

(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 10 月 6 日(06.10.2011)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2011/122281 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 21/21 (2006.01) G01N 21/35 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/055582
- (22) 国際出願日: 2011 年 3 月 10 日(10.03.2011)
- (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 2010-077018 2010 年 3 月 30 日(30.03.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社村田製作所 (Murata Manufacturing Co., Ltd.) [JP/JP]; 〒6178555 京都府長岡京市東神足 1 丁目 1 0 番 1 号 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 松本直樹 (MATSUMOTO Naoki) [JP/JP]; 〒6178555 京都府長岡京市東神足 1 丁目 1 0 番 1 号 株式会社村田製作所内 Kyoto (JP). 矢次健一 (YATSUGI Kenichi) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 2-6 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 長

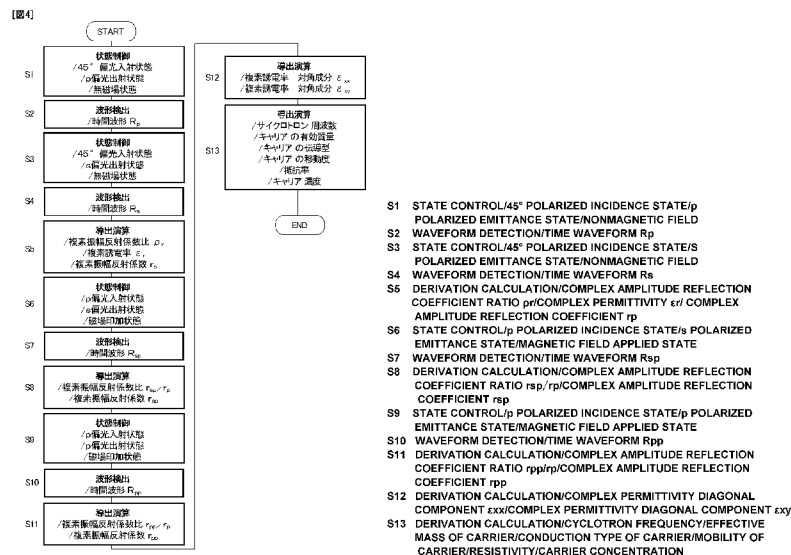
島健 (NAGASHIMA Takeshi) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 2-6 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP).

- (74) 代理人: 特許業務法人 楓国際特許事務所 (Kaede Patent Attorneys' Office); 〒5400011 大阪府大阪市中央区農人橋 1 丁目 4 番 3 4 号 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, 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

[続葉有]

(54) Title: TERAHERTZ RADIATION ANALYSIS DEVICE AND METHOD OF ANALYZING TERAHERTZ RADIATION

(54) 発明の名称: テラヘルツ分光分析装置およびテラヘルツ分光分析方法



(57) Abstract: Provided is a method of analyzing terahertz radiation capable of deriving the physical properties of materials for a semiconductor without using special additional facilities. In the method of analyzing terahertz radiation, pulse light is irradiated onto a sample when a magnetic field is being applied, and time waveforms (R_{sp}, R_{mp}) of reflected waves reflected from the sample are detected (S6 to S7, S9 to S10). Also, pulse light is irradiated onto the sample when no magnetic field is being applied, and time waveforms (R_p, R_s) of reflected waves reflected from the sample are detected (S1 to S2, S3 to S4). Further, based on the time waveforms (R_p, R_s, R_{sp}, R_{mp}) the diagonal component (ε_{xx}) and the non-diagonal component (ε_{xy}) of a complex permittivity tensor are derived when a magnetic field is being applied to the sample (S5, S8, S11 to S12). Thereby, the physical properties of materials for a sample are derived (S13), which includes the diagonal component (ε_{xx}) and the non-diagonal component (ε_{xy}) as parameters.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2011/122281 A1



(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))

特殊な追加設備を用いずに、半導体の材料物性値を導出できるテラヘルツ分光分析方法を提供する。テラヘルツ分光分析方法では、磁場印加状態の試料に対してパルス光を照射し、試料に反射された反射波の時間波形 R_{sp} 、 R_{pp} を検出する (S 6 ~ S 7, S 9 ~ S 10)。また、無磁場状態の試料に対してパルス光を照射し、試料に反射された反射波の時間波形 R_p 、 R_s を検出する (S 1 ~ S 2, S 3 ~ S 4)。また、時間波形 R_p 、 R_s 、 R_{sp} 、 R_{pp} に基づいて、試料の磁場印加状態での複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} および非対角成分 ϵ_{xy} を導出する (S 5, S 8, S 11 ~ S 12)。そして、対角成分 ϵ_{xx} および非対角成分 ϵ_{xy} をパラメータに含む試料の材料物性値を導出する (S 13)。

明 細 書

発明の名称：

テラヘルツ分光分析装置およびテラヘルツ分光分析方法

技術分野

[0001] この発明は、テラヘルツ光を用いて、試料の材料物性を分析するテラヘルツ分光分析装置、およびテラヘルツ分光分析方法に関するものである。

背景技術

[0002] テラヘルツ周波数領域のパルス光を用いたテラヘルツ時間領域分光分析法では、フェムト秒オーダーのパルス幅でテラヘルツ周波数領域のパルス光を試料に照射し、試料で透過または反射した光の光応答特性から、試料の複素誘電率や電気伝導度を分析する。

[0003] 半導体を試料とする場合、テラヘルツ光に対してフリーキャリアによるドルーデ型の吸収が生じる。このため、光応答特性からドルーデモデルを用いて半導体の各種材料物性値、例えば、キャリア濃度、移動度などを導出することが可能である（例えば非特許文献 1 参照）。半導体の材料物性値の測定に従来から用いられていたホール測定法では、半導体試料に電極形成を行う必要があり、サンプル試料に対する測定しかできなかった。一方、テラヘルツ光の応答特性を用いるテラヘルツ分光分析では電極形成などの前プロセスが不要であり、半導体製品の材料本体を非接触、非破壊で試験することが可能になる。

[0004] ただし、非特許文献 1 のような従来の手法は、光応答特性を用いて分光分析を行うとともに、半導体キャリアの有効質量 m^* を推定する必要があった。具体的には、有効質量 m^* は、例えば GaAs を試料とする場合キャリア濃度によって変化するため、既知のキャリア濃度と有効質量 m^* との関係に基づいて最適なものを選択（フィッティング）し、用いていた。

[0005] なお、有効質量 m^* は、フォトルミネッセンス（PL）法を用いた測定方法（例えば非特許文献 2 参照）や、静磁場を印加した際にキャリアが加速され

る角回転速度、サイクロトロン周波数を測定し導出する方法（例えば非特許文献3、特に文献211～212頁参照）などにより、測定可能である。

先行技術文献

非特許文献

[0006] 非特許文献1：P. G. Huggard, et. al., “Drude conductivity of highly doped GaAs at terahertz frequencies, Journal of Applied Physics. 87, 2382 (2000) .

非特許文献2：D. M. Szmyd, et. al., “Heavily doped GaAs: Se. I. Photoluminescence determination of the electron effective mass, Journal of Applied Physics. 68, 2367 (1990) .

非特許文献3： Kittel 固体物理学入門第8版，丸善，2005

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 既知のキャリア濃度と有効質量 m^* との関係に基づいて有効質量 m^* を仮定する非特許文献1の方法は、キャリア濃度と有効質量 m^* との関係が未知の材料に対して材料物性値を測定することが困難である。また、仮定した有効質量 m^* が実際の値から乖離して誤差が含まれることがある。

[0008] フォトルミネッセンス（PL）法を用いて有効質量 m^* を直接測定する非特許文献2の方法は、所謂バンド理論を熟知した者でなければ測定・解析が困難であり、テラヘルツ分光分析の設備とは別の特殊な追加設備で、PL測定を行う必要がある。

[0009] サイクロトロン周波数を用いて有効質量 m^* を直接測定する非特許文献3の方法は、エネルギー共鳴吸収を明確に観測する必要があり、液体ヘリウムにより試料を冷却し、テスラオーダーの超強力磁石を用いて高磁場を発生させ

る必要がある。このためテラヘルツ分光分析の設備とは別の特殊な追加設備を要する。

- [0010] 本発明は、有効質量 m^* の仮定を用いずに、また簡易な設備で、半導体の材料物性値を導出できるテラヘルツ分光分析方法、および半導体の材料物性値の導出に係る様々な条件での光応答特性の検出を一括して行えるテラヘルツ分光分析装置の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

- [0011] 請求項 1 に係る発明のテラヘルツ分光分析方法は、磁場印加測定ステップ、無磁場測定ステップ、複素誘電率テンソル導出ステップ、および材料物性値導出ステップを実施する。磁場印加測定ステップは、磁場印加状態の試料に対してテラヘルツ周波数領域のパルス光を照射し、前記試料にて反射された反射波の時間波形を検出するステップである。無磁場測定ステップは、無磁場状態の前記試料に対してテラヘルツ周波数領域のパルス光を照射し、前記試料にて反射された反射波の時間波形を検出するステップである。複素誘電率テンソル導出ステップは、前記磁場印加測定ステップおよび前記無磁場測定ステップで検出した時間波形に基づいて、前記試料の磁場印加状態での複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を導出するステップである。材料物性値導出ステップは、前記複素誘電率テンソル導出ステップで導出した前記複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分をパラメータに含む試料の材料物性値を導出するステップである。

- [0012] この方法で導出される複素誘電率テンソルの非対角成分は、無磁場状態では存在せず、磁気光学効果によって発生し、その誘電関数はサイクロトロン周波数を含むものとなる。前述のようにサイクロトロン周波数は有効質量に依存するので、複素誘電率テンソルの非対角成分を測定することにより有効質量の値を直接求めることができる。この磁気光学効果を利用するために請求項 1 に係る発明は、試料に対して磁場印加状態と無磁場状態とでパルス光を照射して反射波の時間波形を測定する。このようにして測定した時間波形からは、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を導出できる。

従来は有効質量 m^* の仮定を用いて各種の材料物性値を導出していたが、請求項 1 に係る発明の分光分析方法では、有効質量 m^* の仮定を用いることなく、試料の各種材料物性値、例えばキャリアの移動度、抵抗率、キャリア濃度、キャリアの伝導型などを、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分をパラメータとして導出することが可能になる。この一連の測定は、全て上述したテラヘルツ分光分析法により達成できるので、従来のホール測定に代表されるような電極形成を伴う破壊検査を行わずとも、非接触・非破壊で迅速な材料物性値の評価が可能になる。

[0013] 請求項 2 に係る発明の磁場印加測定ステップは、 p 偏光入射に対する反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 (R_{pp})、および、 p 偏光入射に対する反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 (R_{sp}) を検出するステップである。また、請求項 2 に係る発明の無磁場測定ステップは、反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 (R_p)、および、反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 (R_s) を検出するステップである。

これら 4 つの時間波形を検出することで、その他のパラメータの検出を行うことなく、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を導出できる。このため極めて容易に、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分をパラメータとする試料の材料物性値を導出することが可能になる。

[0014] 請求項 3 に係る発明の複素誘電率テンソル導出ステップは、前記磁場印加測定ステップで検出する p 偏光成分の時間波形 (R_{pp}) および前記無磁場測定ステップで検出する p 偏光成分の時間波形 (R_p) に基づいて第一の複素振幅反射係数比 (r_{pp}/r_p) を導出し、前記磁場印加測定ステップで検出する s 偏光成分の時間波形 (R_{sp}) および前記無磁場測定ステップで検出する p 偏光成分の時間波形 (R_p) に基づいて第二の複素振幅反射係数比 (r_{sp}/r_p) を導出し、前記無磁場測定ステップで検出する p 偏光成分の時間波形 (R_p) および s 偏光成分の時間波形 (R_s) に基づいて無磁場状態での試料の複素誘電率 (ϵ_r) を導出し、前記複素誘電率 (ϵ_r) に基づいて前記無磁場測定ステップで検出する p 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_p) を導出し、前記

