、上述した本発明の光誘起キャリアライフタイム測定方法を行うための光誘起キャリアライフタイム測定装置でもある。この光誘起キャリアライフタイム測定装置は、光照射光源、マイクロ波発生源、検出部、および演算部を備えている。光照射光源は、試料に光誘起キャリア発生させるための誘起光を照射する。マイクロ波発生源は、試料に照射するマイクロ波を発生する。検出部は、試料を透過するかまたは当該試料で反射したマイクロ波を検出する。演算部は、検出部で検出したマイクロ波の強度に基づいて光誘起キャリアの実効ライフタイムを算出する。このうち光照射光源は、誘起光を周期的にパルス照射するものであることが特徴的である。

[0020] さらに本発明は、上述した本発明の光入射効率測定方法を行うための光入射効率測定装置でもある。この光入射効率測定装置は、上述した光誘起キャリアライフタイム測定装置における演算部が、算出した実効ライフタイムに基づいて、さらに光入射効率を算出するものであることを特徴としている。

発明の効果

[0021] 以上説明したように本発明によれば、試料の表面反射率などの情報を必要とすることなく、微弱な誘起光の照射であっても感度の高いマイクロ波の検

出結果に基づいて実効ライフタイムを得ることが可能である。この結果、例えばテクスチャ構造を有するソーラーセルのような半導体基体であっても、高精度に光誘起キャリアの実効ライフタイムを得ることが可能になる。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]本発明の第1実施形態の光誘起キャリアライフタイムおよび光入射効率の測定装置の概略構成図である。

[図2]本発明の第2実施形態の光誘起キャリアライフタイムおよび光入射効率の測定装置の概略構成図である。

[図3]本発明の第3実施形態を説明する図であり、Aは、光照射光源からの周期的な光照射の例を示す図である。Bは、マイクロ波発生源からの周期的なマイクロ波入射の例を示す図である。Cは、周期的に光照射を行った場合のキャリア密度の時間変化の例を示す図である。

[図4]式(5)を用いて実効ライフタイム τ_{eff} 毎に算出したキャリア密度の比 $\langle n \rangle / n_0$ と T との関係を示す図である。

[図5]実施例1における、 $\langle n \rangle / n_0$ と T との関係を示す図である。

[図6]本発明の第4実施形態を説明するためのフローチャートである。

[図7]本発明の第4実施形態を説明する図であり、Aは、光照射光源からの周期的な光照射の例を示す図である。Bは、マイクロ波発生源からのマイクロ波入射の例を示す図である。Cは、周期的に光照射を行った場合のキャリア密度の時間変化の例を示す図である。

[図8]シリコン基板の少数キャリアがホールである場合の、時間 T に対するキャリア密度の比 $P(T)$ を示す図である。

[図9]シリコン基板の少数キャリアが電子である場合の、時間 T に対するキャリア密度の比 $P(T)$ を示す図である。

[図10]式(9)を用いて算出した実効ライフタイム τ_{eff} と、式(10)から得られる連続光照射におけるライフタイムの理論値との関係を示す図である。

[図11]半導体基体の各領域について算出した実効ライフタイム τ_{eff} の分布図

である。

発明を実施するための形態

[0023] 以下本発明の実施の形態を図面に基づいて、次に示す順に実施の形態を説明する。

1. 第1実施形態「誘起キャリアライフタイム測定装置の構成例」
2. 第2実施形態「光誘起キャリアライフタイム測定装置の構成の変形例」
3. 第3実施形態「光誘起キャリアライフタイム測定方法の第1例」
4. 第4実施形態「光誘起キャリアライフタイム測定方法の第2例」
5. 第5実施形態「光誘起キャリアライフタイム測定方法の第3例」

尚、各実施形態において同一の構成要素には同一の符号を付し、重複する説明は省略する。

[0024] << 1. 第1実施形態 >>

図1に、光誘起キャリアライフタイム測定装置および光入射効率測定装置（以下、光誘起キャリアライフタイム測定装置と記す）の概略構成を示す。この図に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置は、以降の実施形態で説明する光誘起キャリアライフタイム測定方法および光入射効率測定方法に用いるための装置であり、次のように構成されている。

[0025] 光誘起キャリアライフタイム測定装置は、試料となる半導体基体10Aおよび参照用の半導体基体10Bに入射させるマイクロ波を発生するマイクロ波発生源11と、半導体基体10Aにキャリアを発生させるための誘起光を照射する光照射光源12とを備える。また、半導体基体10A、10Bを透過したマイクロ波強度を検出する検出部13Aおよび検出部13Bと、これらの検出部13A、13Bで検出したマイクロ波強度に基づいて光誘起キャリアライフタイムおよび光入射効率を算出する演算部14とを備える。

[0026] 光誘起キャリアライフタイム測定装置は、マイクロ波発生源11と検出器13A、13Bとの間に、マイクロ波干渉計を構成する導波管15を設けている。この導波管15は、マイクロ波発生源11と検出器13A、13Bとの間の中間部分で、対称な2つの導波管15A、15Bに分岐している。分

岐した一方の導波管 15 A には、試料となる半導体基体 10 A が挿入される間隙 16 A が設けられている。また分岐した他方の導波管 15 B には、参照用の半導体基体 10 B が挿入される間隙 16 B が設けられている。間隙 16 A、16 B には、導波管 15 A、15 B の延設方向に対して略垂直に半導体基体 10 A、10 B が挿入される。これらの間隙 16 A、16 B は、導波管 15 A、15 B において対称な位置に配置されている。

[0027] 分岐した導波管 15 A、15 B は、マイクロ波発生源 11 から見た間隙 16 A、16 B の後方で結合している。そして、結合した導波管 15 が再び 2 つに分岐され、分岐した先がそれぞれ検出部 13 A と検出部 13 B とに接続されている。

[0028] これにより図 1 に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置では、マイクロ波発生源 11 から発生したマイクロ波が、導波管 15 内を通り、導波管 15 A、15 B の間隙 16 A、16 B に挿入された半導体基体 10 A、10 B に照射される構成となっている。また、導体基体 10 A、10 B を透過したマイクロ波が、導波管 15 A、15 B を通り、検出器 13 A、13 B のそれぞれに導かれる構成となっている。

[0029] 以上のような構成において、試料となる半導体基体 10 A が挿入される間隙 16 A には、光照射光源 12 からの光を半導体基体 10 A に入射するための導光板 18 が挿入されている。この導光板 18 は、間隙 16 A に挿入される半導体基体 10 A と接するように、半導体基体 10 A が挿入される箇所よりも検出器 13 A、13 B 側（またはマイクロ波発生源 11 側）に配置される。このような導光板 18 は、光ファイバ 17 により光照射光源 12 と接続されている。尚、導光板 18 は、半導体基体 10 A が挿入される箇所の検出器 13 A、13 B 側、およびマイクロ波発生源 11 側の両方に配置されていても良い。

[0030] ここで、マイクロ波発生源 11 は、次に説明する光照射光源 12 からの光照射に同期してマイクロ波を発生させる。

[0031] 光照射光源 12 は、試料となる半導体基体 10 A に対して、周期的に光を

パルス照射して半導体基体にキャリアを発生させる光源からなる。このような光照射光源 12 は、例えば、YAG (Yttrium Aluminum Garnet) レーザ光源からなる。また、YAG レーザ以外にも、発光ダイオード (LED)、キセノンランプ、ハロゲンランプ等の半導体基体に吸収される波長の光 (誘起光) を発する光源、特に 250 nm 以上 2500 nm 以下の波長の光を発する光源であれば限定することなく光源として使用することができる。またこの光照射光源 12 は、光のパルス照射の周期を、例えば照射時間 T_1 = 非照射時間 T_2 とした異なる任意の各周期に変更可能である。例えば、照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 は、0.01 ms ~ 0.1 s の範囲で任意に変更される。

[0032] 検出部 13 A は、試料となる半導体基体 10 A からのマイクロ波透過強度 J_A と、参照用の半導体基体 10 B からのマイクロ波透過強度 J_B との差 I_{A-B} を検出する。また、検出部 13 B は、試料となる半導体基体 10 A からのマイクロ波透過強度 J_A と、参照用の半導体基体 10 B からのマイクロ波透過強度 J_B との和 J_{A+B} を検出する。図 1 に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置では、マイクロ波透過強度 J_A と J_B との差 J_{A-B} および和 J_{A+B} を検出することより検波増幅し、マイクロ波の検出感度を向上させることができる。

[0033] 演算部 14 は、検出部 13 A, 13 B で検出されたマイクロ波透過強度と、および光照射光源 12 で照射する誘起光の周期とに基づいて、間隙 16 A に挿入された半導体基体 10 A における光誘起キャリアのライフタイムおよび光入射効率を算出する。この演算部 14 においては、例えば先ず、上述の非特許文献 3 に記載された方法等を用いることで、周期的な光照射により半導体基体 10 A に発生する光誘起キャリアのキャリア密度を求める。そして、求めたキャリア密度から、光誘起キャリアの実効ライフタイムおよび実効光入射効率を求める。演算部 14 においての実効ライフタイムおよび実効光入射効率の算出手順は、以降の光誘起キャリアライフタイム測定方法で詳細に説明する。

[0034] 尚、上述の図 1 に示す測定装置には、演算部 14 で算出した結果に基づい

て、マイクロ波発生源 11 におけるマイクロ波の照射および光照射光源 12 における誘起光の照射を制御する制御部 19 を設けても良い。

[0035] さらにここでの図示は省略したが、上述の図 1 に示す測定装置には、マイクロ波発生源から発生したマイクロ波を、試料となる半導体基体 10A の一主面を領域分けした各領域に対して選択的に照射するための位置合わせ手段を設けても良い。このような位置合わせ手段としては、例えば、間隙 16A に挿入した半導体基体 10A を、マイクロ波の入射方向に対して垂直方向に自在に移動させることが可能な可動ステージが用いられる。また、このような可動ステージに換えて、間隙 16A に挿入した半導体基体 10A に対して、マイクロ波の入射位置を自在に移動させることが可能なマイクロ波走査手段が用いられる。

[0036] 以上のような図 1 に示す測定装置は、光誘起キャリアライフタイムおよび光入射効率測定装置の一例であり、上述の構成以外でも光誘起キャリアライフタイムおよび光入射効率測定装置を構成することができる。

[0037] 例えば、図 1 に示す測定装置は、導波管 15 を 2 つに分岐して、試料となる半導体基体 10A と参照用の半導体基体 10B との透過率の和および差を利用して高精度にマイクロ波の透過率を求めている構成である。しかしながら、光誘起キャリアライフタイム測定装置は、導波管 15B、および検出部 13B を除いた構成であっても良い。

[0038] この場合の光誘起キャリアライフタイム測定装置は、マイクロ波を発生するマイクロ波発生源 11 と、半導体基体 10 にキャリアを発生させる光を照射する光照射光源 12 と、検出部 13A と、演算部 14 と、分岐を持たない導波管 15 とにより構成される。導波管 15 には、試料となる半導体基体 10A が挿入される間隙が設けられ、この間隙に、光ファイバ 17 によって光照射光源 12 に接続された導光板 18 が挿入されている。このような測定装置において、マイクロ波発生源 11 と光照射光源 12 とは、先に説明した第 1 実施形態の測定装置と同様の構成である。検出部 13A は、試料となる半導体基体 10A からのマイクロ波透過強度 J_A を検出する。演算部 14 は、検出

部 13A で検出されたマイクロ波透過強度 J_A から、半導体基体 10A における、光誘起のキャリア密度、実効ライフタイム、および実効光入射効率を算出する。

[0039] 以上のような第 1 実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定装置によれば、以降に説明する光誘起キャリアライフタイム測定方法および光入射効率測定方法に用いることが可能である。

[0040] << 2. 第 2 実施形態 >>

図 2 に、光誘起キャリアライフタイム測定方法および光入射効率測定装置（以下、光誘起キャリアライフタイム測定装置と記す）の変形例の概略構成を示す。この図に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置が、図 1 で示した第 1 実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定装置と異なるところは、図 1 で示されている導光板 18 に換えて、反射拡散板 18' を設けた構成にあり、他の構成は同様である。