無磁場測定ステップで導出する p 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_p)、前記第一の複素振幅反射係数比 (r_{pp}/r_p)、および前記第二の複素振幅反射係数比 (r_{sp}/r_p) に基づいて、前記磁場印加測定ステップで検出する p 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{pp}) および s 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{sp}) を導出し、前記磁場印加測定ステップで検出する p 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{pp}) および s 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{sp}) に基づいて、磁場印加状態での試料の複素誘電率テンソルにおける対角成分 (ϵ_{xx}) および非対角成分 (ϵ_{xy}) を導出するステップである。

この構成では、p 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{pp}) および s 偏光成分の複素振幅反射係数 (r_{sp}) の値を、各複素振幅反射係数比 (r_{pp}/r_p , r_{sp}/r_p) から導出するので、誤差を生じやすいリファレンス測定が不要となり、高精度な分光分析が可能になる。

[0015] 請求項 4 に係る発明の無磁場測定ステップは、p 偏光成分の時間波形 (R_p) の検出を、各時間波形 (R_s , R_{pp} , R_{sp}) それぞれの検出を行う度に実施するステップである。

これにより、時間波形の検出中に試料への入射光強度が変動するようなことがあっても、短い時間隔で検出された 2 つの時間波形に基づいて、各複素振幅反射係数比 (r_{pp}/r_p , r_{sp}/r_p) を導出できる。したがって、測定結果に対する試料への入射光強度の変動の影響を小さくでき、高精度な分光分析が可能になる。

[0016] 請求項 11 に係る発明のテラヘルツ分光分析装置は、第一の偏光子、第二の偏光子、波形検出部、磁場可変部、および制御部を備え、上述のテラヘルツ分光分析方法を実施する装置である。第一の偏光子は、前記パルス光を p 偏光成分のみの第一の偏光状態または p 偏光成分と s 偏光成分とを含む第二の偏光状態の少なくともいずれかに偏光する。第二の偏光子は、前記反射波を p 偏光成分のみの第一の偏光状態または s 偏光成分のみの第二の偏光状態の少なくともいずれかに偏光する。波形検出部は、前記第二の偏光子で偏光された前記反射波の時間波形を検出する。磁場可変部は、前記試料に対して

発生磁場を印加する磁場印加状態または無磁場状態を可変とさせることができる。制御部は、前記第一の偏光子と前記第二の偏光子と前記磁場可変部との状態組み合わせを変更して、前記波形検出部に前記反射光の時間波形を複数回検出させる。

この構成では、試料を固定したままの状態で一括して各時間波形を検出でき、高精度な分光分析が行える。

[0017] 請求項 1 2 に係る発明の制御部は、波形検出部に制御信号を出力し、波形検出部は、制御信号に応じて、プローブ光の光路長を変更するように駆動し、ポンプ光により発生させたパルス光の反射光に対して、プローブ光を用いて時間波形を検出すると好適である。

[0018] 請求項 1 3 に係る発明の制御部は、第一の偏光子と第二の偏光子と磁場可変部とのそれぞれに制御信号を出力し、第一の偏光子および第二の偏光子は制御信号に応じて回転駆動し、磁場可変部は制御信号に応じて試料に印加する磁場強度を可変とする。また、請求項 1 4 に係る磁場可変部は、制御信号に応じて試料と磁石との間隔を変更するように駆動する機構により構成できる。

これらの構成により、この装置で一連の測定操作を、連続的に自動化して行うことが可能になる。

[0019] 請求項 1 5 に係る発明の第一の偏光子は、前記パルス光を第一の偏光状態に偏光する回転角から、前記パルス光を第二の偏光状態に偏光する回転角まで、少なくとも 45° 回転駆動すると好適である。

また、請求項 1 6 に係る発明の第二の偏光子は、前記反射光を第一の偏光状態に偏光する回転角から、前記反射光を第二の偏光状態に偏光する回転角まで、少なくとも 90° 回転駆動すると好適である。

これらの構成により、テラヘルツ光の偏光状態の一連の制御を、自動化して行うことが可能になる。

発明の効果

[0020] この発明によれば、試料に対して磁場印加状態と無磁場状態とでパルス光

を照射して反射波の時間波形を検出することで、特殊な追加設備を用いることなく、検出した時間波形から複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を導出できる。このため、簡易な設備で、有効質量 m^* の仮定を行うことなく、また試料に一切の前処理を施すことなく、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分をパラメータとする試料の材料物性値を直接導出することが可能になる。これらの一連の測定およびパラメータの導出は、プログラム等を用いて全自動で行うことが可能であり、このため特殊な技術や高度な知識を有していない者でもテラヘルツ分光分析を実施することが可能になる。

図面の簡単な説明

[0021] [図1]磁気光学効果を利用した複素誘電率の測定原理を説明する模式図である。

[図2]第1の実施形態に係るテラヘルツ分光分析装置の要部構成を説明する模式図である。

[図3]図2に示すテラヘルツ発光モジュールの詳細構成を説明する図である。

[図4]図2に示す制御演算部の処理フローを説明する図である。

[図5]第2の実施形態に係る制御演算部の処理フローを説明する図である。

[図6]導出する材料物性値と周波数との関係を説明する図である。

[図7]導出する材料物性値と周波数との関係を説明する図である。

[図8]導出する材料物性値と周波数との関係を説明する図である。

[図9]導出する材料物性値と周波数との関係を説明する図である。

[図10]導出する材料物性値と周波数との関係を説明する図である。

発明を実施するための最良の形態

[0022] まず、本発明での磁気光学効果を利用した複素誘電率テンソルの測定原理に付いて説明する。図1は、その測定原理を説明する模式図である。

磁場が印加されていない無磁場状態の試料では、次式に示す複素誘電率テンソル ϵ の非対角成分 ϵ_{xy} がゼロとなる。このことは、図1(A)に示すように、試料に直線偏光が入射すると試料からの反射波も直線偏光となること

を示している。即ち、p 偏光成分のみからなる直線偏光の入射（p 偏光入射）に対しては反射光が p 偏光成分のみを含むことになり、s 偏光成分のみからなる直線偏光の入射（s 偏光入射）に対しては反射波が s 偏光成分のみを含むことになる。

[0023] [数1]

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

[0024] 一方、磁場が印加されている磁場印加状態の試料では、その複素誘電率テンソルの非対角成分 ε_{xy} がゼロではなくなる。このことは、図 1（B）に示すように、試料に直線偏光が入射すると試料からの反射波は楕円偏光となることを示している。即ち、p 偏光入射に対して反射光が p 偏光成分のみでなく s 偏光成分をも含むことになり、s 偏光入射に対しては反射波が s 偏光成分のみでなく p 偏光成分をも含むことになる。

[0025] したがって、複素誘電率テンソルの導出過程の詳細は後述するが、磁場印加状態で直線偏光を試料に入射させた場合の反射光に含まれる p 偏光成分および s 偏光成分をそれぞれ検出することで、複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分の導出が可能になる。

[0026] 《第 1 の実施形態》

以下、本発明の実施形態に係るテラヘルツ分光分析方法を実施するテラヘルツ分光分析装置の構成例を説明する。本実施形態のテラヘルツ分光分析方法では、テラヘルツ周波数領域（0.1 × 10¹² ~ 100 × 10¹² ヘルツ）の周波数成分を有するパルス光を半導体試料に照射し、試料で反射した反射光の強度および位相差を検出することにより、半導体試料の材料物性値を導出する。

[0027] 図 2 は、本実施形態に係るテラヘルツ分光分析装置 1 を示す図である。テラヘルツ分光分析装置 1 は、パルスレーザ光源 2、ビームスプリッタ 3、レーザ集光器 4 A、4 B、テラヘルツ発光モジュール 5、放物面鏡 6 A、6 B、6 C、6 D、偏光子 7 A、8 A、偏光子回転ステージ 7 B、8 B、磁石 9 A

、磁石駆動ステージ 9 B、テラヘルツ検出モジュール 10、プローブ光遅延部 11 A、遅延部駆動ステージ 11 B、バイアス電源 12、カレントアンプ 13、ロックインアンプ 14、制御演算部 15、およびステージコントローラ 16 を備える。

[0028] パルスレーザ光源 2 は、パルスレーザ光を照射する。パルスレーザ光のパルス幅は 10 ～ 150 フェムト秒が望ましく、発光周期は数 MHz が望ましい。ビームスプリッタ 3 は、パルスレーザ光源 2 から照射されたレーザ光が導光され、そのレーザ光をポンプ光およびプローブ光に分光する。レーザ集光器 4 A はビームスプリッタ 3 で分光されたポンプ光が導光され、そのポンプ光を集光する。プローブ光遅延部 11 A はビームスプリッタ 3 で分光されたプローブ光を導光する。レーザ集光器 4 B はプローブ光遅延部 11 A に導光されたプローブ光を集光する。

[0029] 図 3 はテラヘルツ発光モジュール 5 の詳細構成を説明する斜視図である。バイアス電源 12 は、テラヘルツ発光モジュール 5 にバイアス電圧を印加する。テラヘルツ発光モジュール 5 は、光伝導アンテナ素子 5 A とシリコンレンズ 5 B とからなり、光伝導アンテナ素子 5 A は GaAs 基板 5 C と低温成長 GaAs 薄膜 5 D とアンテナギャップ 5 E を有するアンテナパターン電極対 5 F とを備える。低温成長 GaAs 薄膜 5 D は GaAs 基板 5 C の表面に成膜されている。アンテナパターン電極対 5 F は、低温成長 GaAs 薄膜 5 D の表面に形成されている。アンテナギャップ 5 E は、前述のレーザ集光器 4 A で集光されるポンプ光 L の焦点位置に配置され、バイアス電源 12 からバイアス電圧が印加される。アンテナギャップ 5 E にポンプ光 L がフェムト秒単位のパルス幅で照射されることで、低温成長 GaAs 薄膜 5 D で光励起キャリアが発生して、アンテナギャップ 5 E に電流が瞬間的に流れる。すると電気双極子放射によってテラヘルツ周波数成分を持ったパルス光が発生する。このパルス光は、アンテナギャップ 5 E の電極対向方向に沿った偏光方向を持ち、パルス幅がフェムト秒オーダーである。シリコンレンズ 5 B は、平坦面と球状面とを有する半球状のレンズであり、平坦面で GaAs 基板 5 C の背

面に接合され、光伝導アンテナ素子 5 A において発生したパルス光を自由空間に放射する。シリコンレンズ 5 B を設けることで、GaAs 基板 5 C とシリコンレンズ 5 B との界面における反射を抑えて、パルス光を自由空間に放射することができる。なお、このテラヘルツ発光モジュール 5 は、ほぼ直線偏光としてパルス光を放射することになる。そこでテラヘルツ発光モジュール 5 を、パルス光がほぼ p 偏光成分のみを含むことになる基準配置角度から 45° 傾けた姿勢で配置し、これにより、パルス光が p 偏光成分と s 偏光成分とをほぼ等量含むようにする。

[0030] 再び図 2 に基づいて各部の構成を説明する。放物面鏡 6 A、6 C は、テラヘルツ発光モジュール 5 から自由空間に放射されたパルス光を試料 5 O の表面にコリメートする。偏光子回転ステージ 7 B は偏光子 7 A を回転可能に支持し、アクチュエータの駆動により偏光子 7 A の回転角を制御する。偏光子 7 A は、例えば金属細線を周期的に配列したワイヤーグリッドで構成し、パルス光が入射する正面およびパルス光を出射する背面が回転中心に対して垂直で、回転中心がパルス光のビームライン中心軸と一致するように配置される。この偏光子 7 A は、入射するパルス光に含まれる偏光成分のうち、自らの回転角に応じて定まる特定方向に沿った偏光成分のみを透過する。そこで、偏光子 7 A は、透過するパルス光が p 偏光成分のみを含むことになる基準配置角度から、出射するパルス光が p 偏光成分と s 偏光成分とを等量含むことになる 45° 傾けた配置角度まで回転可能に構成する。