[0041] すなわち図 2 の光誘起キャリアライフタイム測定装置は、導波管 15A の側壁に、小さな穴を備えている。この穴には、光照射光源 12 に接続された光ファイバ 17 の端部が取り付けられ、光照射光源 12 からの光が光ファイバ 17 を介して導波管 15A に導入される構成となっている。この導波管 15A の内部には、反射拡散板 18' が配置されている。この反射拡散板 18' は、光ファイバ 17 からの光を、半導体基体 10A が挿入される間隙 16A 側に向けて拡散させながら反射する。また反射拡散板 18' は、マイクロ波発生源 11 で発生したマイクロ波を透過する。このような反射拡散板 18' は、例えばフッ素樹脂からなる。

[0042] 以上の反射拡散板 18' およびこれに接続された光ファイバ 17 は、導波管 15A において、試料となる半導体基体 10A が挿入される間隙 16A のマイクロ波発生源 11 側および検出器 13A, 13B 側の少なくとも一方に設けられている。

[0043] 上述の図 2 に示した第 2 実施形態の測定装置であっても、図 1 に示した第 1 実施形態の測定装置と同様に、間隙 16A に挿入した半導体基体 10A を

、マイクロ波の入射方向に対して垂直方向に自在に移動させることが可能な可動ステージを備えていても良い。また、このような可動ステージに換えて、間隙16Aに挿入した半導体基体10Aに対して、マイクロ波の入射位置を自在に移動させることが可能なマイクロ波走査手段を備えていても良い。

[0044] さらに、第2実施形態の測定装置であっても、図1に示した第1実施形態の測定装置と同様に、導波管15Bおよび検出部13Bを除いた構成とすることができる。

[0045] 以上のような第2実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定装置であっても、第1実施形態の測定装置と同様に、以降に説明する光誘起キャリアライフタイム測定方法および光入射効率測定方法に用いることが可能である。

[0046] << 3. 第3実施形態 >>

次に、光誘起キャリアライフタイム測定方法の第1例を説明する。以下の説明では、図1または図2に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置を用いて光誘起キャリアの実効ライフタイムを測定する方法、および実効光入射効率を測定する方法を説明する。

[0047] <光誘起キャリアライフタイム測定方法>

まず予め、光誘起キャリアライフタイム測定方法に用いるデータテーブルを、次のようにして作成する。

[0048] まず、試料となる半導体基体10Aにキャリアを発生させるための誘起光の照射条件を設定する。ここでは、例えば図3Aに示すように、光照射光源12から光強度 I_0 の誘起光を、所定周期を持って間歇的にパルス照射させることとする。このような誘起光の周期的なパルス照射において、誘起光の照射時間（パルス幅）を照射時間 T_1 、誘起光の非照射時間（パルス間隔）を非照射時間 T_2 とする。照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 は、半導体における光誘起キャリア（少数キャリア）の実効ライフタイムの値をカバーする時間範囲で設定するのが好適である。一般にシリコン薄膜およびシリコン基板における上記の実効ライフタイムは、 $1\mu\text{s} \sim 0.01\text{s}$ の範囲である。このため、照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 の時間範囲は $1\mu\text{s} \sim 0.0$

1 s 範囲とすることが好ましい。またここでは、照射時間 T_1 = 非照射時間 T_2 とを同じ時間 ($T_1 = T_2$) として設定する。

[0049] また、測定光となるマイクロ波の発生条件を設定する。ここでは、例えば図 3 B に示すように、マイクロ波発生源 11 から、誘起光のパルス照射に同期させて、周期的にマイクロ波を強度 J_0 で入射させることとする。このとき、誘起光の照射時間 T_1 と、マイクロ波の照射時間とが重ならないようにする。つまり、誘起光の照射時間 T_1 においてはマイクロ波を照射せず、誘起光の非照射時間 T_2 においてマイクロ波を照射する。

[0050] 以上のように設定された誘起光のパルス照射においては、誘起光の照射によって半導体基体 10 A に光誘起キャリアが生成され、光照射が終わると誘起された光誘起キャリアのキャリア密度 n がライフタイム τ_{eff} にしたがって減衰する。この減衰は以下の式 (3) で表すことができる。

[0051] [数2]

$$n = n_0 \frac{e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - 1}{e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - e^{-\frac{T_2}{\tau_{eff}}}} e^{\frac{T_1+T_2}{\tau_{eff}}} e^{-\frac{t}{\tau_{eff}}} \quad \dots \quad (3)$$

[0052] 上記式 (3) 中の n_0 は、誘起光の照射を連続的にしたとき、つまり光照射光源 12 からの誘起光の照射を図 3 A に示すような周期的なパルス照射とせず、誘起光を連続照射した場合に半導体基体 10 A に発生する光誘起キャリアのキャリア密度である。

[0053] ここで、半導体基体 10 A に周期的に誘起光をパルス照射した場合のキャリア密度の時間変化の例を図 3 C に示す。この図に示すように、半導体基体 10 A では、誘起光の照射時間 T_1 の間、キャリア密度が増加する。また、誘起光の照射を停止する非照射時間 T_2 の間、キャリア密度が低下する。先に設定したマイクロ波の発生条件では、このようにキャリア密度が低下するときに半導体基体 10 A に対してマイクロ波が入射される。

[0054] 入射したマイクロ波のうち半導体基体 10 A を透過したマイクロ波を検出し、検出したマイクロ波強度に基づいて算出したマイクロ波透過率を積分す

る。この積分によって得られた積分値は、非照射時間 T_2 におけるキャリア密度 n の平均値に対応した値となる。非照射時間 T_2 におけるキャリア密度の平均値は、下記式 (4) で表される。

[0055] [数3]

$$\bar{n} = \frac{1}{T_2} \int_{T_1}^{T_1+T_2} n dt = \frac{n_0 \tau_{eff}}{T_2} \frac{\left(e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - 1 \right) \left(e^{\frac{T_2}{\tau_{eff}}} - 1 \right)}{e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - e^{\frac{T_2}{\tau_{eff}}}} \quad \dots \quad (4)$$

[0056] 上記式 (4) より、キャリア密度 n の積分平均値 (積分値) は、照射時間 T_1 、非照射時間 T_2 、光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} 、および連続光照射時のキャリア密度 n_0 に依存することがわかる。

[0057] ここで、上記式 (4) において、照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 T_2 とを同じ時間 ($T_1 = T_2$) とした場合、キャリア密度 n の平均値は、以下の式 (5) で表される。

[0058] [数4]

$$\langle n \rangle = \frac{n_0 \tau_{eff}}{T_1} \frac{\left(e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - 1 \right) \left(e^{\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - 1 \right)}{e^{-\frac{T_1}{\tau_{eff}}} - e^{\frac{T_1}{\tau_{eff}}}} \quad \dots \quad (5)$$

[0059] そこで上記式 (5) を用いてデータテーブルを作成する。ここでは幾つかの異なる実効ライフタイム τ_{eff} を設定し、上記式 (5) を用いて、照射時間 $T_1 (=$ 非照射時間 $T_2)$ の変化による、キャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ の変化を計算する。そして、実効ライフタイム τ_{eff} 毎に、連続光照射時のキャリア密度 n_0 との比 $\langle n \rangle / n_0$ を求めて照射時間 T_1 に対してプロットする。これにより、図 4 のようなデータテーブルが得られる。

[0060] すなわち、図 4 のデータテーブルは、光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} 毎の、照射時間 $T_1 (=$ 非照射時間 $T_2)$ に対する $\langle n \rangle / n_0$ の関係を示している。縦軸は、非照射時間 T_2 において検出したマイクロ波透過強

度に基づくキャリア密度 $\langle n \rangle$ と、連続光照射時のキャリア密度 n_0 との比 $\langle n \rangle / n_0$ である。横軸は、照射時間 T_1 (ms) (=非照射時間 T_2)を示す。図4では、実効ライフタイム τ_{eff} を 5×10^{-4} (s) から 2.0×10^{-3} (s) まで、 0.5×10^{-4} (s) 毎に設定した。また各実効ライフタイム τ_{eff} 毎に、照射時間 T_1 (=非照射時間 T_2)を、0から3msまで変化させて上記式(5)を用いてキャリア密度 n_0 との比 $\langle n \rangle / n_0$ を算出し、グラフ化している。

- [0061] 図4に示すように、 $\langle n \rangle / n_0$ の最大値は、連続光照射時のキャリア密度 n_0 の0.5倍である。また、 $\langle n \rangle / n_0$ は、ライフタイム τ_{eff} と T_1 に対して規則的な曲線を描く。
- [0062] 次に、図4のデータテーブルを用いることにより、光誘起キャリアの実効ライフタイムが未知の試料において、 $\langle n \rangle / n_0$ と T_1 との関係を求め、図4に示す各実効ライフタイム τ_{eff} の曲線と比較することにより、実効ライフタイムを求める。
- [0063] 具体的には、先ず、図1または図2に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置の導波管15Aの間隙16Aに、試料となる半導体基板10Aを挿入する。この際、半導体基板10Aにおける誘起光の照射面に接するように導光板18を配置するか、または半導体基板10Aにおける誘起光の照射面を反射拡散板18'側に向けて配置する。また、半導体基板10A、10Bは、マイクロ波発生源11に対して同じ向きにして配置する。
- [0064] 次に、光照射光源12から半導体基板10Aに、誘起光を周期的にパルス照射する。誘起光の照射条件は先に設定した条件であり、例えば図3Aに示すように、照射時間 T_1 =非照射時間 T_2 である。
- [0065] また誘起光のパルス照射と同期させて、マイクロ波発生源11から半導体基板10A、10Bにマイクロ波を照射する。マイクロ波の照射条件は、先に設定した条件であり、例えば図3Bに示すように、誘起光のパルス照射に対して逆相とし、誘起光の照射時間 T_1 においてはマイクロ波を照射せず、誘起光の非照射時間 T_2 においてマイクロ波を照射する。

- [0066] この状態で、半導体基体 10A, 10Bを透過したマイクロ波を、検出器 13A, 13Bで検出する。演算部 14では、検出器 13A, 13Bで検出されたマイクロ波透過強度を足し合わせて増幅する。
- [0067] また演算部 14では、誘起光の各非照射期間 T2において検出されるマイクロ波透過強度と、1つ前の非照射期間 T2において検出されたマイクロ波透過強度とを比較する。そして、比較したマイクロ波透過強度の差が所定値以下となったところで、先の図 3Cに示したように、周期的な誘起光のパルス照射間におけるキャリア密度の時間変化が安定したと判断する。
- [0068] キャリア密度が安定したと判断された後、演算部 14では、増幅されたマイクロ波強度に基づいて、マイクロ波透過率を算出してさらに積分値を得る。この積分値は、上述した式(5)で表され、所定の照射時間 T1=非照射時間 T2におけるキャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ となる。尚、マイクロ波透過率の算出には、例えば参照用の半導体基体 10Bのマイクロ波透過率を用いれば良く、この値は予め求めておくこととする。
- [0069] また演算部 14では、以上のようにして得られた所定の照射時間 T1=非照射時間 T2におけるキャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ と、予めの測定によって算出しておいた連続光照射時のキャリア密度 n_0 とから、 $\langle n \rangle / n_0$ と T1の関係を得る。尚、連続光照射時のキャリア密度 n_0 は、上述の図 1に示す測定装置を用いてマイクロ波透過強度を検出し、検出したマイクロ波透過強度の減衰率を解析することによって決定することができる。
- [0070] ここでは、制御部 19によって、図 4のデータテーブルを作成した際に設定した範囲で照射時間 T1=非照射時間 T2を変更する。
- [0071] そして変更した照射時間 T1=非照射時間 T2毎に $\langle n \rangle / n_0$ を算出し、未知の試料に関して算出された $\langle n \rangle / n_0$ と T1の関係を、図 4のデータテーブルに示されているデータにフィティングさせる。これにより、未知の試料の実効ライフタイム τ_{eff} を求める。
- [0072] 以上説明したように、本第 3実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法では、光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} を求めるためのパラメー