[0031] 磁石駆動ステージ 9 B は、半導体試料 5 O に磁場を印加するための磁石 9 A を移動可能に支持し、アクチュエータの駆動により磁石 9 A の位置を制御する。磁石 9 A は、半導体試料 5 O に磁場を印加する場合に半導体試料 5 O の近傍に配置され、半導体試料 5 O への磁場の印加を中止する場合に、半導体試料 5 O の近傍から離れた位置に配置される。なお、本実施例では、磁場可変部を永久磁石と試料の距離を変えることによって構成する例を示すが、電磁石を用いて磁場の ON/OFF を切り替える構成であっても良い。

[0032] 偏光子 7 A によって偏光状態が制御されたパルス光は、半導体試料 5 O に

所定の入射角で照射される。この入射角は、いわゆるブリュースター角に設定されていると高い測定感度を得ることが可能になり好適である。試料 50 の表面に照射されたパルス光は、半導体試料 50 の持つ複素誘電率テンソルによる影響を受けて反射する。即ち、図 1 にて説明したように、無磁場状態の半導体試料 50 に直線偏光（p 偏光入射）が入射すると半導体試料 50 からの反射波も直線偏光（p 偏光）となり、磁場印加状態の半導体試料 50 に直線偏光が入射すると半導体試料 50 からの反射波は楕円偏光となる。

[0033] 偏光子回転ステージ 8 B は偏光子 8 A を回転可能に支持し、アクチュエータの駆動により偏光子 8 A の回転角を制御する。偏光子 8 A は、例えば金属細線を周期的に配列したワイヤーグリッドで構成し、反射光が入射する正面および反射光を出射する背面が回転中心に対して垂直で、回転中心が反射光のビームライン中心軸と一致するように配置される。この偏光子 8 A は、入射する反射光に含まれる偏光成分のうち、自らの回転角に応じて定まる特定方向に沿った偏光成分のみを透過する。そこで、偏光子 8 A は、透過する反射光が p 偏光成分のみを含むことになる基準配置角度から、出射する反射光が s 偏光成分のみを含むことになる 90° 傾けた配置角度まで回転可能に構成する。放物面鏡 6 B は、偏光子 8 A から出射された反射光をテラヘルツ検出モジュール 10 に導光する。

[0034] 遅延部駆動ステージ 11 B は、プローブ光遅延部 11 A を移動可能に支持し、アクチュエータの駆動によりプローブ光遅延部 11 A の移動を制御する。プローブ光遅延部 11 A は、導光するプローブ光の光路長を移動により伸縮させる。

[0035] テラヘルツ検出モジュール 10 は、例えば図 3 に示したテラヘルツ発光モジュール 5 と略同じ構成である。このテラヘルツ検出モジュール 10 では、シリコンレンズの球状面から入射する反射光を光伝導アンテナ素子に導光することで、反射光の強度に応じた電界を低温成長 GaAs 薄膜上に形成されたアンテナギャップ間に印加させる。レーザ集光器 4 B で集光されたプローブ光が光伝導アンテナのアンテナギャップ間に照射される時、電界強度に応

じた微小電流がアンテナギャップ間に流れる。

[0036] カレントアンプ 13 は、テラヘルツ検出モジュール 10 のアンテナギャップ間に流れる微小電流を増幅する。ロックインアンプ 14 はバイアス電圧が所定の周期で変調するようにバイアス電源 12 を制御し、バイアス電圧の変調周期に基づいてカレントアンプ 13 の出力から、反射光の強度に応じた検出信号をロックイン検出する。これにより、反射光の強度に応じた検出信号を S/N 比を改善して制御演算部 15 に出力する。

[0037] 制御演算部 15 は、遅延部駆動ステージ 11B を走査する制御信号をステージコントローラ 16 に出力する。するとステージコントローラ 16 はアクチュエータを駆動して、プローブ光遅延部 11A を移動させる。これによりテラヘルツ検出モジュール 10 において周期的に受光する反射光の到達タイミングに対して、プローブ光の到達タイミングが微小時間ずつずれる。したがって、アンテナギャップ間に流れる微弱電流の検出タイミングが反射光の到達タイミングに対して走査され、反射光の時間波形を取得することが可能になる。なお、プローブ光遅延部 11A、遅延部駆動ステージ 11B、およびテラヘルツ検出モジュール 10 は請求項に記載の波形検出部を構成する。

[0038] また制御演算部 15 は、半導体試料 50 に磁石 9A の発生磁場を印加する磁場印加状態または無磁場状態のいずれかに制御する制御信号をステージコントローラ 16 に出力する。するとステージコントローラ 16 はアクチュエータを駆動して、磁石 9A を移動させる。これにより、半導体試料 50 は磁石 9A による磁場が印加される磁場印加状態または無磁場状態のいずれかになる。なお、磁石 9A、および磁石駆動ステージ 9B は請求項に記載の磁場可変部を構成する。

[0039] また制御演算部 15 は、偏光子 7A をパルス光に含まれる p 偏光成分のみを透過する p 偏光入射状態、または、パルス光に含まれる p 偏光成分および s 偏光成分を等量透過する 45° 偏光入射状態、のいずれかに制御する制御信号をステージコントローラ 16 に出力する。するとステージコントローラ 16 はアクチュエータを駆動して、偏光子 7A を回転させる。これにより、

偏光子 7 A は、p 偏光入射状態になる回転角、または、その回転角から 45° 回転した 45° 偏光入射状態になる回転角のいずれかの姿勢をとる。

[0040] また制御演算部 15 は、偏光子 8 A を反射光に含まれる p 偏光成分のみを透過する p 偏光出射状態、または、反射光に含まれる s 偏光成分のみを透過する s 偏光出射状態、のいずれかに制御する制御信号をステージコントローラ 16 に出力する。するとステージコントローラ 16 はアクチュエータを駆動して、偏光子 8 A を回転させる。これにより、偏光子 8 A は、p 偏光出射状態になる回転角、または、その回転角から 90° 回転した s 偏光出射状態になる回転角のいずれかの姿勢をとる。したがって制御演算部 15 およびステージコントローラ 16 は請求項に記載の制御部を構成する。

[0041] 以上の構成のテラヘルツ分光分析装置 1 は、磁場印加状態または無磁場状態、p 偏光入射状態または 45° 偏光入射状態、p 偏光出射状態または s 偏光出射状態、それぞれの組み合わせを異ならせて、半導体試料 50 の反射光の時間波形をプログラムにより自動的に連続して取得することが可能となる。

[0042] 制御演算部 15 は上述の制御により検出する反射光の時間波形に基づいて、半導体試料 50 の複素誘電率テンソル、および各種材料物性値を導出する。図 4 は、制御演算部 15 の処理フローの一例を説明する図である。

まず制御演算部 15 は、偏光子 7 A を 45° 偏光入射状態にする制御信号を出力し、偏光子 8 A を p 偏光出射状態にする制御信号を出力し、磁石 9 A を無磁場状態にする制御信号を出力する (S 1)。そして制御演算部 15 は、プローブ光遅延部 11 A に所定期間に所定距離移動するように指示する制御信号を出力する。これにより、テラヘルツ周波数帯域のパルス光を p 偏光成分および s 偏光成分を等量含む直線偏光として無磁場状態の半導体試料 50 に照射させ、反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_p を検出する (S 2)。なお、これらのステップ (S 1 ~ S 2) は請求項に記載の無磁場測定ステップに相当する。

[0043] 次に制御演算部 15 は、偏光子 8 A を s 偏光出射状態にする制御信号を出

力する（S3）。そして制御演算部15は、再びプローブ光遅延部11Aに制御信号を出力し、テラヘルツ周波数帯域のパルス光をp偏光成分およびs偏光成分を等量含む直線偏光として無磁場状態の半導体試料50に照射させ、反射光に含まれるs偏光成分の時間波形 R_s を検出する（S4）。なお、これらのステップ（S3～S4）は請求項に記載の無磁場測定ステップに相当する。

[0044] 次に制御演算部15は、検出した時間波形 R_p および時間波形 R_s をそれぞれフーリエ変換し、両者の振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルを導出し、振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルから無磁場状態での半導体試料50の振幅反射係数比 ρ_r 、複素誘電率 ε_r 、および、p偏光成分の複素振幅反射係数 r_p を導出する（S5）。このようなp偏光成分とs偏光成分との振幅反射係数比を用いる複素誘電率の導出法はエリプソメトリ法と呼ばれる。エリプソメトリ法によれば、リファレンス測定が不要であり、リファレンス測定において生じやすい試料の配置位置ずれに伴う測定誤差の発生を防げる。

[0045] ここで、エリプソメトリ法を用いた複素振幅反射係数比の導出過程を一般化して説明する。エリプソメトリ法では2つの偏光成分の振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルから得られる位相差 Δ_n および振幅反射係数比 $\tan \psi_n$ を用いて、両偏光成分の複素振幅反射係数 r_s 、 r_p の比 ρ_n を導出する。複素振幅反射係数比 ρ_n は次式で表される。なお複素振幅反射係数 r_s 及び r_p の極座標表示での反射率をそれぞれ $|r_s|$ 、 $|r_p|$ 、位相を δr_s 、 δr_p とする。

[0046] [数2]

$$\begin{aligned} \frac{r_p}{r_s} &\equiv \rho_n = \tan \psi_n \cdot \exp(i\Delta_n) \\ r_s &= |r_s| \exp(i\delta r_s) \\ r_p &= |r_p| \exp(i\delta r_p) \\ \tan \psi_n &= |r_p| / |r_s| \\ \Delta_n &= \delta r_p - \delta r_s \end{aligned}$$

[0047] したがって、ステップS5での本実施形態に係る複素振幅反射係数比 ρ_r の

導出は、検出する時間波形 R_p と時間波形 R_s とから得られる位相差 Δ_r および振幅反射係数比 $\tan \Psi_r$ を用いて、数 2 の式によって得られる。

[0048] 前式で導出する複素振幅反射係数比 ρ_r について、試料表面における反射のみを考慮して、いわゆるフレネルの式を適用すると、無磁場状態の半導体試料 50 における複素誘電率 ε_r はパルス光の入射角 θ_i と複素振幅反射係数比 ρ_r とを変数とした次式で表される。

[0049] [数3]

$$\varepsilon_r = \sin^2 \theta_i \left[1 + \tan^2 \theta_i \left(\frac{1 - \rho_r}{1 + \rho_r} \right)^2 \right]$$

[0050] また、複素振幅反射係数 r_p はフレネルの式を用いることで入射角 θ_i と複素誘電率 ε_r とを変数とした次式で表される。

[0051] [数4]

$$r_p = \frac{\varepsilon_r \cdot \cos \theta_i - (\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_r \cdot \cos \theta_i + (\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}$$

[0052] 以上の導出過程を経て、制御演算部 15 では無磁場状態の半導体試料 50 における複素誘電率 ε_r および p 偏光入射成分に対する複素振幅反射係数 r_p を導出できる。

[0053] 次に制御演算部 15 は、偏光子 7 A を p 偏光入射状態にする制御信号を出力し、磁石 9 A を磁場印加状態にする制御信号を出力する (S 6)。そして制御演算部 15 は、プローブ光遅延部 11 A に制御信号を出力し、テラヘルツ周波数帯域のパルス光を p 偏光成分のみを含む直線偏光として磁場印加状態の半導体試料 50 に照射させ、反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 $R_{s,p}$ を検出する (S 7)。なお、これらのステップ (S 6 ~ S 7) は請求項に記載の磁場印加測定ステップに相当する。

[0054] 次に制御演算部 15 は、検出した時間波形 $R_{s,p}$ および前記時間波形 R_p をそれぞれフーリエ変換し、両者の振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルを導出し、振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルから、磁場印加状態の半導体試料 50 における複素振幅反射係数比 $r_{s,p} / r_p$ および、磁場印加状態で

の p 偏光入射に対する s 偏光出射の複素振幅反射係数 r_{sp} を導出する (S 8) 。なお、偏光子 7 A を 45° 偏光入射状態から p 偏光入射状態に変更することでパルス光の光強度が変化するため、分光分析を高精度に行うためには時間波形 R_p は再検出するほうが望ましい。ここでは説明の簡易化のために、先のステップ S 2 で検出するものをそのまま用いることとする。