タとして、試料となる半導体基体の表面反射率 r が含まれていない。従来のマイクロ波光干渉吸収法では、半導体基体の表面反射率 r が予め求められていなければならない。これに対して、本第3実施形態の光誘起キャリアライフタイムの測定方法では半導体基体の表面反射率を用いることなく、試料となる半導体基体10Aにおける光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} を測定することができる。

[0073] また、試料となる半導体基体に対して、誘起光を周期的にパルス照射しているため、周期的な複数回のパルス照射毎に検出したマイクロ波強度の積分値を得ることにより、感度の高い測定結果を得ることができる。

[0074] したがって、半導体基体の表面の反射率は測定が困難な場合、特に、事実上反射率を決定することができないテクスチャを有するソーラーセル構造においても、光誘起キャリアの実効ライフタイムを高感度に求めることが可能である。また、微弱な誘起光の照射であっても感度の高いマイクロ波の検出結果に基づいて実効ライフタイムを得ることが可能である。

[0075] <光入射効率測定方法>

次に、上述の方法で求められた光誘起キャリアの実効ライフタイムから、半導体基体の実効光入射効率を求める光入射効率測定方法を説明する。

[0076] 先ず、半導体基体中に定常的に存在する光誘起キャリアのキャリア密度 n は、前述した下記式(2)で示すことができる。式(2)において、 r は実効表面反射率、 G は連続的に照射されている光の光強度(フォトン1個のエネルギー)、 τ_{eff} は実効ライフタイムである。ここで実効表面反射率 r とは、試料となる半導体基体の表面における光散乱なども考慮した実際の反射率であり、例えばテクスチャ構造を有する半導体基体の表面における反射率である。

[0077] [数5]

$$n = (1-r)G\tau_{eff} \quad \dots \quad (2)$$

[0078] 上記式(2)において、キャリア密度 n は連続光照射時の値(つまり n_0)

であり、上述の図 1 に示す測定装置を用いてマイクロ波透過強度を検出し、検出したマイクロ波透過強度の減衰率を解析することによって決定することができる。また、フォトンフラックス G は、光照射強度を精密に測定することにより決定することができる。さらに、実効ライフタイム τ_{eff} は、上述の実施の形態の光誘起キャリアライフタイムの測定方法により求めることができる。

[0079] したがって、上述した光誘起キャリアライフタイム測定方法によって得られた実効ライフタイム τ_{eff} に基づいて、上記式 (2) を用いて、試料となる半導体基体 10A における実効光入射効率 $(1-r)$ を求めることができる。

[0080] また、周期的な誘起光の照射の場合において光誘起キャリアのキャリア密度 $\langle n \rangle$ は、上記式 (2) におけるフォトンフラックス G の平均強度を、照射時間 T_1 及び非照射時間 T_2 に応じて下記式 (6) のように変更することによって求めることができる。

[0081] [数6]

$$\langle n \rangle = (1-r) \frac{G T_1}{(T_1 + T_2)} \tau_{eff} \quad \dots \quad (6)$$

[0082] したがって、上記式 (6) を用いることにより、上述した光誘起キャリアライフタイム測定方法によって得られた実効ライフタイム τ_{eff} に基づいて、試料となる半導体基体 10A における実効光入射効率 $(1-r)$ を求めることができる。

[0083] 一般的に、半導体基体等の光反射率は、分光器を用いて光学的に決めることができる。しかし、半導体表面に酸化膜のような透明な異種薄膜が形成されている場合、反射率は光入射角度により大きく変化する。このため従来、実効光反射率を測定するには、光照射光源の試料に対する光入射角度分布を知る必要があった。また、半導体基体表面に凹凸がある場合には、光は乱反射され、反射された光の一部は再び半導体基体に入射する可能性がある。このため、表面に凹凸がある半導体基体では、実効反射率の分光的決定はさ

らに困難であった。

[0084] これに対して以上説明した本実施形態の方法によれば、光誘起キャリアのキャリア密度と、上述の本実施の形態の測定方法により得た光誘起キャリアの実効ライフタイムとを用いることにより、容易に半導体基体の実効光入射効率を決定できる。したがって、本発明の光入射効率測定方法は、複雑な凹凸のテクスチャ構造や複雑な光干渉を有することで表面の光反射率を測定が困難なソーラーセル構造においても、高精度に実効光入射効率を求めることが可能にある。しかも、上述した実効入射効率の測定には、周期的な複数回のパルス照射毎に検出したマイクロ波強度が用いられる。このため、感度の高い測定結果を得ることができる。

[0085] <実施例 1 >

[光誘起キャリアライフタイムの測定]

上述の光誘起キャリアライフタイム測定装置を用い、本第 3 実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法を適用して、半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムを求めた。

[0086] 本実施例 1 では、試料となる半導体基体として、100 nm の熱酸化膜がコーティングされた 525 μm 厚の n 型シリコン基板を用いた。このシリコン基板に、波長 532 nm の誘起光を、強度 20 mW/cm² で連続照射し、光誘起キャリアのキャリア密度 n_0 を求めた。また、同じシリコン基板に、532 nm の誘起光を、強度 20 mW/cm² で周期的にパルス照射し、照射時間 T_1 (=非照射時間 T_2) を変化させたときの、シリコン基板のキャリア密度 $\langle n \rangle$ をそれぞれ求めた。

[0087] 図 5 に、本実施例 1 で求めたキャリア密度の比 $\langle n \rangle / n_0$ と光の照射時間 T_1 との関係を示す。図 5 は、図 4 に示した $\langle n \rangle / n_0$ と T_1 の計算値のデータテーブルに、本実施例 1 で求めた $\langle n \rangle / n_0$ と T_1 との関係を重ねて示した図である。

[0088] 図 4 に示す $\langle n \rangle / n_0$ と T_1 の計算値と、図 5 に示す本実施例の $\langle n \rangle / n_0$ と T_1 の関係との比較により、本実施例 1 で試料として用いたシリコン基

板における光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} は、約 2.2×10^{-4} (s)であることがわかった。

[0089] <実施例 2 >

[光誘起キャリアライフタイムの測定および光入射効率の測定]

上述の光誘起キャリアライフタイム測定装置を用い、本第3実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法を適用して、半導体基体における実効ライフタイムを求め、さらに得られた実効ライフタイムから半導体基体における実効光入射効率を求めた。

[0090] 本実施例2では、試料となる半導体基体として、100 nmの熱酸化膜をコーティングされた525 μ m厚のn型シリコン基板を用いた。このシリコン基板の表面は鏡面研磨されており、裏面は研磨なしのラフ面であり、両面に熱酸化膜がコーティングされている。

[0091] このシリコン基板の鏡面表面と裏面ラフ面に、グリーン光面光源からの波長532 nmの誘起光を、強度 1.8 mW/cm^2 で連続照射し、鏡面表面および裏面ラフ面それぞれのキャリア密度 n_0 を求めた。鏡面表面に対する連続光照射時のキャリア密度 $n_0 = 1.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、裏面ラフ面に対する連続光照射時のキャリア密度 $n_0 = 1.68 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ であった。

[0092] また、同じシリコン基板の鏡面表面と裏面ラフ面に、グリーン光面光源からの波長532 nmの誘起光を、強度 1.8 mW/cm^2 で周期的にパルス照射し、照射時間 T_1 (=非照射時間 T_2)を変化させたときの、シリコン基板のキャリア密度 $\langle n \rangle$ をそれぞれ求めた。

[0093] 図4に示したデータテーブルに、本実施例2で求めたキャリア密度の比 $\langle n \rangle / n_0$ と、光の照射周期 T_1 との関係を重ねて比較し、半導体基体における鏡面表面および裏面ラフ面それぞれに光照射した場合の光誘電キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} を求めた。鏡面表面及び裏面ラフ面のいずれの場合も、実効ライフタイム τ_{eff} は約 4.0×10^{-4} (s)であった。

[0094] 次に、先に算出した鏡面表面に対する連続光照射時のキャリア密度 n_0 (= $1.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) と、測定によって得られたフォトンフラックス $G =$

4. $8.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ と、先に得られた実効ライフタイム τ_{eff} (=約 $4.0 \times 10^{-4} \text{ (s)}$) と、上記式 (6) から、実効入射効率 $(1-r)$ を算出した。この結果、鏡面表面に対する実効光入射効率 $(1-r) = 0.68$ であり、実効的反射率 $r = 0.32$ であった。

[0095] さらに、先に算出した裏面ラフ面に対する連続光照射時のキャリア密度 n_0 (= $1.68 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) と、測定によって得られたフォトンフラックス $G = 4.82 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ と、先に得られた実効ライフタイム τ_{eff} (=約 $4.0 \times 10^{-4} \text{ (s)}$) と、上記式 (6) から、実効入射効率 $(1-r)$ を算出した。この結果、裏面ラフ面に対する実効光入射効率 $(1-r) = 0.87$ であり、実効的反射率 $r = 0.13$ であった。

[0096] 尚、上述の第3実施形態では、マイクロ波透過強度の積分値に対応して得られる非照射時間 T_2 (=照射時間 T_1) におけるキャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ を規格化するために、連続光照射時のキャリア密度 n_0 に対するキャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ の値 $\langle n \rangle / n_0$ を用いた。しかしながら、キャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ は、規格化せずにそのまま用いても良い。また非照射時間 T_2 (=照射時間 T_1) におけるキャリア密度の平均値 $\langle n \rangle$ を、照射時間 T_1 におけるキャリア密度の平均値に対する値として規格化しても良い。この場合、照射時間 T_1 においてもマイクロ波透過強度の測定を行うこととする。

[0097] << 4. 第4実施形態 >>

次に、光誘起キャリアライフタイム測定方法の第2例を説明する。以下の説明では、図1または図2に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置を用いて光誘起キャリアの実効ライフタイムを測定する方法、および光入射効率を測定する方法を、図6のフローチャートを用いて説明する。

[0098] 先ず、図1または図2に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置における導波管15Aの間隙16Aに、試料となる半導体基体10Aを挿入する。この際、半導体基体10Aにおける誘起光の照射面に接するように導光板18を配置するか、または半導体基体10Aにおける誘起光の照射面を反射拡

散板 18' 側に向けて配置する。また、導波管 15B の間隙 16B に、参照用の半導体基板 10B を挿入する。半導体基板 10A, 10B は、マイクロ波発生源 11 に対して同じ向きにして配置することが好ましい。

- [0099] この状態においてステップ S1 では、試料となる半導体基板 10A に対して、光照射光源 12 から誘起光を周期的にパルス照射する。また同時に、試料となる半導体基板 10A および参照用の半導体基板 10B に対して、マイクロ波発生源 11 から測定用のマイクロ波を照射する。
- [0100] 誘起光のパルス照射は、図 7A に示すように、光強度 I_0 で、かつ照射時間 T_1 / 非照射時間 T_2 の周期で行う。この際、照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 $T_2 =$ 時間 T となる所定の時間 T に設定した誘起光のパルス照射を行なう。照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 としては、第 3 実施形態と同様に $0.01 \text{ ms} \sim 0.1 \text{ s}$ の範囲とすることができ、特に $0.01 \text{ ms} \sim 10 \text{ ms}$ の範囲とすることが好ましい。
- [0101] マイクロ波の照射は、図 7B に示すように、強度 J_0 で、かつ誘起光の照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 を通して連続して行われる。ここでは、例えば 9.35 GHz のマイクロ波を用いることとする。
- [0102] 次のステップ S2 では、先のステップ S1 で半導体基板 10A, 10B に照射され、さらにこれらの半導体基板 10A, 10B を透過したマイクロ波を、検出器 13A, 13B で検出する。ここでは、先に説明したように検出器 13A, 13B でのマイクロ波の検出により、検波増幅されたマイクロ波透過強度 J が得られる。
- [0103] 次に、ステップ S3 では、演算部 14 において、先のステップ S2 で得られたマイクロ波透過強度 J と、設定された照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 $T_2 =$ 時間 T とに基づいて、下記式 (7) に示すように光誘起キャリアのキャリア密度の比 $P(T)$ を算出する。ここで算出するキャリア密度の比 $P(T)$ は、照射時間 $T_1 (0 \rightarrow T)$ における平均キャリア密度 N_{on} に対しての、非照射時間 $T_2 (T \rightarrow 2T)$ における平均キャリア密度 N_{off} の比である。

[0104]

[数7]

$$P(T) = \frac{N_{\text{off}}}{N_{\text{on}}} = \frac{\int_T^{2T} (\ln T_{r_0} - \ln T_r) dt}{\int_0^T (\ln T_{r_0} - \ln T_r) dt} \quad \dots (7)$$

T_r : マイクロ波透過率

T_{r_0} : 暗状態でのマイクロ波透過率

[0105] 式(7)において、 T_r はマイクロ波の透過率であり、 T_{r_0} は誘起光をパルス照射するより以前の暗状態におけるマイクロ波の透過率である。これらのマイクロ波透過率 T_r 、 T_{r_0} の算出には、例えば予め求められている参照用の半導体基板10Bのマイクロ波透過率を用いれば良い。また、暗状態におけるマイクロ波透過率 T_{r_0} は、ステップS1からの測定開始前に予め算出されていることとする。

[0106] 尚、演算部14では、以上のような式(7)を用いたキャリア密度の比 $P(T)$ の算出に先立ち、以下のような判断を行うこととする。すなわち、ステップS2で得られるマイクロ波透強度を、誘起光のパルス照射における連続した2つの周期間で比較する。そして、比較したマイクロ波透強度の差が所定値以下となったところで、先の図7Cに示したように、周期的な誘起光のパルス照射間におけるキャリア密度の時間変化が安定したと判断する。その後上記ステップS3の算出を行う。

[0107] 次に、ステップS4では、演算部14において、先のステップS3で算出されたキャリア密度の比 $P(T)$ として、 $P(T) = 0.859$ または $P(T) = 0.615$ が得られたか否かを判断する。 $P(T) = 0.859$ および $P(T) = 0.615$ の両方の結果が得られていない場合にはステップS5に進み、 $P(T) = 0.859$ および $P(T) = 0.615$ の両方の結果が得られた場合のみにステップS6に進む。

[0108] ステップS5では、ステップS1における誘起光の周期的なパルス照射の時間 T (=照射時間 T_1 =非照射時間 T_2)を変更する。ここでは、演算部14において、ステップS3で算出された結果をフィードバックして、 P

(T) = 0.859 または $P(T) = 0.615$ に近づくように時間 T を変更する。

[0109] その後、ステップ S 1 では、ステップ S 5 で変更した時間 T の周期で、試料となる半導体基体 10A に誘起光を周期的にパルス照射すると共に、半導体基体 10A、10B に測定用のマイクロ波を照射する。このような誘起光のパルス照射とマイクロ波の照射とは、演算部 14 において変更された時間 T に基づいて、マイクロ波発生源 11 と光照射光源 12 とを制御することによって行う。このようなマイクロ波発生源 11 および光照射光源 12 の制御は、演算部 14 に接続された制御部 19 によって行われる。

[0110] 以降は、ステップ S 4 において $P(T) = 0.859$ および $P(T) = 0.615$ の両方の結果が得られたと判断されるまで、ステップ S 1 ~ S 5 を繰り返し行う。

[0111] 一方、ステップ S 4 において $P(T) = 0.859$ および $P(T) = 0.615$ の両方の結果が得られたと判断された場合、ステップ S 6 では、下記式 (8) を用いて、光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} を算出する。ただし、 $T(P=0.859)$ は、ステップ S 3 で得られた $P(T) = 0.859$ を与える時間 T である。また $T(P=0.615)$ は、ステップ S 3 で得られた $P(T) = 0.615$ を与える時間 T である。尚、式 (8) については、以降に詳細を説明する。

[0112] [数8]

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_{pulse}}{1 + \log(R)} \quad \dots (8)$$

$$\text{ただし、} \quad \tau_{pulse} = T(P = 0.859)$$

$$R = \frac{T(P = 0.615) - T(P = 0.859)}{T(P = 0.859)}$$

[0113] 以上の第 4 実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法によって得られる実効ライフタイム τ_{eff} は、以下の実施例 3 で説明するように、理論値に

対して整合性良好であることが確認された。

[0114] このような第4実施形態の光誘起キャリアライフタイムの測定方法であっても、試料となる半導体基体の表面反射率 r をパラメータとして用いることなく、光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} が求められる。また、試料となる半導体基体に対して、誘起光を周期的にパルス照射しているため、周期的な複数回のパルス照射毎に検出したマイクロ波強度の積分値を得ることにより、感度の高い測定結果を得ることができる。

[0115] したがって第3実施形態の方法と同様に、半導体基体の表面の反射率は測定が困難な場合、例えば事実上反射率を決定することができないテクスチャを有するソーラーセル構造においても、光誘起キャリアの実効ライフタイムを高感度に求めることが可能である。

[0116] 尚、上述した第4実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法では、ステップS2で得られたキャリア密度の比 $P(T)$ をフィードバックし、 $P(T) = 0.859$ または $P(T) = 0.615$ に近づくように、ステップS4において時間 T を変更した。しかしながら、本第4実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法は、このような手順に限定されることはなく、所定の範囲で時間 T を順次変更しても良い。この場合、順次変更した各時間 T での誘起光の照射で得られたキャリア密度の比 $P(T)$ のなかから、 $P(T) = 0.859$ および $P(T) = 0.615$ を見つけ出し、これらに対応する $T(P = 0.859)$ および $T(P = 0.615)$ を得る。

[0117] <式(8)について>

本第4実施形態で用いた式(8)は、以下のようにして導き出した。

[0118] 半導体基体において、深さ x 、時間 t でのキャリア体積密度 $n(x, t)$ とすると、基板厚 d の半導体基体における単位面積あたりのキャリア密度 $N(t)$ は、下記(9)のように計算される。

[0119] [数9]

$$N(t) = \int_0^d n(x, t) dx \quad \dots (9)$$

[0120] また、先の式（7）のように定義した光誘起キャリアのキャリア密度の比 $P(T)$ は、上記式（9）の単位面積あたりのキャリア密度 $N(t)$ を用いて、下記式（10）のように表される。尚、キャリア密度の比 $P(T)$ は、照射時間 $T_1 (0 \rightarrow T)$ における平均キャリア密度 N_{on} に対しての、非照射時間 $T_2 (T \rightarrow 2T)$ における平均キャリア密度 N_{off} の比である。

[0121] [数10]

$$P(T) = \frac{N_{off}}{N_{on}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^{2T} N(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt} \quad \dots (10)$$

N_{off} : 暗状態の平均キャリア面密度(基板の深さd全体の面密度)

N_{on} : 光照射時の平均キャリア面密度(基板の深さd全体の面密度)

T : 励起光の1パルス当り照射時間(パルス幅)

[0122] ここで、試料となる半導体基体の欠陥がバルク欠陥のみである場合、誘起光照射側の表面再結合速度 $S_{top} = 0$ 、および誘起光照射に対する裏面側の表面再結合速度 $S_{rear} = 0$ である。この場合、照射時間 $T_1 (0 \rightarrow T)$ におけるキャリア密度 N_{on} 、および非照射時間 $T_2 (T \rightarrow 2T)$ における平均キャリア密度 N_{off} は、少数キャリアのバルクライフタイム τ_b を用いて、下記式（11）、（12）のように表される。

[0123] [数11]

$$N(t) = F\tau_b \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}}\right) + F\tau_b \frac{e^{-\frac{T}{\tau_b}}}{1 + e^{-\frac{T}{\tau_b}}} e^{-\frac{t}{\tau_b}} \quad (0 \rightarrow T) \quad \dots (11)$$

$$N(t) = F\tau_b \frac{e^{\frac{T}{\tau_b}}}{1 + e^{\frac{T}{\tau_b}}} e^{-\frac{t}{\tau_b}} \quad (T \rightarrow 2T) \quad \dots (12)$$

τ_b : 少数キャリアのバルクライフタイム

F : キャリア生成率

[0124] 式(11)および式(12)に基づいて、式(10)を書き換えると、下記式(13)が与えられる。

[0125] [数12]

$$P(T) = \frac{N_{off}}{N_{on}} = \frac{\frac{\tau_b}{T} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_b}} \right)}{1 + e^{-\frac{T}{\tau_b}} - \frac{\tau_b}{T} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_b}} \right)} \quad \dots (13)$$

[0126] 上記式(13)において $T = \tau_b$ 、 $T = 2\tau_b$ とすると、下記式(14)および式(15)となる。

[0127] [数13]

$$P(\tau_b) = \frac{e-1}{2} \sim 0.859 \quad \dots (14)$$

$$P(2\tau_b) = \frac{1-e^{-2}}{1+3e^{-2}} \sim 0.615 \quad \dots (15)$$

[0128] 以上の式(14)で表される数値を用い、キャリア密度の比 $P(T)$ が 0.859 のときの照射時間 T_1 (パルス幅) を、下記式(16)で示される τ_{pulse} とした。

[0129] [数14]

$$\tau_{pulse} = T(P=0.859) \quad \dots (16)$$

[0130] また、下記式(17)のように R を定義した。 $P(0.615)$ は、 $P(T) = 0.615$ のときの照射時間 T_1 である。 $T = P(0.859)$ は、 $P(T) = 0.859$ のときの照射時間 T_1 である。

[0131] [数15]

$$R = \frac{T(P=0.615) - T(P=0.859)}{T(P=0.859)} \quad \dots (17)$$

[0132] 以上のようにして定義した τ_{pulse} と R とを用いて、上記式(8)を表した

。

[0133] <光入射効率測定方法>

第4実施形態で説明した測定方法で得られた光誘起キャリアの実効ライフタイムから、半導体基体の実効光入射効率を求める光入射効率測定方法は、第3実施形態において説明したと同様に行われる。

[0134] <実施例3>

[光誘起キャリアライフタイムの測定]

上述の光誘起キャリアライフタイム測定装置を用い、本第4実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法を適用して、半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムを求めた。

[0135] 本実施例3では、半導体基体として、欠陥分布が異なる各シリコン基板について、誘起光の照射時間 T_1 =比照射時間 T_2 =時間 T に対するキャリア密度の比 $P(T)$ を、式(7)を用いて計算により算出した。各シリコン基板は、少数キャリア(光誘起キャリア)のバルクライフタイム τ_b 、誘起光照射側の表面再結合速度 S_{top} 、および誘起光照射に対する裏面側の表面再結合速度 S_{rear} が、それぞれの値に設定されている。これらの値は、半導体基体における各部位(すなわちバルク、誘起光照射側面、およびその裏面)の欠陥の多さを示す値である。

[0136] 図8には、シリコン基板の少数キャリアがホールである場合の、時間 T に対するキャリア密度の比 $P(T)$ を示した。図9には、シリコン基板の少数キャリアが電子である場合の、時間 T に対するキャリア密度の比 $P(T)$ を示した。

[0137] 次に、以上の各欠陥分布を有するシリコン基板について、図8, 9に示すような時間 T -キャリア密度の比 $P(T)$ を解析することにより、第4実施形態で示した上記式(8)を用いて実効ライフタイム τ_{eff} を算出した。図10には、式(8)を用いて算出した実効ライフタイム τ_{eff} と、下記式(18)から得られる光連続照射におけるライフタイムの理論値との関係を示した

。

[0138] [数16]

$$\tau_{eff} = \tau_b \frac{\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\sqrt{D\tau_b}}\right) \right) \left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} + S_{rear} + \left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} - S_{rear} \right) \exp\left(-\frac{d}{\sqrt{D\tau_b}}\right) \right)}{\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} + S_{rear} \right) \left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} + S_{top} \right) - \left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} - S_{top} \right) \left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}} - S_{rear} \right) \exp\left(-\frac{2d}{\sqrt{D\tau_b}}\right)} \quad \dots (18)$$