[0055] ここで、複素振幅反射係数 r_{sp} は、演算によって導出する複素振幅反射係数比 r_{sp}/r_p に、前述の複素振幅反射係数 r_p を乗じることによって得る。

以上の導出過程を経て、制御演算部 15 では磁場印加状態の半導体試料 50 における p 偏光入射に対する s 偏光出射の複素振幅反射係数 r_{sp} を導出できる。

[0056] 次に制御演算部 15 は、偏光子 8 A を p 偏光出射状態にする制御信号を出力する (S 9) 。そして制御演算部 15 は、プローブ光遅延部 11 A に制御信号を出力し、テラヘルツ周波数帯域のパルス光を p 偏光成分のみを含む直線偏光として磁場印加状態の半導体試料 50 に照射させ、反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_{pp} を検出する (S 10) 。なお、これらのステップ (S 9 ~ S 10) は請求項に記載の磁場印加測定ステップに相当する。

[0057] 次に制御演算部 15 は、検出した時間波形 R_{pp} および前記時間波形 R_p をそれぞれフーリエ変換し、両者の振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルを導出し、振幅比スペクトルおよび位相差スペクトルから、磁場印加状態の半導体試料 50 における複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p および、磁場印加状態での p 偏光入射に対する p 偏光出射の複素振幅反射係数 r_{pp} を導出する (S 11) 。なお、時間の経過に伴ってパルスレーザ光源 2 の出力変動などが生じればパルス光の光強度が変化するため、分光分析を高精度に行うためには時間波形 R_p は再検出するほうが望ましい。ここでは説明の簡易化のために、先のステップ S 2 で検出するものをそのまま用いることとする。

[0058] ここで、本実施形態において複素振幅反射係数 r_{pp} は、演算によって導出する複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p に、前述の複素振幅反射係数 r_p を乗じることによって得る。

以上の導出過程を経て、制御演算部 15 では磁場印加状態の半導体試料 50 における p 偏光入射に対する p 偏光出射の複素振幅反射係数 r_{pp} を導出できる。

[0059] 次に、制御演算部 15 は、導出した複素振幅反射係数 r_{pp} および複素振幅反射係数 r_{sp} に基づいて磁場印加状態の半導体試料 50 における複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} を導出する (S 12)。なお、このステップ (S 12) を含むこれ以前の導出演算ステップ (S 5, S 8, S 11, S 12) は請求項に記載の複素誘電率テンソル導出ステップに相当する。

[0060] ここで、複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} の導出過程の詳細を説明する。前述の複素振幅反射係数 r_{pp} は、数 4 の式と同様にフレネルの式を適用して、複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} と入射角 θ_i とを変数とした次式で表される。

[0061] [数5]

$$r_{pp} = \frac{\varepsilon_{xx} \cdot \cos \theta_i - (\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_{xx} \cdot \cos \theta_i + (\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}$$

[0062] 数 5 の式を複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} について解くと、複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} は複素振幅反射係数 r_{pp} を用いて導出できる。

[0063] [数6]

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(\frac{(1+r_{pp})^2}{(1-r_{pp})^2 \cos^2 \theta_i} + \frac{(1+r_{pp})}{(1-r_{pp}) \cos \theta_i} \sqrt{\frac{(1+r_{pp})^2}{(1-r_{pp})^2 \cos^2 \theta_i} - 4 \sin^2 \theta_i} \right)$$

[0064] 同様にして前述の複素振幅反射係数 r_{sp} は、マクスウェルの式およびフレネルの式を適用して次式で表される。

[0065] [数7]

$$r_{sp} = - \frac{\varepsilon_{xy} \cos \theta_i}{(\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i})(\sqrt{\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i} + \varepsilon_{xx} \cos \theta_i)}$$

[0066] 数 7 の式を複素誘電率テンソルの非対角成分 ε_{xy} について解いた次式によって、複素誘電率テンソルの非対角成分 ε_{xy} を導出できる。

[0067] [数8]

$$\varepsilon_{xy} = -\frac{r_{sp}}{\cos \theta_i} (\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i}) (\sqrt{\varepsilon_{xx} - \sin^2 \theta_i} + \varepsilon_{xx} \cos \theta_i)$$

[0068] 次に、制御演算部 15 は、導出した複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} に基づいて、対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} をパラメータとしてもつ半導体試料 50 の材料物性値を導出する (S 13)。なお、このステップ (S 13) は請求項に記載の材料物性値導出ステップに相当する。

[0069] ここで、半導体試料 50 の材料物性値導出過程の詳細を説明する。

サイクロトロン周波数 ω_c とは、半導体中のフリーキャリアに磁場を印加することで、キャリアに生じるサイクロトロン運動 (円運動) の周波数である。

複素誘電率の対角・非対角成分 ε_{xx} 、 ε_{xy} は、磁気光学効果を考慮したドルーデモデルに基づくと、それぞれサイクロトロン周波数 ω_c を変数とする次式で与えられる。なお、高周波誘電率を ε_∞ 、プラズマ周波数を ω_p 、パルス光の角周波数を ω 、キャリアの散乱確率を γ とする。

[0070] [数9]

$$\varepsilon_{xx}(\omega) = \varepsilon'_{xx} + i\varepsilon''_{xx} = \varepsilon_\infty \left[1 - \omega_p^2 \cdot \frac{\omega^2 + i\omega\gamma}{(\omega^2 + i\omega\gamma)^2 - \omega^2\omega_c^2} \right]$$

[0071] [数10]

$$\varepsilon_{xy}(\omega) = \varepsilon'_{xy} + i\varepsilon''_{xy} = \frac{-i\varepsilon_\infty\omega_p^2\omega\omega_c}{(\omega^2 + i\omega\gamma)^2 - \omega^2\omega_c^2}$$

[0072] なお、プラズマ周波数 ω_p は、単位電荷量を q 、キャリア濃度を N 、真空の誘電率を ε_0 として次式で表される。

[0073] [数11]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{q^2 N}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m^*}}$$

[0074] したがって、サイクロトロン周波数 ω_c は、上記数 9、10 の式を解いた次式によって導出できる。

[0075] [数12]

$$\omega_c = \frac{-\omega(\varepsilon'_{xy} + \varepsilon''_{xy})}{\varepsilon_\infty \varepsilon''_{xy} + \varepsilon'_{xy} \varepsilon''_{xx} - \varepsilon'_{xx} \varepsilon''_{xy}}$$

[0076] またキャリアの有効質量 m^* は、前述のサイクロトロン周波数 ω_c に基づいて、次式によって導出できる。

[0077] [数13]

$$\omega_c = \frac{eB}{m^*}$$

$$m^* = \frac{eB}{\omega_c}$$

[0078] また複素電気伝導度 σ は無磁場での複素誘電率 ε_r を用いて、ドルーデモデルに基づく次式によって導出できる。

[0079] [数14]

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + i \frac{\sigma(\omega)}{\varepsilon_0 \omega}$$

$$\sigma(\omega) = i\omega\varepsilon_0 [\varepsilon_\infty - \varepsilon_r(\omega)]$$

[0080] また直流抵抗率 ρ は、複素電気伝導度 σ の逆数 $1/\sigma$ の実部であり、次式によって導出できる。

[0081] [数15]

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)$$

$$\rho(\omega) = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\sigma(\omega)} \right)$$

[0082] また複素電気伝導度 σ はキャリアの散乱時間 τ を変数として、ドルーデ・ローレンツの式に基づく次式で表される。

[0083] [数16]

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau}$$

$$\sigma'(\omega) = \sigma_0 \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\sigma''(\omega) = \sigma_0 \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

[0084] またキャリアの散乱時間 τ は、実部 σ' と虚部 σ'' の交点となる周波数（キャリアの散乱頻度） ω_τ に基づいて、次式によって導出できる。

[0085] [数17]

$$\tau = 1/\omega_{\tau}$$

[0086] またキャリアの移動度 μ は、次式によって導出できる。

[0087] [数18]

$$\mu = q\tau/m^*$$

[0088] またキャリア濃度 N は、次式によって導出できる。

[0089] [数19]

$$N = \frac{1}{q \cdot \mu \cdot \rho}$$

[0090] 従って、本実施形態のテラヘルツ分光分析方法によれば、無磁場状態での複素誘電率 ε_r 、磁場印加状態での複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} を導出し、その対角成分および非対角成分をパラメータに用いることで、様々な半導体試料 50 の材料物性値を簡易な設備で、パラメータの仮定を行うことなく、また試料に一切の前処理を施すことなく導出できる。そのための一連の時間波形の検出および各パラメータの導出を、プログラム等を用いて全自動で行え、特殊な技術や高度な知識を有していない者でもテラヘルツ分光分析を実施することができる。

[0091] 《第2の実施形態》

次に、本発明の第2の実施形態に係るテラヘルツ分光分析方法に付いて説明する。本実施形態では、時間波形 R_p の測定を一回ではなく複数回、複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p 、 r_{sp}/r_p それぞれの導出前にも実施する。また、半導体試料として InAs ウェハを用い、その材料物性値である有効質量、キャリア濃度、移動度などの導出を行う。なお、InAs ウェハとしては、キャリアタイプが n 型のものを用い、その材料物性値は、従来のホール測定による抵抗率が約 $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ 、キャリア密度が $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。また、磁石にはネオジウム磁石を用い、磁場強度は 0.46 T である。

[0092] 図5は、本実施形態に係る制御演算部の処理フローの一例を説明する図である。

[0093] まず制御演算部は各部に制御信号を出力し、無磁場状態で反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_p を検出し、(S 2 1 ~ S 2 2)、無磁場状態で反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 R_s を検出する (S 2 3 ~ S 2 4)。そして、時間波形 R_p および時間波形 R_s に基づいて無磁場状態での I n A s ウェハの複素振幅反射係数比 ρ_r 、複素誘電率 ε_r 、および複素振幅反射係数 r_p を導出する (S 2 5)。

図 6 (A) は、実施例として導出した複素誘電率 ε_r に基づく、複素誘電率 ε_r の実部 ε' および虚部 ε'' と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の低周波側では、複素誘電率 ε_r の実部 ε' が減少し虚部 ε'' が増大しているが、これはその周波数でフリーキャリアによる吸収が生じていることを示している。図 6 (B) は、実施例として導出した複素振幅反射係数 r_p に基づく、複素振幅反射係数 r_p の反射率絶対値 $|r_p|$ および位相差 δr_p と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の低周波側では反射率は大きく位相差は小さいが、測定帯域の高周波側では反射率は小さく位相差は大きい。

[0094] 次に制御演算部は各部に制御信号を出力し、磁場印加状態での p 偏光入射に対する s 偏光出射の時間波形 $R_{s,p}$ を検出し (S 2 6 ~ S 2 7)、無磁場状態で反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_p を検出する (S 2 8 ~ S 2 9)。そして、時間波形 $R_{s,p}$ および時間波形 R_p に基づいて磁場印加状態の I n A s ウェハにおける複素振幅反射係数比 $r_{s,p}/r_p$ および、磁場印加状態での p 偏光入射に対する s 偏光出射の複素振幅反射係数 $r_{s,p}$ を導出する (S 3 0)。

図 7 (A) は、実施例として導出した複素振幅反射係数 $r_{s,p}$ に基づく、複素振幅反射係数 $r_{s,p}$ の反射率絶対値 $|r_{s,p}|$ および位相 $\delta r_{s,p}$ と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の中心周波数付近では反射率は大きく、測定帯域の高周波側および低周波側では反射率は小さい。また、測定帯域の低周波側で位相差は小さく高周波側で位相差は大きい。

[0095] 次に制御演算部は各部に制御信号を出力し、磁場印加状態での p 偏光入射に対する p 偏光出射の時間波形 $R_{p,p}$ を検出し (S 3 1 ~ S 3 2)、無磁場状

態で反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_p を検出する (S 3 3 ~ S 3 4) 。そして、時間波形 R_{pp} および時間波形 R_p に基づいて磁場印加状態の $I n A s$ ウェハにおける複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p および、磁場印加状態での p 偏光入射に対する s 偏光出射の複素振幅反射係数 r_{ps} を導出する (S 3 5) 。