D: 少数キャリアの拡散係数

τ_b : 少数キャリアのバルクライフタイム

S_{top}: 誘起光照射側の表面再結合速度

S_{rear}: 誘起光照射側と反対側の表面再結合速度

d: 基板厚

[0139] 図10に示すように、本第4実施形態の式(8)を用いて算出した実効ライフタイムは、式(18)に示した光連続照射時における光誘起キャリアのライフタイムと一致している。このことから、本第4実施形態で説明した方法により、半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} が高精度に得られることが確認された。

[0140] 尚、上述の第4実施形態では、キャリア密度の比P(T)として、照射時間T1(0→T)における平均キャリア密度N_{on}に対しての、非照射時間T2(T→2T)における平均キャリア密度N_{off}の比を用いた。しかしながら、キャリア密度の比P(T)がこれに限定されることはなく、例えば、連続照射におけるキャリア密度n₀に対しての、非照射時間T2(T→2T)における平均キャリア密度N_{off}の比であってもよい。この場合、式(8)のRを構成するT(P)は、他の適する値が用いられる。

[0141] << 5. 第5実施形態 >>

次に、光誘起キャリアライフタイム測定方法の第3例を説明する。ここでは、図1または図2に示す光誘起キャリアライフタイム測定装置を用いて、半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムの面分布を測定する方法を説明する。

[0142] 先ず、試料となる半導体基体10Aのマイクロ波の照射面側を、複数の領

域に領域分けする。ここでは例えば、半導体基体 10 A のマイクロ波の照射面側を 1 cm × 0.5 cm の各領域に分割する。

[0143] 次に、分割した各領域毎に、上述した第 3 実施形態または第 4 実施形態の光誘起キャリアライフタイム測定方法を実施し、各領域における光誘起キャリアの実効ライフタイムを測定する。この場合、光誘起キャリアライフタイム測定装置に設けられた可動ステージによって、半導体基体 10 A をマイクロ波の入射方向に対して垂直方向に自在に移動させることで、半導体基体 10 A の各領域に対して選択的にマイクロ波を照射させて測定を行う。または、光誘起キャリアライフタイム測定装置に設けられたマイクロ波走査手段によって、マイクロ波の照射位置を移動させることで、半導体基体 10 A の各領域に対して選択的にマイクロ波を照射させて測定を行う。

[0144] 以上のような第 5 実施形態の光誘起キャリアライフタイムの測定方法により、光誘起キャリアの実効ライフタイムの面分布を得ることが可能である。この面分布の測定には、より高い周波数のマイクロ波を用いることにより、空間分解能の高い測定を行うことが可能である。

[0145] <光入射効率測定方法>

第 5 実施形態で説明した測定方法で得られた光誘起キャリアの実効ライフタイムから、半導体基体の実効光入射効率を求める光入射効率測定方法は、第 3 実施形態において説明したと同様に行われる。

[0146] <実施例 4 >

[光誘起キャリアライフタイムの測定]

図 11 には、半導体基体の各領域について算出した実効ライフタイム τ_{eff} の分布図を示す。測定には、9.35 GHz のマイクロ波を用いた。これにより、空間分解能 1 cm 程度の光誘起キャリアライフタイムの測定が可能であることが確認された。

[0147] 以上説明した第 1 実施形態～第 5 実施形態においては、半導体基体を透過したマイクロ波を検出する測定装置および測定方法を説明した。しかしながら本発明は、半導体基体で反射したマイクロ波を検出する測定装置および測

定方法であっても良い。

[0148] この場合、光誘起キャリアライフタイム測定装置であれば、図1および図2を用いて説明した構成において、検出器13A、13Bの位置を、マイクロ波発生源11が設けられている導波管15から分岐させた位置に配置すれば良い。また光誘起キャリアライフタイム測定方法であれば、上述したマイクロ波透過強度を、マイクロ波反射強度に読み替えれば良い。

[0149] また、上述の各実施形態および実施例においては、照射時間T1と非照射時間T2とが同じ場合について説明しているが、本発明ではT1=T2に限られず、T1およびT2を、それぞれ適宜設定することができる。

[0150] なお、本発明は上述の実施形態例において説明した構成に限定されるものではなく、その他本発明構成を逸脱しない範囲において種々の変形、変更が可能である。

符号の説明

[0151] 10A…半導体基体（試料）、10B…半導体基体（参照用）、11…マイクロ波発生源、12…光照射光源、13A、13B…検出部、14…演算部、15、15A、15B…導波管、16A、16B…間隙、17…光ファイバ、18…導光板、18'…反射拡散板、19…制御部

請求の範囲

- [請求項1] 半導体基体に対して周期的に誘起光をパルス照射すると共に、当該半導体基体にマイクロ波を照射し、
前記半導体基体を透過するかまたは当該半導体基体で反射した前記マイクロ波を検出し、
前記誘起光のパルス照射に際しての照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 と、前記検出によって得られた各マイクロ波強度の積分値とに基づいて、当該誘起光のパルス照射によって前記半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る
光誘起キャリアライフタイム測定方法。
- [請求項2] 前記誘起光のパルス照射は、前記照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 を変更した複数回行い、
前記複数回のパルス照射毎に前記マイクロ波を検出し、
前記各照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 と、前記各検出によって得られた各マイクロ波強度の積分値とに基づいて、前記誘起光によって前記半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る
光誘起キャリアライフタイム測定方法。
- [請求項3] 前記マイクロ波の検出は、前記照射時間 T_1 から分離した前記非照射時間 T_2 において行なう
請求項 2 に記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。
- [請求項4] 前記非照射時間 T_2 において検出したマイクロ波強度の積分値に対応する光誘起キャリア密度と少なくとも前記照射時間 T_1 を含む期間の光誘起キャリア密度の比と、当該照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 との関係から、前記誘起光によって当該半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る
請求項 3 に記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。
- [請求項5] 前記誘起光のパルス照射は、照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 T_2 とした

異なる各周期で行い、

前記非照射時間 T_2 において検出したマイクロ波強度の積分値に基づく光誘起キャリア密度 $\langle n \rangle$ と、前記照射時間 T_1 において検出したマイクロ波強度に基づく光誘起キャリア密度との比 $P(T)$ を算出し、

$P(T) = 0.859$ 、 $P(T) = 0.615$ となる前記照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 T_2 を特定し、

下記式 (8) を用いて実効ライフタイム τ_{eff} を算出する
請求項 4 に記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。

[数17]

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_{pulse}}{1 + \log(R)} \quad \dots (8)$$

ただし、 $\tau_{pulse} = T(P = 0.859)$

$$R = \frac{T(P = 0.615) - T(P = 0.859)}{T(P = 0.859)}$$

[請求項6]

異なる複数の値に仮定した実効ライフタイム毎に、前記照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 T_2 に対して前記光誘起キャリア密度の比をプロットしたデータテーブルを予め用意し、

試料となる半導体基体について、前記誘起光のパルス照射を行い、
前記試料となる半導体基体について検出した前記マイクロ波強度の積分値に基づいて前記光誘起キャリア密度の比を算出し、

前記データテーブルに対して、前記検出に用いた前記照射時間 $T_1 =$ 非照射時間 T_2 と前記算出によって得られた前記光誘起キャリア密度の比とをフィッティングさせることにより、前記試料となる半導体基体における光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る

請求項 4 に記載の光誘起キャリアライフタイムの測定方法。

[請求項7]

前記半導体基体の一主面を領域分けし、当該各領域に対して個別に

前記マイクロ波を照射することにより、当該各領域について前記光誘起キャリアの実効ライフタイムを個別に得る

請求項 1～6 の何れかに記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。

[請求項8] 前記誘起光は、照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 が、0.01ms から 10ms の範囲内で変化する

請求項 1～6 の何れかに記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。

[請求項9] 前記誘起光は、波長 250nm 以上、2500nm 以下である

請求項 1～6 の何れかに記載の光誘起キャリアライフタイム測定方法。

[請求項10] 半導体基体に対して周期的に誘起光をパルス照射すると共に、当該半導体基体にマイクロ波を照射し、

前記半導体基体を透過するかまたは当該半導体基体で反射した前記マイクロ波を検出し、

前記誘起光のパルス照射に際しての照射時間 T_1 および非照射時間 T_2 と、前記検出によって得られた各マイクロ波強度の積分値とに基づいて、当該誘起光のパルス照射によって前記半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイム τ_{eff} を得た後、

下記式 (2) から光入射効率 $(1-r)$ を求める

光入射効率測定方法。

[数18]

$$n = (1-r)G\tau_{eff} \quad \dots \quad (2)$$

ただし式中、 r は表面反射率、 n は光誘起キャリアのキャリア密度、 G は光強度 (フォトン 1 個のエネルギー) である。

[請求項11] 前記キャリア密度は、前記非照射時間 T_2 において検出したマイクロ波強度の積分値に基づいて求められる

請求項 10 に記載の光入射効率測定方法。

[請求項12] 試料に光誘起キャリアを発生させるための誘起光を照射する光照射光源と、

前記試料に照射するマイクロ波を発生するマイクロ波発生源と、

前記試料を透過するかまたは当該試料で反射した前記マイクロ波を検出する検出部と、

前記検出部で検出したマイクロ波の強度に基づいて光誘起キャリアの実効ライフタイムを算出する演算部とを備え、

前記光照射光源は、前記誘起光を周期的にパルス照射する

光誘起キャリアライフタイム測定装置。

[請求項13] 前記光照射光源は、照射時間 T_1 = 非照射時間 T_2 とした異なる各周期で、前記誘起光を照射する

請求項 12 記載の光誘起キャリアライフタイム測定装置。

[請求項14] 前記マイクロ波発生源から発生したマイクロ波を、前記試料の一主面を領域分けした各領域に対して選択的に照射するための位置合わせ手段を備えた

請求項 12 または 13 に記載の光誘起キャリアライフタイム測定装置。

[請求項15] 試料に光誘起キャリアを発生させるための誘起光を照射する光照射光源と、

前記試料に照射するマイクロ波を発生するマイクロ波発生源と、

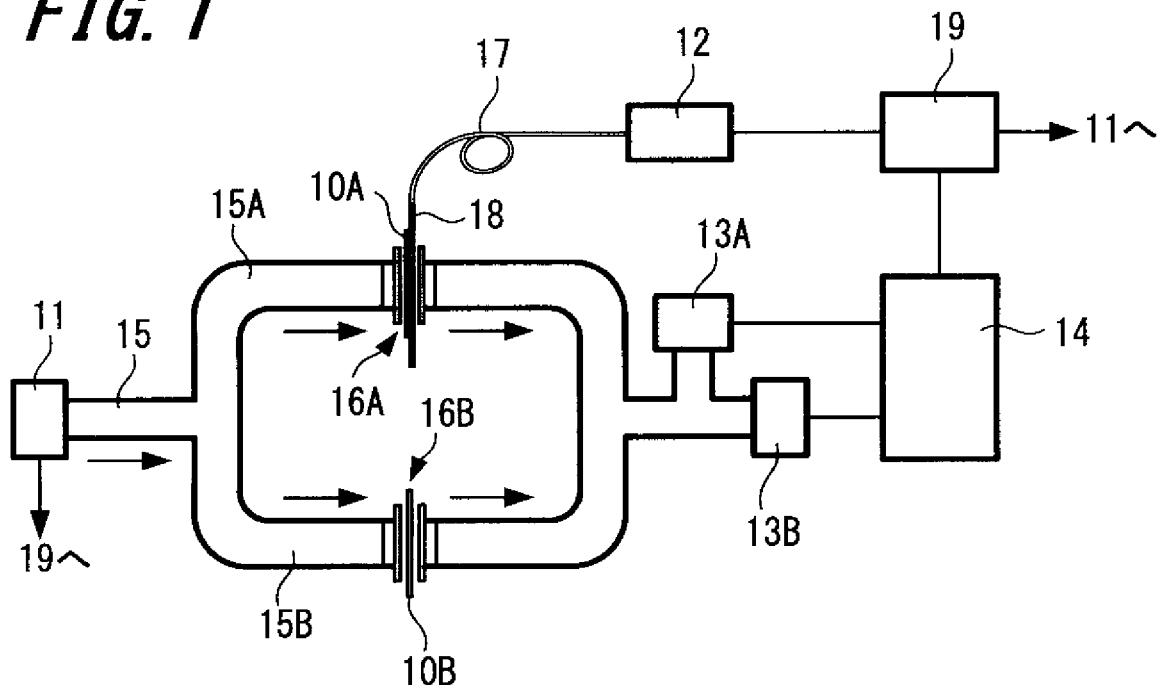
前記試料を透過するかまたは当該試料で反射した前記マイクロ波を検出する検出部と、

前記検出部で検出したマイクロ波の強度に基づいて光誘起キャリアの実効ライフタイムを算出し、当該実効ライフタイムに基づいて光入射効率を算出する演算部とを備え、

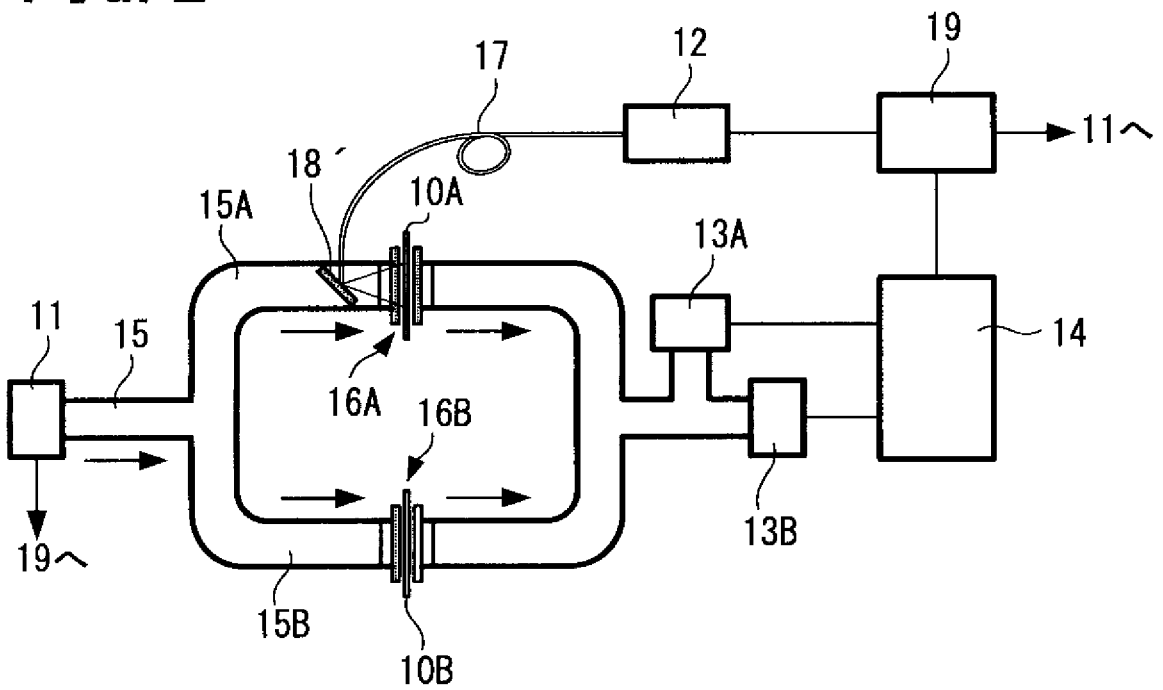
前記光照射光源は、前記誘起光を周期的にパルス照射する

光入射効率測定装置。

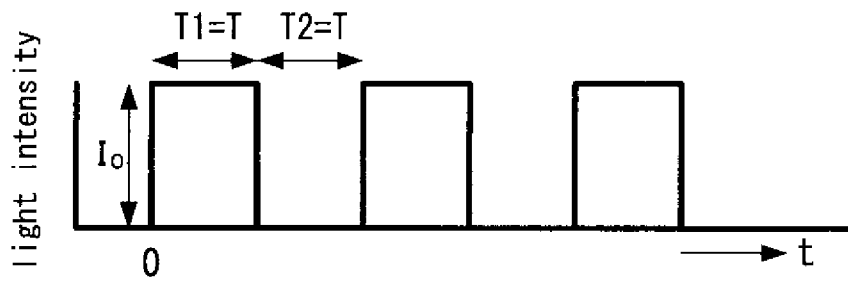
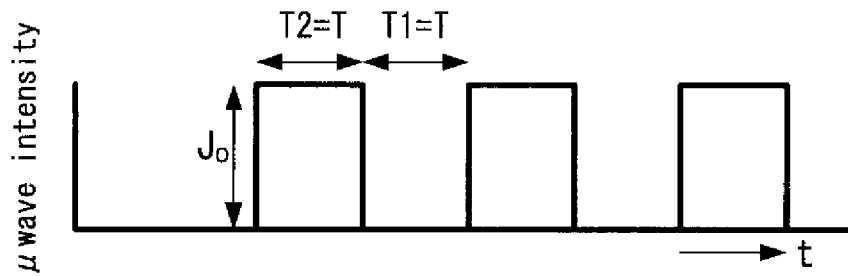
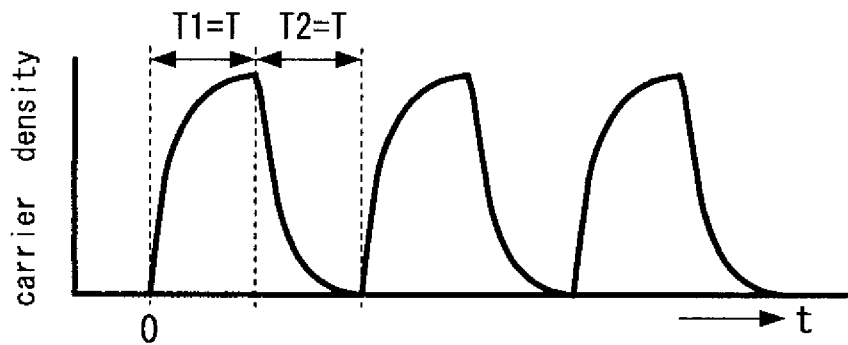
[図1]

FIG. 1

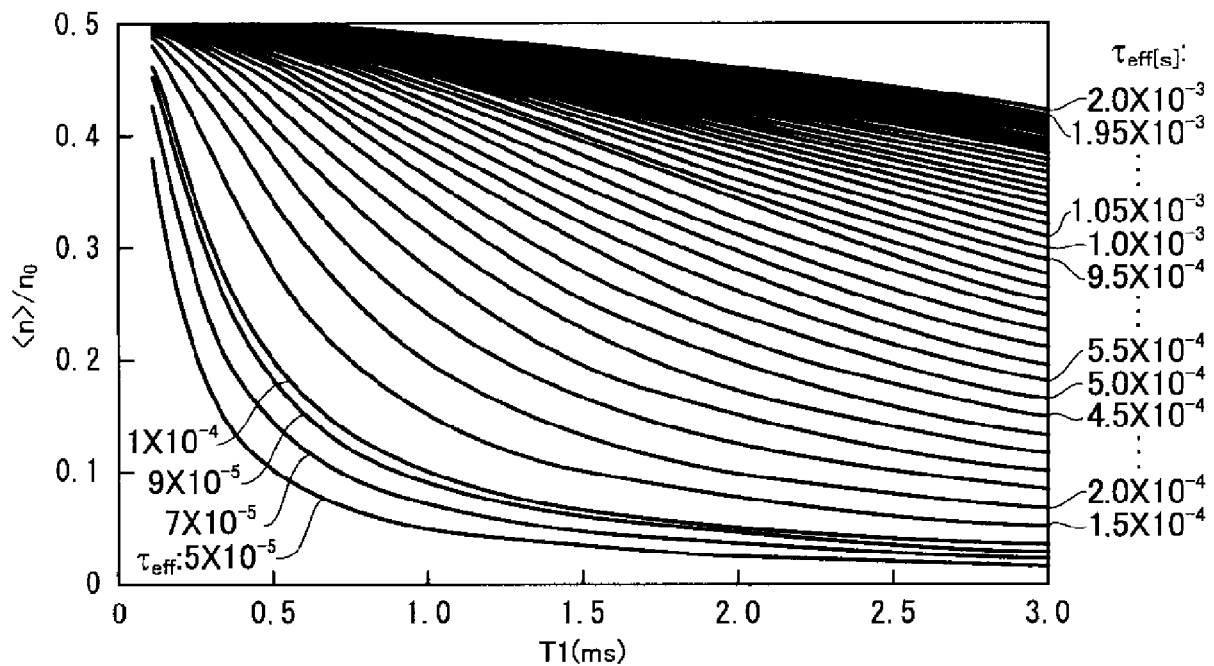
[図2]

FIG. 2

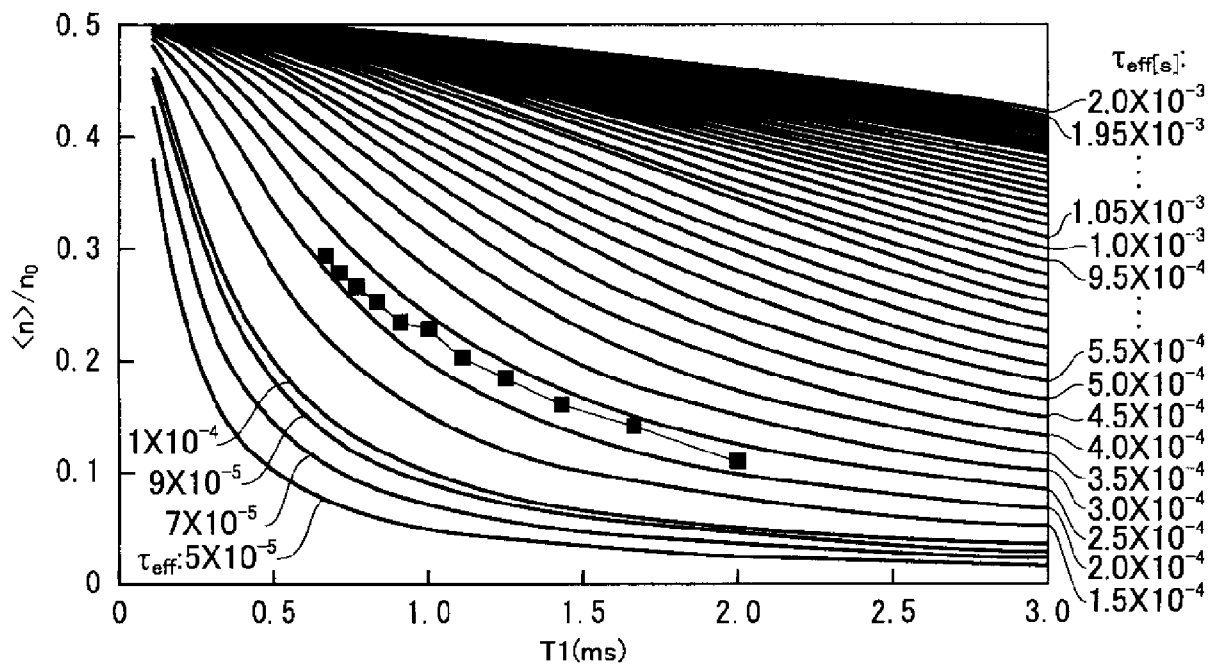
[図3]

FIG. 3A**FIG. 3B****FIG. 3C**

[図4]