図 7 (B) は、実施例として導出した複素振幅反射係数 r_{pp} に基づく、複素振幅反射係数 r_{pp} の反射率絶対値 $|r_{pp}|$ および位相 δr_{pp} と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の低周波側では反射率は大きく、測定帯域の高周波側では反射率は小さい。また、測定帯域の低周波側で位相差は小さく高周波側で位相差は大きい。

[0096] 次に、制御演算部は、導出した複素振幅反射係数 r_{pp} および複素振幅反射係数 r_{sp} に基づいて磁場印加状態の $I n A s$ ウェハにおける複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} および非対角成分 ϵ_{xy} を導出する (S 3 6) 。

図 8 (A) は、実施例として導出した複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} に基づく、複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} の実部 ϵ_{xx}' および虚部 ϵ_{xx}'' と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の低周波側では、複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} の実部 ϵ_{xx}' が減少し虚部 ϵ_{xx}'' が増大している。

図 8 (B) は、実施例として導出した複素誘電率テンソルの非対角成分 ϵ_{xy} に基づく、複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xy} の実部 ϵ_{xy}' および虚部 ϵ_{xy}'' と周波数との関係を例示する図である。測定帯域の低周波側では、複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xy} の実部 ϵ_{xy}' が増大し虚部 ϵ_{xy}'' が減少している。

[0097] そして、制御演算部は、導出した複素誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} および非対角成分 ϵ_{xy} に基づいて、対角成分 ϵ_{xx} および非対角成分 ϵ_{xy} をパラメータとしてもつ半導体試料の材料物性値を導出する (S 3 7) 。

[0098] 図 9 は、実施例として導出したサイクロトロン周波数 ω_c の周波数依存性を例示する図である。0.5 ~ 1.5 THz におけるサイクロトロン周波数 ω_c 。

の平均値は約 $-3.1 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ であった。導出されたサイクロトロン周波数 ω_c の符号はマイナスであり、これにより本試料の伝導型が n 型であると判定できる。なお、仮にサイクロトロン周波数 ω_c の符号がプラスであれば、半導体試料の伝導型が p 型であると判定できる。

[0099] このサイクロトロン周波数 ω_c に基づいて有効質量 m^* を導出したところ、有効質量 m^* は $0.0261 m_0$ となった (m_0 は電子の質量)。これは、非特許文献 3 の 213 頁の表 2 に示されている n 型 InAs の有効質量の値 0.026 と略一致していて、本発明が実用可能な精度で有効質量 m^* を導出できていることがわかる。

[0100] 図 10 (A) は、実施例として導出した複素電気伝導度スペクトルの周波数依存性を例示する図である。複素電気伝導度 σ の実部 σ' と虚部 σ'' の交点から、キャリアの散乱頻度 ω_τ は 0.5 THz であることがわかる。これから、数 17 の式に基づきキャリアの散乱時間 τ が $3.2 \times 10^{-13} \text{ s}$ となる。

[0101] 図 10 (B) は実施例として導出した抵抗率 ρ の周波数依存性を例示する図である。数 15 の式に基づき複素電気伝導度 σ の逆数として抵抗率 ρ を導出でき、周波数 0 Hz での直流抵抗率 ρ の値が $0.0175 \Omega \cdot \text{cm}$ であることがわかる。この値は従来のホール測定の結果とほぼ整合している。

[0102] 実施例として移動度 μ を導出すると、数 18 の式から移動度 μ は $2.1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ となった。また、実施例としてキャリア濃度 N を導出すると、数 19 の式からキャリア濃度 N は $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ となった。これらの値は従来のホール測定の結果とほぼ同じオーダーであった。

[0103] 上記結果に示すように、本発明に係るテラヘルツ分光分析装置およびテラヘルツ分光分析方法によれば、半導体の有効質量の値を常温環境下で特殊な設備を要せずとも直接評価することができ、またキャリア濃度を始めとする各種材料物性値に関しても、一切の仮定値を用いず直接導出することができ、実用可能な精度で各種材料物性値を導出することができる。

符号の説明

[0104] 1…テラヘルツ分光分析装置

- 2…パルスレーザ光源
- 3…ビームスプリッタ
- 4 A, 4 B…レーザ集光器
- 5…テラヘルツ発光モジュール
- 5 A…光伝導アンテナ素子
- 5 B…シリコンレンズ
- 5 C…G a A s 基板
- 5 D…低温成長 G a A s 薄膜
- 5 E…アンテナギャップ
- 5 F…アンテナパターン電極対
- 6 A, 6 B, 6 C, 6 D…放物面鏡
- 7 A, 8 A…偏光子
- 7 B, 8 B…偏光子回転ステージ
- 9 A…磁石
- 9 B…磁石駆動ステージ
- 10…テラヘルツ検出モジュール
- 11 A…プローブ光遅延部
- 11 B…遅延部駆動ステージ
- 12…バイアス電源
- 13…カレントアンプ
- 14…ロックインアンプ
- 15…制御演算部
- 16…ステージコントローラ
- 50…半導体試料

請求の範囲

[請求項1] 磁場印加状態の試料に対してテラヘルツ周波数領域のパルス光を照射し、前記試料にて反射された反射波の時間波形を検出する磁場印加測定ステップと、

無磁場状態の前記試料に対してテラヘルツ周波数領域のパルス光を照射し、前記試料にて反射された反射波の時間波形を検出する無磁場測定ステップと、

前記磁場印加測定ステップおよび前記無磁場測定ステップで検出した時間波形に基づいて、前記試料の磁場印加状態での複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を導出する複素誘電率テンソル導出ステップと、

前記複素誘電率テンソル導出ステップで導出した前記複素誘電率テンソルの対角成分および非対角成分をパラメータに含む前記試料の材料物性値を導出する材料物性値導出ステップと、を実施するテラヘルツ分光分析方法。

[請求項2] 前記磁場印加測定ステップは、
p 偏光入射に対する反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_{pp} および、
p 偏光入射に対する反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 R_{sp} を検出し、

前記無磁場測定ステップは、
反射光に含まれる p 偏光成分の時間波形 R_p 、および、
反射光に含まれる s 偏光成分の時間波形 R_s を検出する、

請求項 1 に記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項3] 前記複素誘電率テンソル導出ステップは、
前記時間波形 R_{pp} および前記時間波形 R_p に基づいて複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p を導出し、
前記時間波形 R_{sp} および前記時間波形 R_p に基づいて複素振幅反射係

数比 r_{sp}/r_p を導出し、
前記時間波形 R_p および前記時間波形 R_s に基づいて無磁場状態での試料の複素誘電率 ε_r を導出し、
前記複素誘電率 ε_r に基づいて無磁場状態での p 偏光成分の複素振幅反射係数 r_p を導出し、
前記複素振幅反射係数 r_p 、前記複素振幅反射係数比 r_{pp}/r_p 、および前記複素振幅反射係数比 r_{sp}/r_p に基づいて、磁場印加状態での p 偏光入射に対する p 偏光成分の複素振幅反射係数 r_{pp} および s 偏光成分の複素振幅反射係数 r_{sp} を導出し、
前記複素振幅反射係数 r_{pp} および前記複素振幅反射係数 r_{sp} に基づいて、磁場印加状態での試料の複素誘電率テンソルにおける対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} を導出する、請求項 2 に記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項4] 前記無磁場測定ステップは、前記時間波形 R_p の検出を、
前記無磁場測定ステップでの前記時間波形 R_s 、
前記磁場印加測定ステップでの前記時間波形 R_{pp} 、
前記磁場印加測定ステップでの前記時間波形 R_{sp} 、
それぞれの検出を行う度に実施する、請求項 2 または 3 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項5] 前記材料物性値導出ステップは、
前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} に基づいて半導体試料におけるキャリアのサイクロトロン周波数を導出する、請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項6] 前記材料物性値導出ステップは、
前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} に基づいて半導体試料におけるキャリアの伝導型を導出する、請求項 1 ～ 5 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項7] 前記材料物性値導出ステップは、

前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} に基づいて半導体試料におけるキャリアの有効質量を導出する、請求項 1 ～ 6 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項8] 前記材料物性値導出ステップは、
前記無磁場状態での試料の複素誘電率 ε_r と、前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} とに基づいて半導体試料におけるキャリアの移動度を導出する、請求項 1 ～ 7 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項9] 前記材料物性値導出ステップは、
前記無磁場状態での試料の複素誘電率 ε_r と、前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} とに基づいて半導体試料における抵抗率を導出する、請求項 1 ～ 8 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項10] 前記材料物性値導出ステップは、
前記無磁場状態での試料の複素誘電率 ε_r と、前記複素誘電率テンソルの対角成分 ε_{xx} および非対角成分 ε_{xy} とに基づいて半導体試料におけるキャリア濃度を導出する、請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法。

[請求項11] 請求項 1 ～ 10 のいずれかに記載のテラヘルツ分光分析方法を実施するテラヘルツ分光分析装置であって、

前記パルス光を p 偏光成分のみの第一の偏光状態または p 偏光成分と s 偏光成分とを等量含む第二の偏光状態の少なくともいずれかに偏光する第一の偏光子と、

前記反射波を p 偏光成分のみの第一の偏光状態または s 偏光成分のみの第二の偏光状態の少なくともいずれかに偏光する第二の偏光子と、

前記第二の偏光子で偏光された前記反射波の時間波形を検出する波形検出部と、

前記試料に対して発生磁場を印加する磁場印加状態または無磁場状態を可変である磁場可変部と、

前記第一の偏光子と前記第二の偏光子と前記磁場可変部との状態組み合わせを変更して、前記波形検出部に前記反射光の時間波形を複数回検出させる制御部と、

を備えるテラヘルツ分光分析装置。

[請求項12]

前記制御部は、前記波形検出部に制御信号を出力し、

前記波形検出部は、前記制御信号に応じて、プローブ光の光路長を変更するように駆動し、ポンプ光により発生させたパルス光の反射光に対して、前記プローブ光を用いて時間波形を検出する、請求項 1 1 に記載のテラヘルツ分光分析装置。

[請求項13]

前記制御部は、前記第一の偏光子と前記第二の偏光子と前記磁場可変部とのそれぞれに制御信号を出力し、

前記第一の偏光子および第二の偏光子は、前記制御信号に応じて回転駆動し、

前記磁場可変部は、前記制御信号に応じて前記試料に印加する磁場強度を変更するように可変にする、請求項 1 1 または 1 2 に記載のテラヘルツ分光分析装置。

[請求項14]

前記磁場可変部は、前記制御信号に応じて前記試料と磁石との間隔を変更するように駆動する、請求項 1 3 に記載のテラヘルツ分光分析装置。

[請求項15]

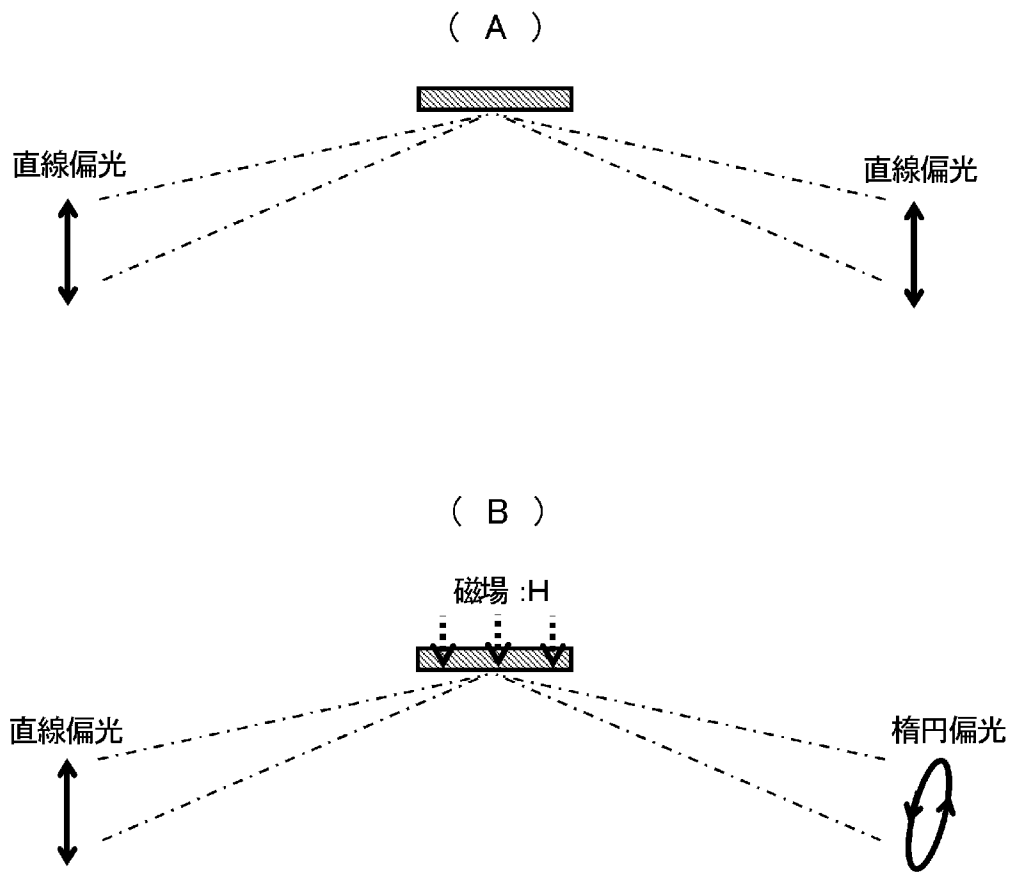
前記第一の偏光子は、前記パルス光を第一の偏光状態に偏光する回転角から、前記パルス光を第二の偏光状態に偏光する回転角まで、少なくとも 45° 回転駆動する、請求項 1 3 または 1 4 に記載のテラヘルツ分光分析装置。

[請求項16]

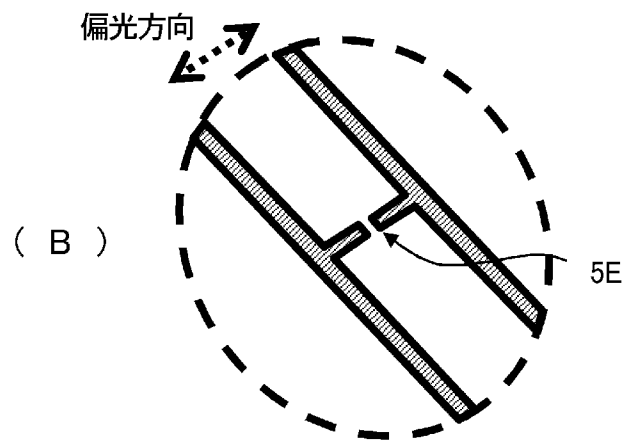
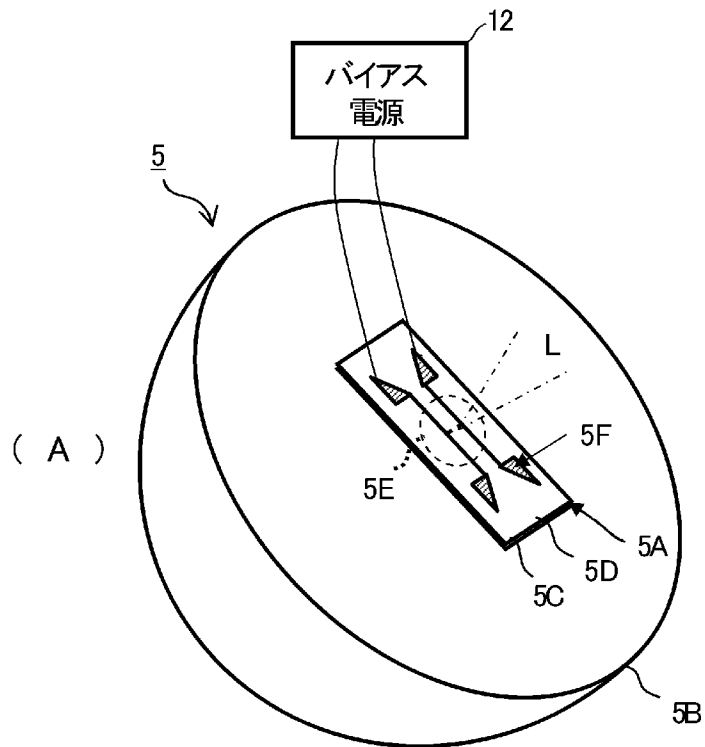
前記第二の偏光子は、前記反射光を第一の偏光状態に偏光する回転角から、前記反射光を第二の偏光状態に偏光する回転角まで、少なくとも 90° 回転駆動する、請求項 1 3、1 4 または 1 5 に記載のテラ

ヘルツ分光分析装置。

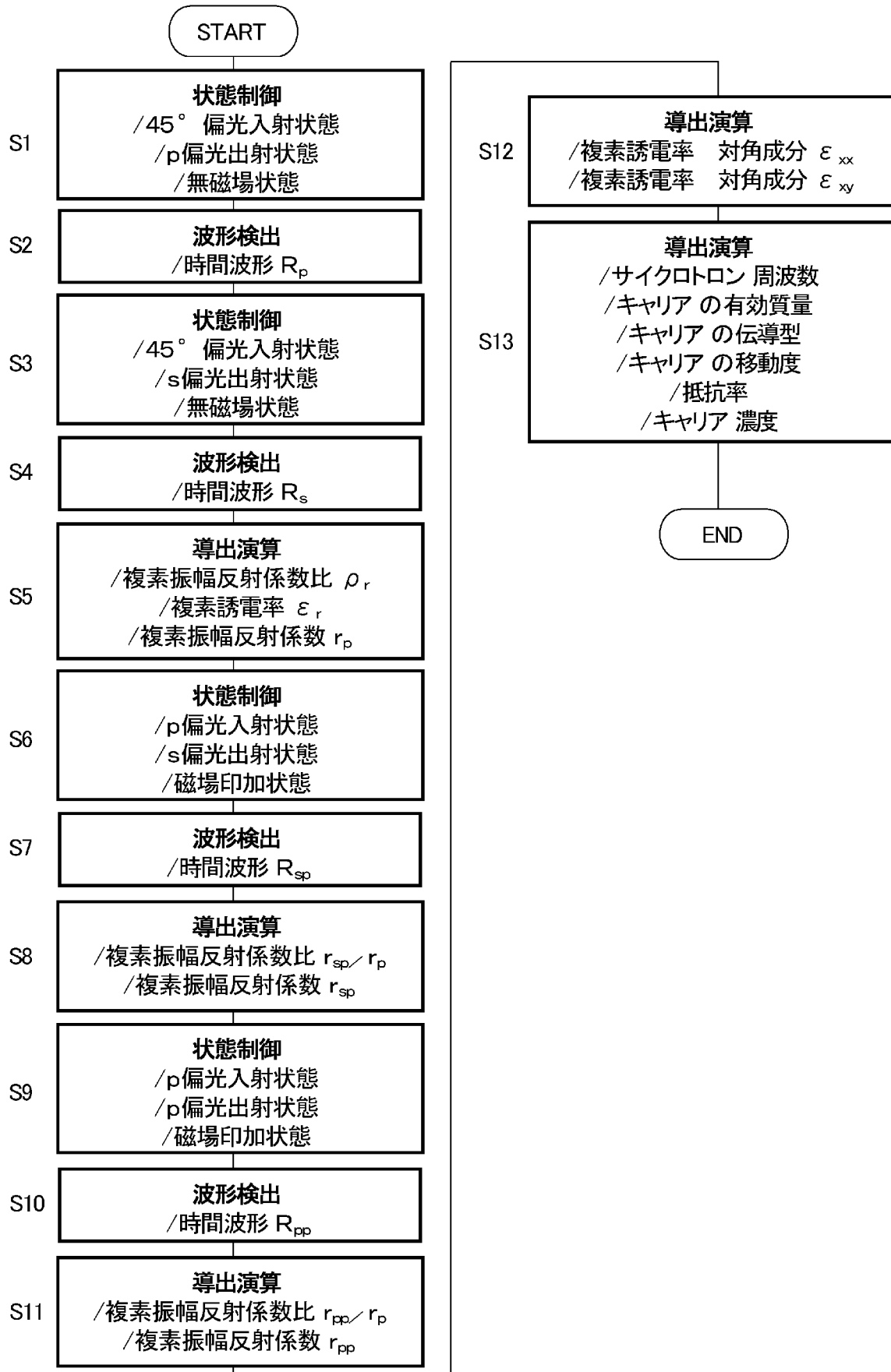
[図1]



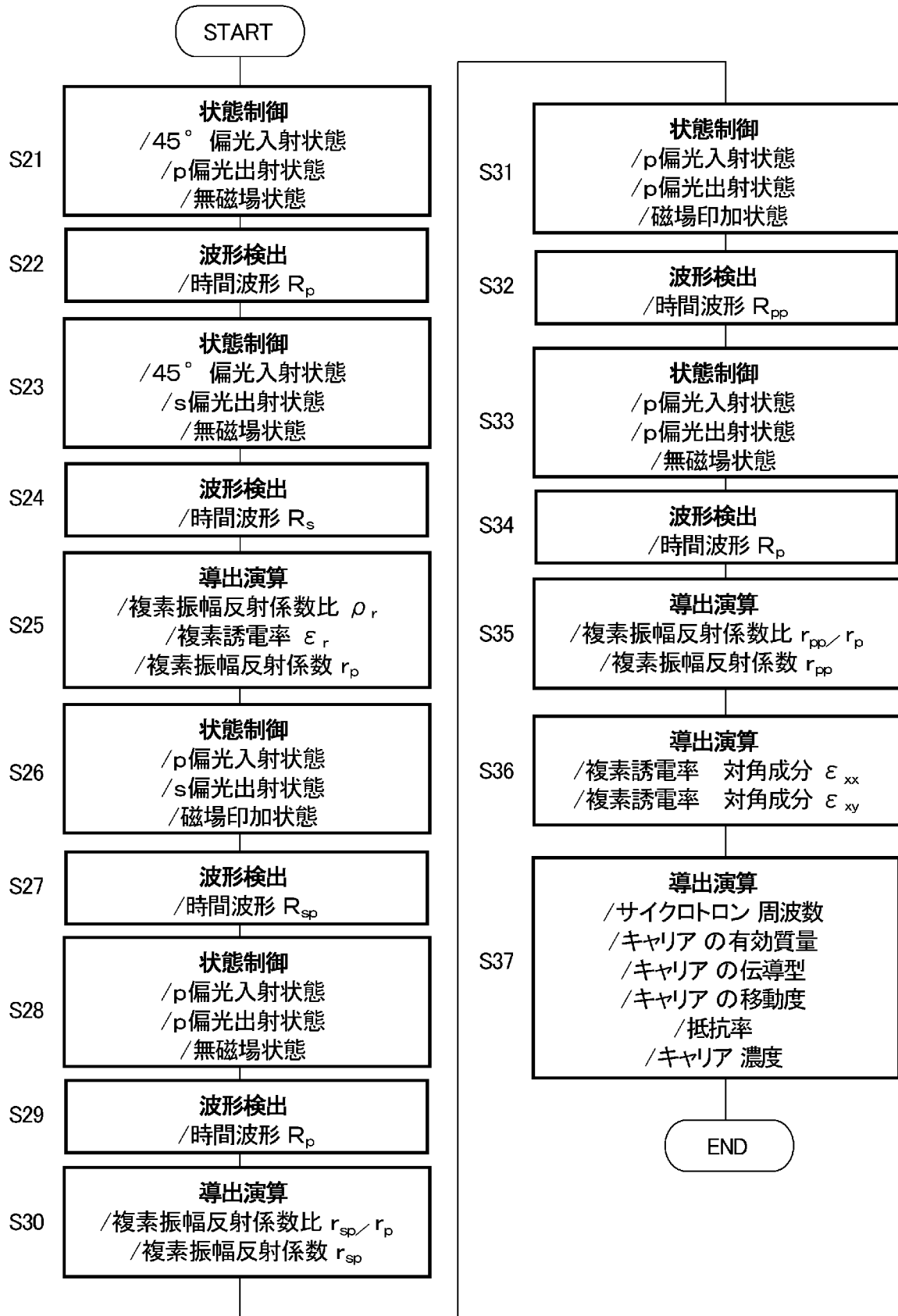
[図3]