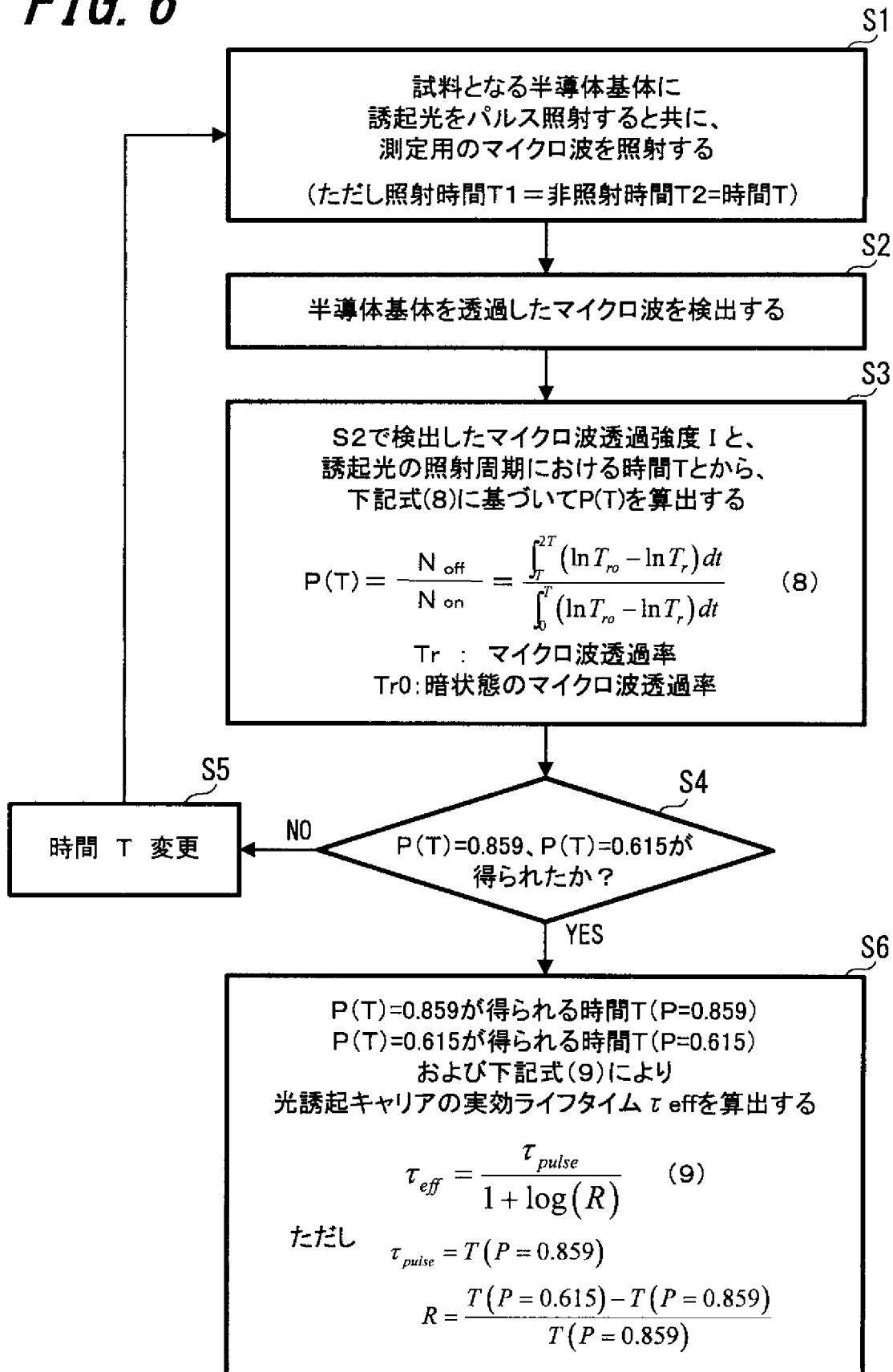
FIG. 4

[図5]

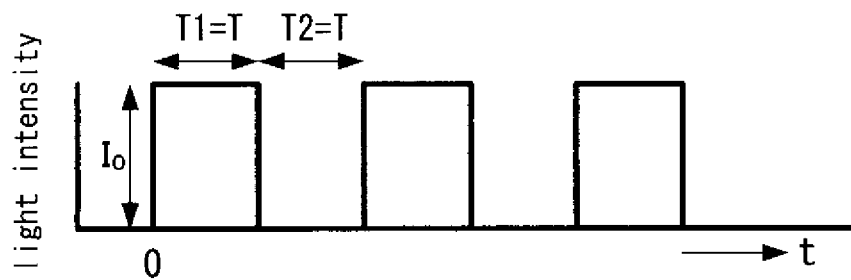
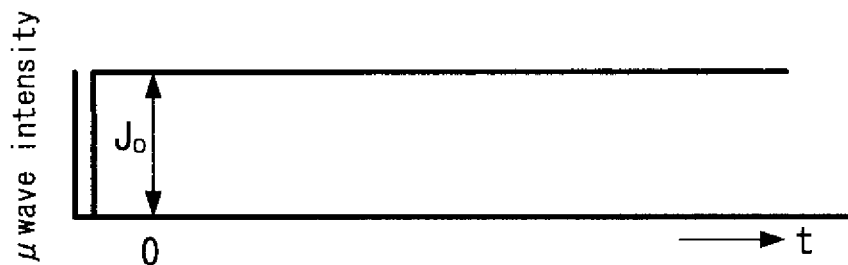
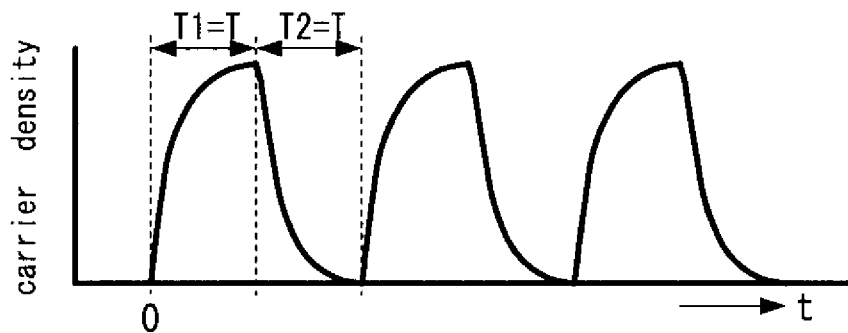
FIG. 5

[図6]

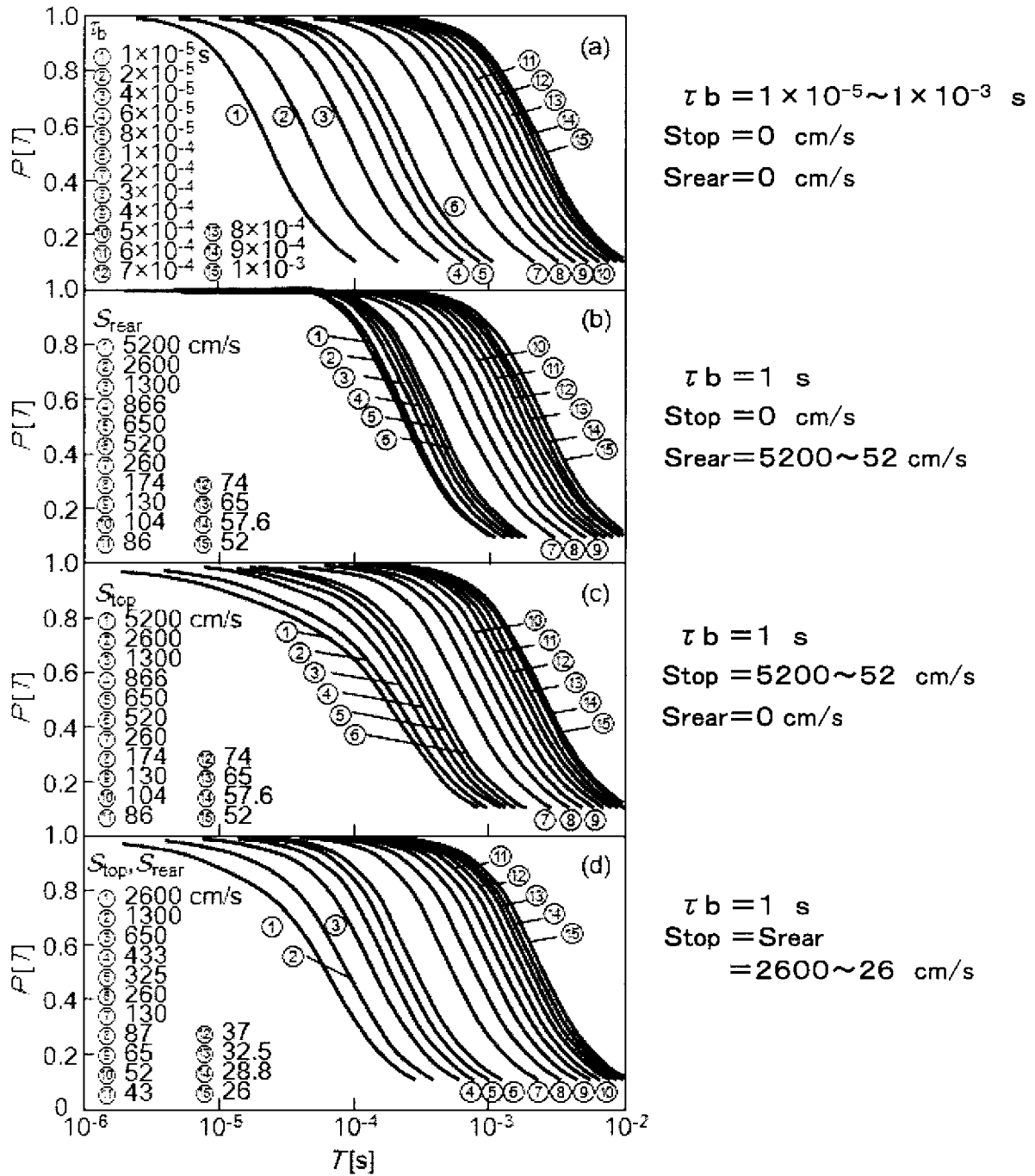
FIG. 6



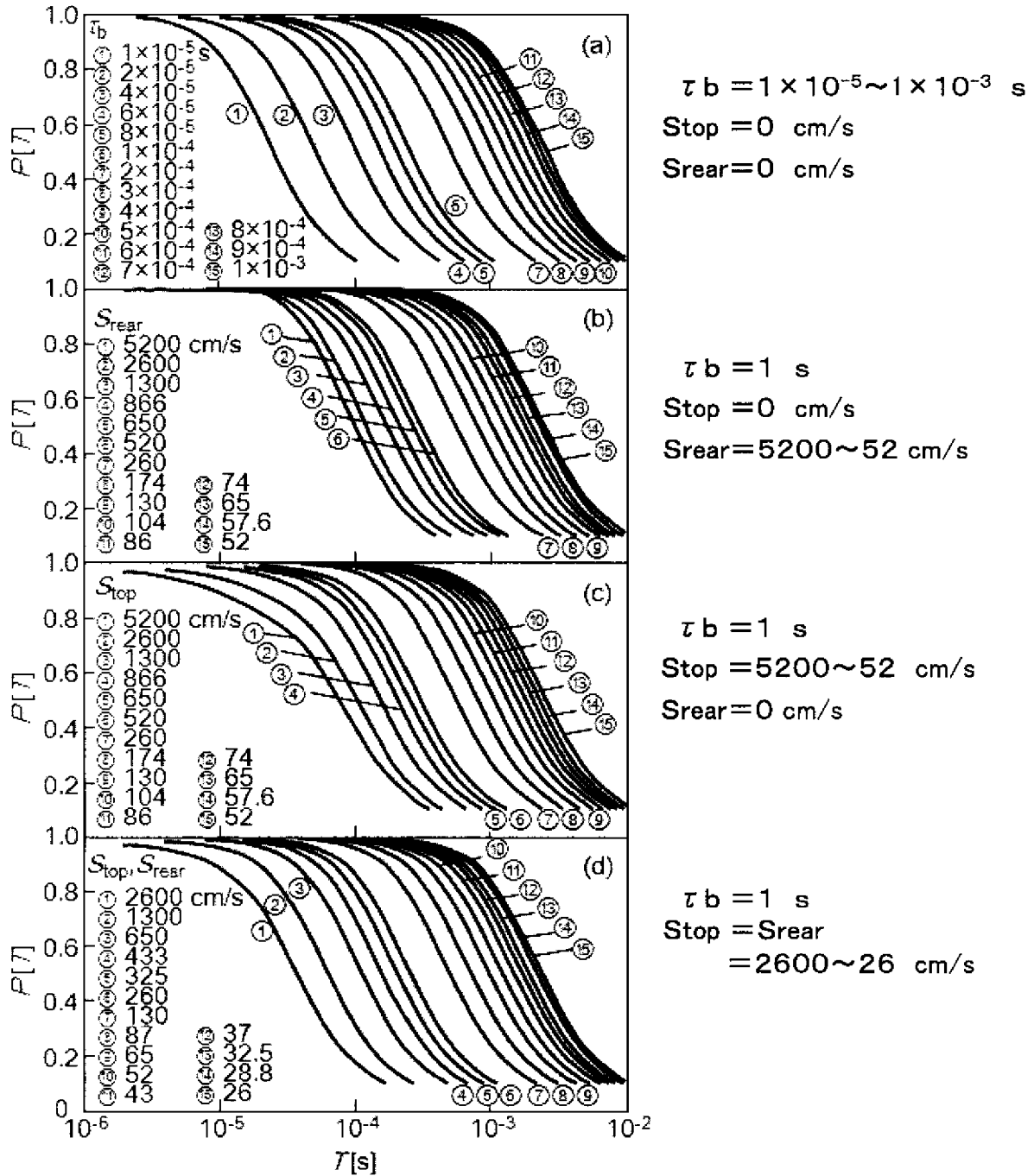
[図7]

FIG. 7A**FIG. 7B****FIG. 7C**

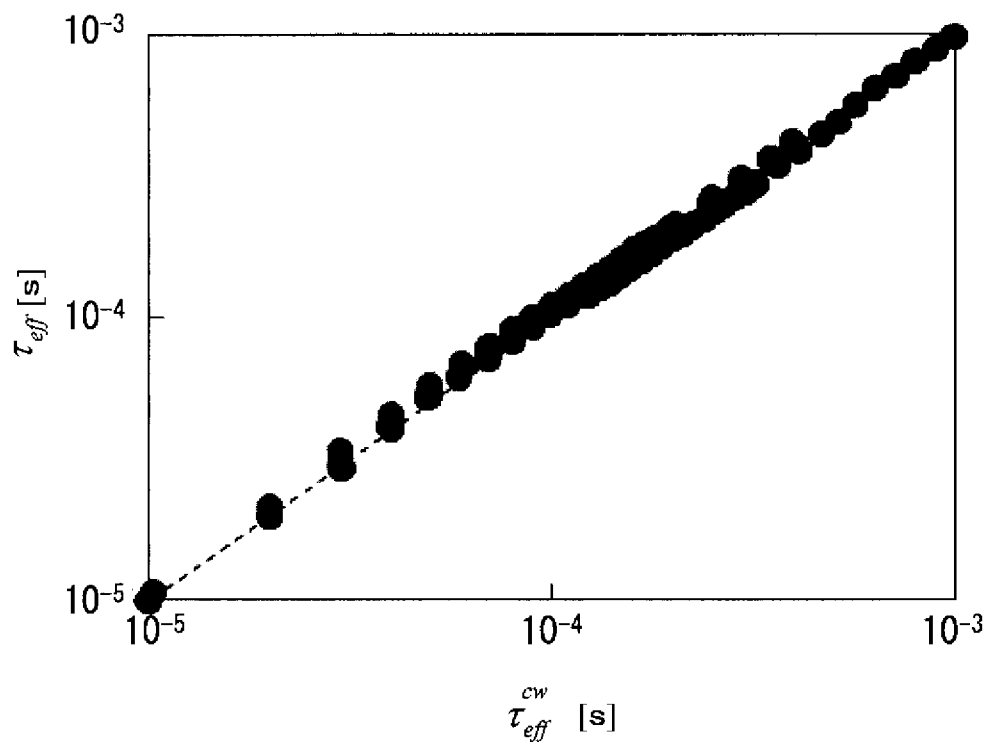
[8]

FIG. 8

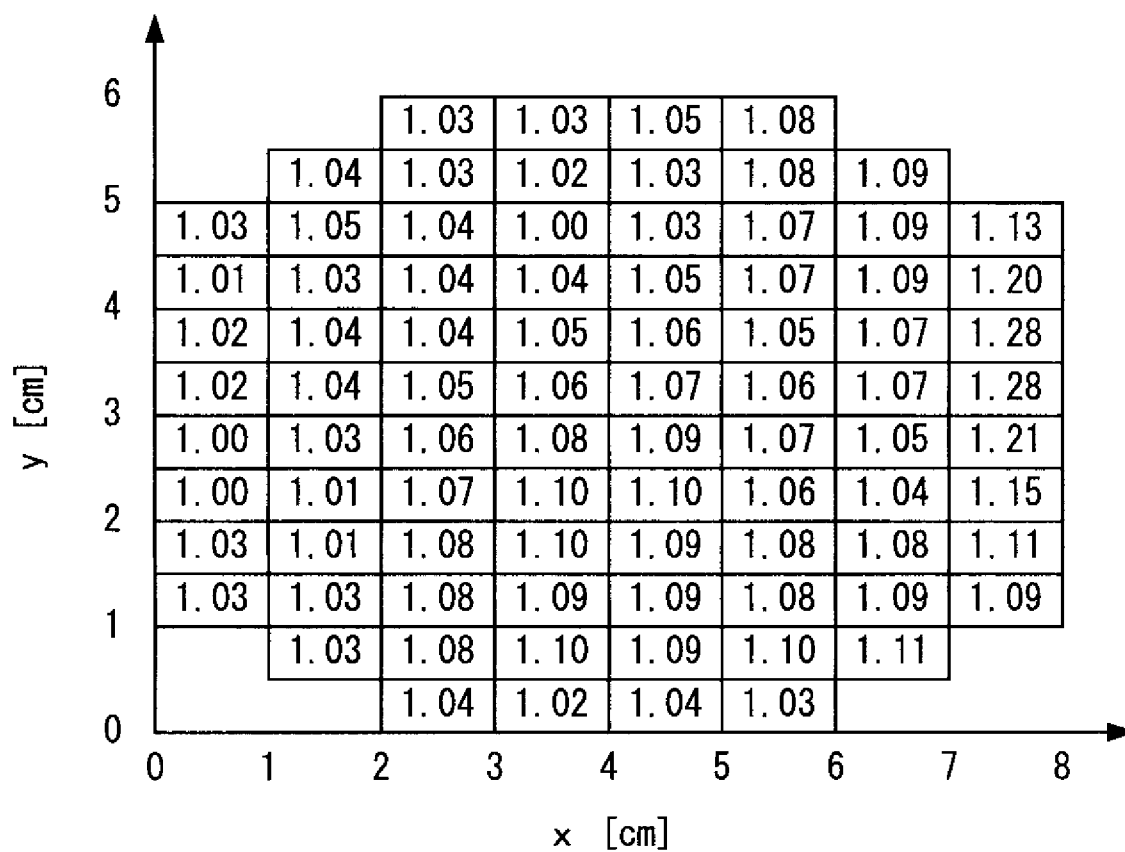
[9]

FIG. 9

[10]

FIG. 10

[11]

FIG. 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065227

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N22/00(2006.01) i, H01L21/66(2006.01) 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)

G01N22/00-G01N22/04, H01L21/64-H01L21/66

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	1996-2010
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2010	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2010

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

JSTPlus (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X <u>Y</u> A	JP 2007-27288 A (Kobe Steel, Ltd.), 01 February 2007 (01.02.2007), claim 1; paragraph [0013]; fig. 3 (Family: none)	12, 14 <u>13, 15</u> 1-11
Y <u>A</u>	JP 59-55013 A (Mitsubishi Metal Corp.), 29 March 1984 (29.03.1984), page 2, lower right column, line 15 to page 4, upper left column, line 2 (Family: none)	13, 15 <u>1-12, 14</u>
A	T.Sameshima et al., Analysis of Microwave Absorption Caused by Free Carriers in Silicon, Jpn.J.App.Phys, 2009.02.25, Vol.48, No.2, P.021204.1-021204.6	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
13 October, 2010 (13.10.10)Date of mailing of the international search report
26 October, 2010 (26.10.10)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065227

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Shingo SUMIE et al., "Detection of Heavy Metal Contamination in Semiconductor Processes Using a Carrier Lifetime Measurement System", Kobe Steel Engineering Reports, 01 September 2002 (01.09.2002), vol.52, no.2, pages 87 to 93	1-15
A	P.A.Borodovskii et al., Determination of the Minority-Carrier Lifetime in Silicon Ingots by Photoconductivity Relaxation Measured at Microwave Frequencies, Semiconductors, 2004.09.30, Vol.38, No.9, P.1005-1011	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065227

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

The inventions of the individual claims of claim 1, claim 10, claim 12 and claim 15 have a common technical feature "that a semiconductor base is periodically pulse-irradiated with an induced light, that said semiconductor base is irradiated with microwaves, that said microwaves which have passed through said semiconductor base or which have been reflected on said semiconductor base are detected, - - -, and that the effective lifetime of light-induced carriers which were produced in said semiconductor base by the pulse irradiation of said induced light is obtained on the basis of - - - of the microwave intensity - - - which was obtained by said detection". (continued to extra sheet)

1. As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065227

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

In the light of the disclosed contents of document 1 (JP 2007-27288 A (Kobe Steel, Ltd.), 1 February 2007 (01.02.2007), claim 1, [0013], fig. 3), however, the aforementioned technical feature makes no contribution over the prior art so that said technical feature cannot be special. Among those inventions, moreover, there exists no other same or corresponding special technical features. Hence, this international patent application contains the two or more inventions, as follows.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N22/00(2006.01)i, H01L21/66(2006.01)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. G01N22/00-G01N22/04,
H01L21/64-H01L21/66

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	1971-2010年
日本国実用新案登録公報	1996-2010年
日本国登録実用新案公報	1994-2010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)

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
X Y A	JP 2007-27288 A (株式会社神戸製鋼所) 2007.02.01, 請求項 1, 【0013】, 図3 (ファミリーなし)	12, 14 <u>13, 15</u> 1-11
Y A	JP 59-55013 A (三菱金属株式会社) 1984.03.29, 第2頁右下欄第15行-第4頁左上欄第2行 (ファミリーなし)	13, 15 <u>1-12, 14</u>

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

13. 10. 2010

国際調査報告の発送日

26. 10. 2010

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
 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)

比嘉 翔一

2W

4005

電話番号 03-3581-1101 内線 3292

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
A	T. Sameshima, 外 2 名, Analysis of Microwave Absorption Caused by Free Carriers in Silicon, Jpn. J. App. Phys, 2009. 02. 25, Vol. 48, No. 2, P. 021204. 1-021204. 6	1-15
A	住江伸吾, 外 1 名, 半導体プロセスにおける重金属汚染の検出ーキャリアライフタイム測定装置ー, 神戸製鋼技報, 2002. 09. 01, Vol. 52, No. 2, P. 87-93	1-15
A	P. A. Borodovskii, 外 2 名, Determination of the Minority-Carrier Lifetime in Silicon Ingots by Photoconductivity Relaxation Measured at Microwave Frequencies, Semiconductors, 2004. 09. 30, Vol. 38, No. 9, P. 1005-1011	1-15

第II欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. 請求項 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、

2. 請求項 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、

3. 請求項 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第III欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求項1、請求項10、請求項12、請求項15の各請求項に係る発明は、「半導体基体に対して周期的に誘起光をパルス照射すると共に、当該半導体基体にマイクロ波を照射し、前記半導体基体を透過するかまたは当該半導体基体で反射した前記マイクロ波を検出し…前記検出によって得られた…マイクロ波強度…に基づいて、当該誘起光のパルス照射によって前記半導体基体に発生した光誘起キャリアの実効ライフタイムを得る」という共通の技術的特徴を有している。しかしながら当該技術的特徴は、文献1（JP 2007-27288 A（株式会社神戸製鋼所）2007.02.01、請求項1、【0013】、図3）の開示内容に照らして、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、当該技術的特徴は特別な技術的特徴とはいえない。また、これらの発明の間には、他に同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。したがって、この国際出願には、二以上の発明が含まれる。

1. 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2. 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4. 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。