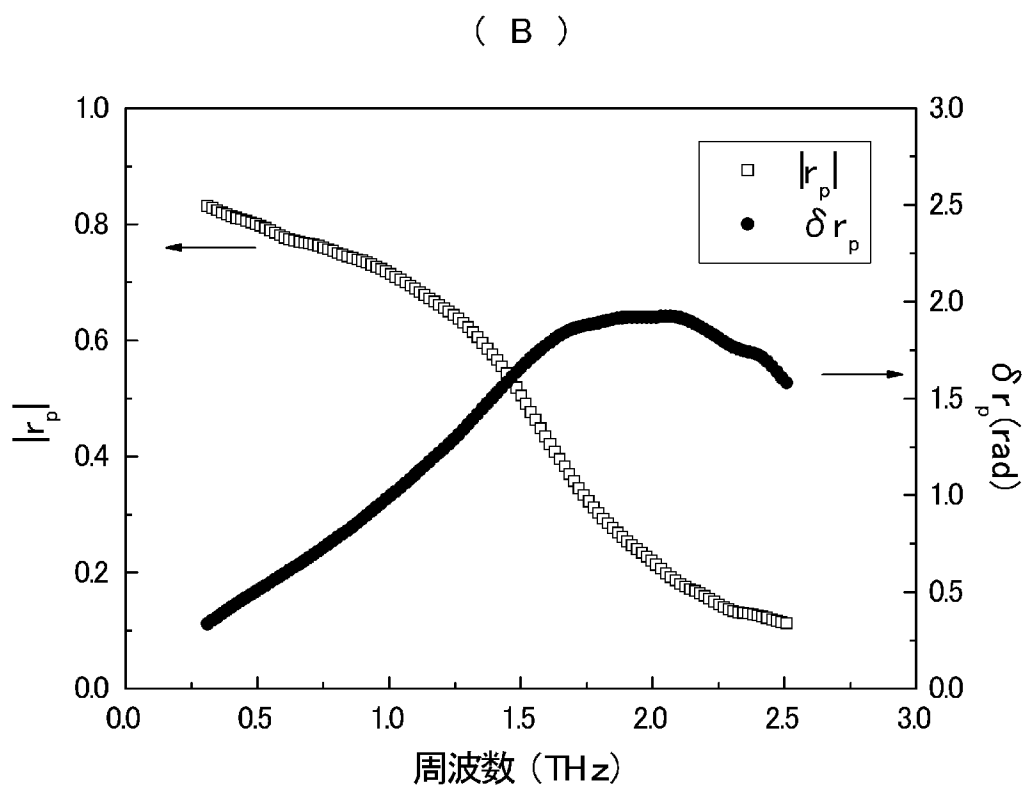
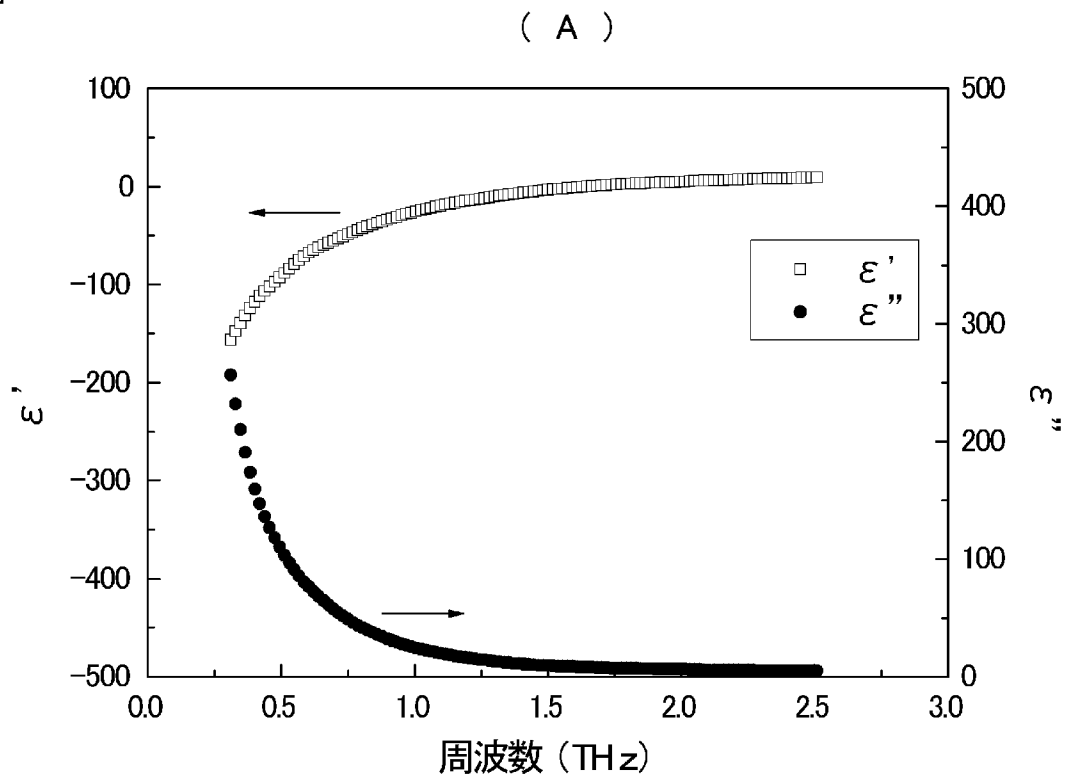
[図4]



[図5]

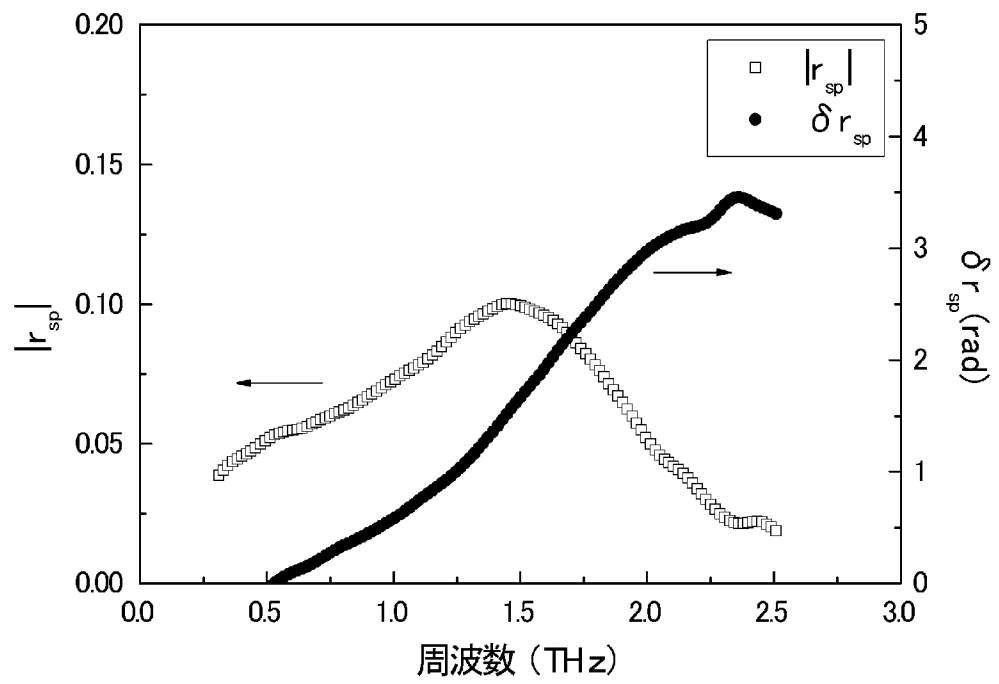


[図6]

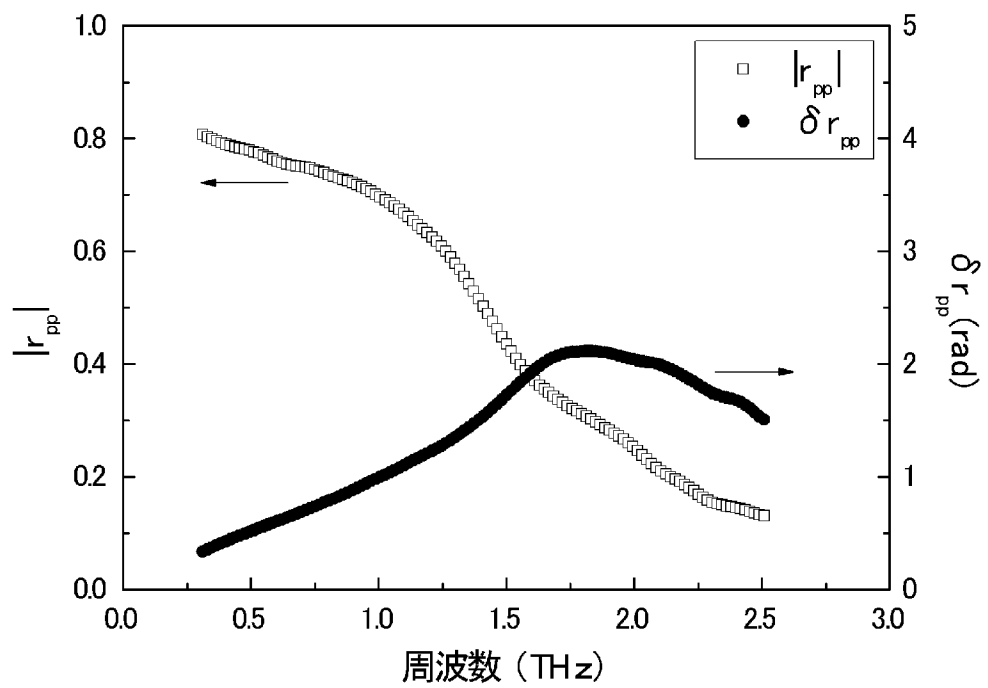


[図7]

(A)

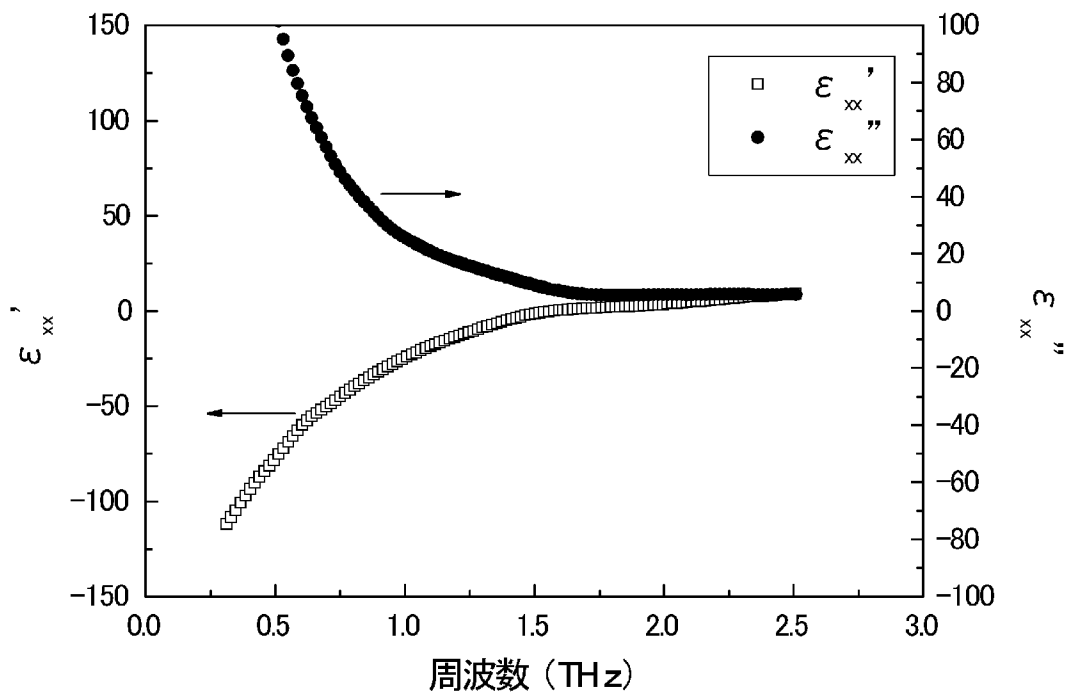


(B)

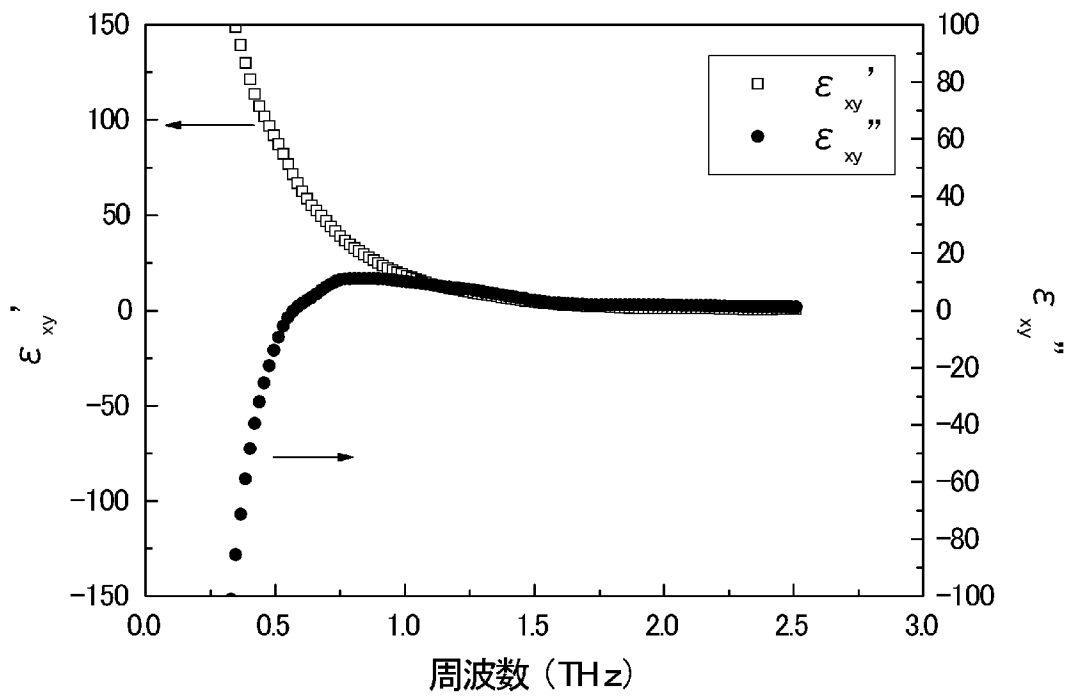


[図8]

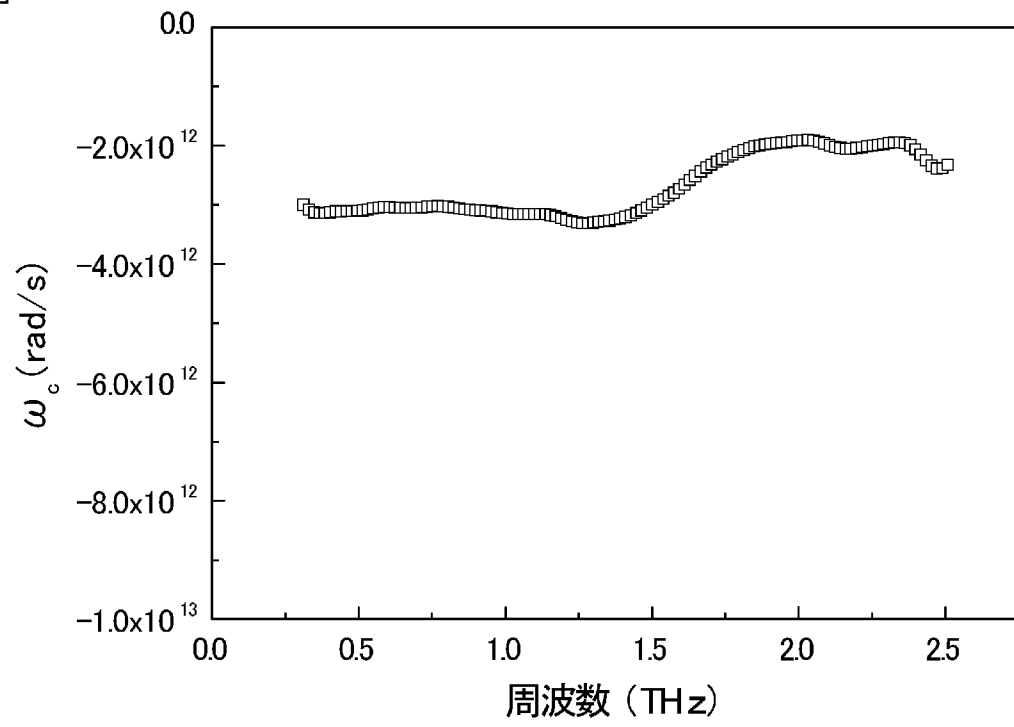
(A)



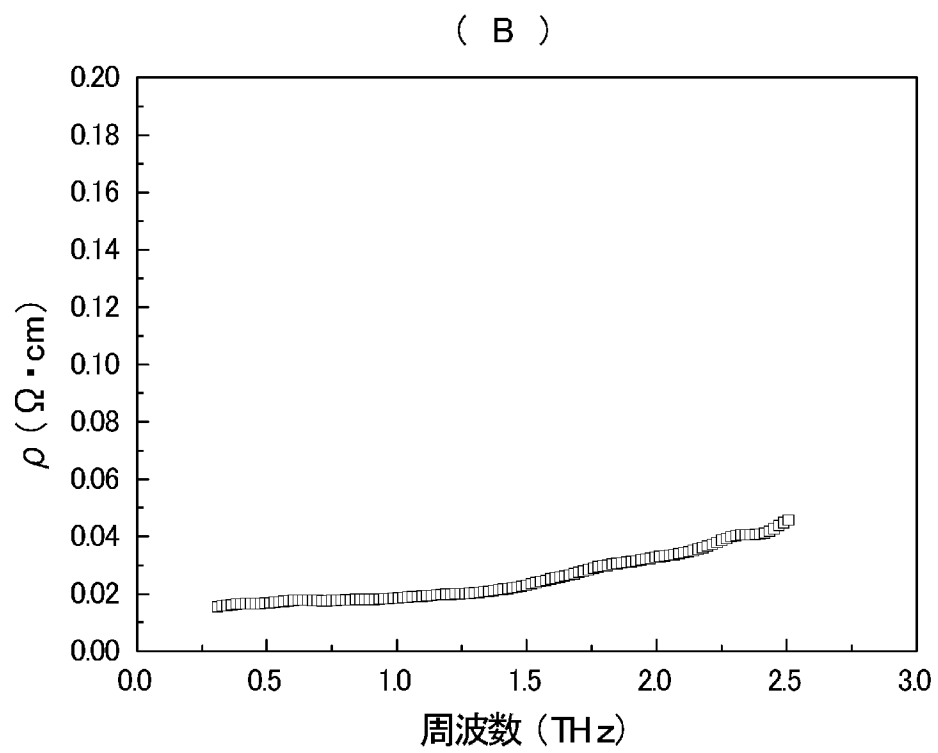
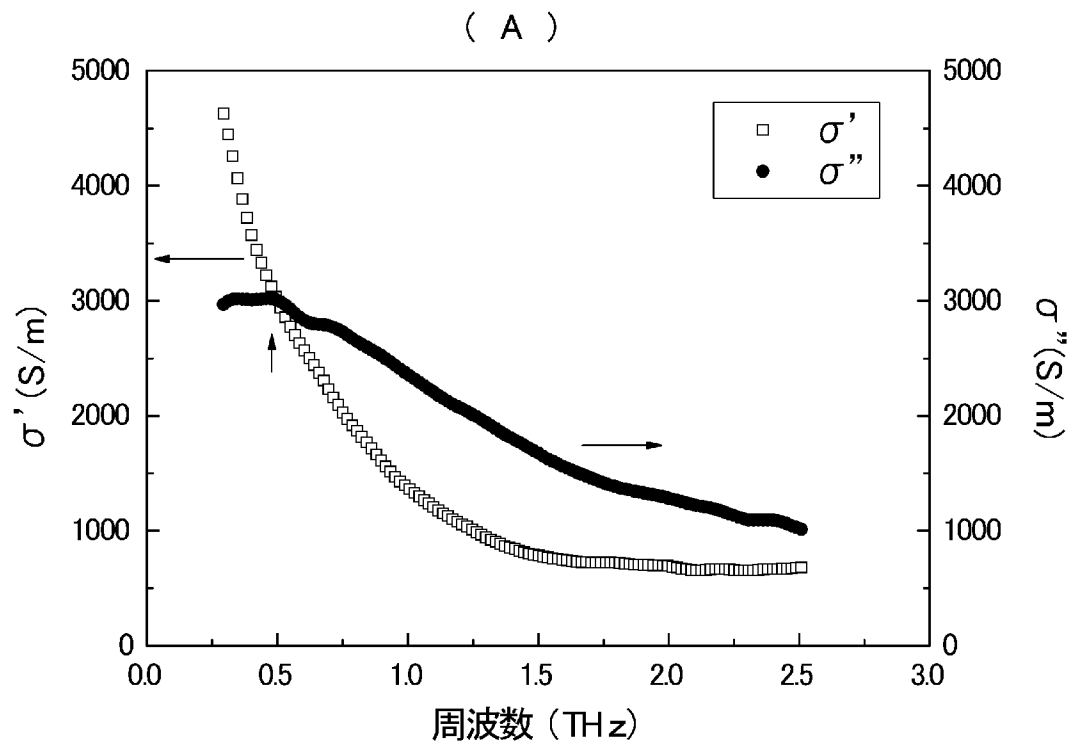
(B)



[図9]



[図10]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/055582

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N21/21 (2006.01) i, G01N21/35 (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)

G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61

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	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

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

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Y. Ino, R. Shimano, Y. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami, Terahertz time domain magneto-optical ellipsometry in reflection geometry, Physical Review B, 2004, Volume70/Issue15, 155101-1_9	1-10
Y		11-16
Y	JP 2005-315708 A (Japan Science and Technology Agency), 10 November 2005 (10.11.2005), entire text; fig. 1 (Family: none)	11-16
A	JP 2003-83888 A (Communications Research Laboratory), 19 March 2003 (19.03.2003), paragraph [0020]; fig. 1 (Family: none)	1

☐ 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
27 May, 2011 (27.05.11)

Date of mailing of the international search report
07 June, 2011 (07.06.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））
Int.Cl. G01N21/21(2006.01)i, G01N21/35(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（I P C））

Int.Cl. G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 1 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 1 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 1 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/JMEDPlus/JST7580(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	Y. Ino, R. Shimano, Y. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami, Terahertz time domain magneto-optical ellipsometry in reflection geometry, Physical Review B, 2004, Volume70/Issue15, 155101-1_9	1-10 11-16
Y	JP 2005-315708 A (独立行政法人科学技術振興機構) 2005.11.10, 全文, 図 1 (ファミリーなし)	11-16

☒ 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

2 7 . 0 5 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日

0 7 . 0 6 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

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）

田嶋 亮介

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 2

2 W

4 7 4 5

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	JP 2003-83888 A (独立行政法人通信総合研究所) 2003.03.19, 段落 0020, 図 1 (ファミリーなし)	1