(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
2015 年 10 月 22 日(22.10.2015)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2015/159864 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 21/66 (2006.01) *G01N 21/63* (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2015/061387

(22) 国際出願日: 2015 年 4 月 13 日(13.04.2015)

(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 2014-086522 2014 年 4 月 18 日(18.04.2014) JP

(71) 出願人: 国立大学法人九州工業大学(KYUSHU INSTITUTE OF TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒8048550 福岡県北九州市戸畑区仙水町１番１号 Fukuoka (JP).

(72) 発明者: 金田 寛(KANETA, Hiroshi); 〒8048550 福岡県北九州市戸畑区仙水町１番１号 国立大学法人九州工業大学内 Fukuoka (JP). 大村 一郎(OMURA, Ichiro); 〒8048550 福岡県北九州市戸畑区仙水町１番１号 国立大学法人九州工業大学内 Fukuoka (JP).

(74) 代理人: 加藤 久, 外(KATO, Hisashi et al.); 〒8120011 福岡県福岡市博多区博多駅前３丁目２５番２１号博多駅前ビジネスセンター４１１号 Fukuoka (JP).

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

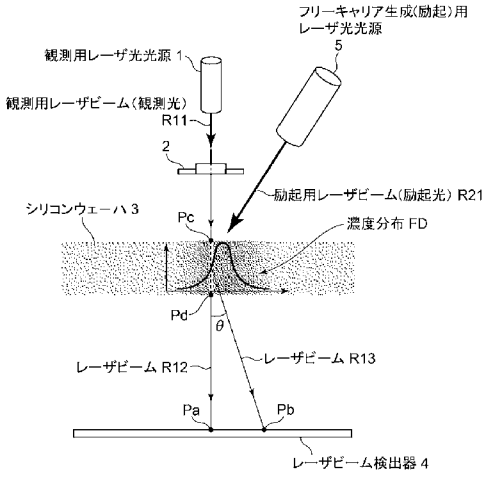
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,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

(54) 発明の名称 : 半導体ウェーハのバルク品質評価方法および装置



1 Observation laser beam source
R11 Observation laser beam (observation light)
3 Silicon wafer
R12, R13 Laser beam
5 Free carrier generation (excitation) laser beam source
R21 Excitation laser beam (excitation light)
FD Concentration distribution
4 Laser beam detector

(57) **Abstract**: In order to establish a wafer evaluation technique for measuring the lifetimes of carriers in all semiconductor wafers when the semiconductor wafers are cut and manufactured from a semiconductor crystal ingot, the wafer evaluation technique being practical and more significantly improved in measurement speed, accuracy, device operation, and the like than conventional methods, the present invention is a method and device for evaluating the lifetime of free carriers (a general term for free electrons and free holes) within a silicon wafer (3). First, free carriers are generated (excited) by irradiating the silicon wafer (3) to be evaluated with a free carrier generation (excitation) laser beam (R21). Next, the silicon wafer (3) in which the concentration of the generated free carriers is non-uniformly distributed is irradiated with an observation laser beam (R11). An angle at which the observation laser beam (R11) is emitted after being transmitted through the silicon wafer (3) is measured. Consequently, the spread (half-value width) of the distribution curve (FD) of electrons and holes can be measured, thereby making it possible to evaluate the quality of the silicon wafer (3).

(57) 要約: 半導体結晶インゴットから切り出して半導体ウェーハを製造する場合、すべての半導体ウェーハ内部のキャリア寿命を測定する、実用的で従来法に比べて測定速度と精度、装置操作などの点で大幅に改善されたウェーハ評価技術を確立する。 本発明は、シリコンウェーハ３内部のフリーキャリア（自由電子と自由正孔の総称）の寿命を評価する方法および装置である。まず、評価対象とするシリコンウェーハ３に、フリーキャリア生成（励起）用レーザビームＲ２１を照射して、フリーキャリアを生成（励起）させる。次に、生成されたフリーキャリアの濃度が不均一分布したシリコンウェーハ３に、観測用レーザビームＲ１１を照射する。そして、この観測用レーザビームＲ１１がシリコンウェーハ３を透過した後に出射する角度を計測する。これにより、電子と正孔の分布曲線ＦＤの広がり（半値幅）が測定でき、シリコンウェーハ３の品質評価が可能となる。

WO 2015/159864 A1

明　細　書

発明の名称 ： 半導体ウェーハのバルク品質評価方法および装置

技術分野

[0001] 本発明は、電子デバイス製造用半導体ウェーハのバルク品質評価方法および装置に関する。

背景技術

[0002] 急拡大する電力用半導体の需要に対して、その製造に用いられる材料（半導体結晶ウェーハと半導体結晶インゴット）の究極までの品質向上と管理による電力変換器の性能、製造歩留りの向上さらに信頼性の向上が大きな課題となっている。現在３兆円といわれる電力用半導体のうち、高電圧大電流を担う素子、たとえばＩＧＢＴ（Insulated Gate Bipolar Transistor）やＰｉＮダイオードの分野が、ＨＥＶ(ハイブリッド電気自動車)の出現やエアコンのインバータ化などから急拡大してきており、まさにこの分野は材料品質およびその管理が電力変換器の性能や信頼性の向上に直結していることが知られている。

[0003] ところが従来は材料品質を高速で高精度に計測する機器がなかったため、材料の抜き取り検査、いわゆるサンプル検査のみが行われ、出荷時、納入時の全数検査は行われてこなかった。すなわち一つの半導体結晶インゴットから作られたすべてのウェーハについて、そのウェーハの取得部位（インゴットにおける部位）まで含めた品質データが完備・保存されているという管理体制での製造方式にはなっていなかった。このため、性能の悪い電力用半導体や故障が発生しても材料品質の点で、結晶インゴット製造までさかのぼって原因究明を行う（結晶起因なのか、あるいはその後の工程に起因するのか）というトレーサビリティーすら確保できない状況であった。

[0004] 従来、ウェーハ品質に関する上述のような抜き取り検査に使われる方法として、レーザ光照射によって発生させたフリーキャリアが時間とともに消滅してゆく過程を、ウェーハ表層のフリーキャリアによるマイクロ波反射の時

間減衰として捉える方法（μ－ＰＣＤ法、例えば非特許文献１参照）がある。しかし、この方法では、その測定原理上、半導体ウェーハの内部品質（結晶性）を評価するには、表面再結合センターを消去するための特殊な表面処理が必要となり、そのための時間と手間が全体の評価速度を向上させる上で妨げになっている。また、その表面処理が安定して同一条件で行えないことなどに起因して、品質評価結果が大きくばらつくという欠点は今でも解消されていない。

[0005] 更に、評価自体が照射したレーザ光の反射率の測定によるものであるため、高精度測定、すなわち品質判定の分解能を上げようとすると、ウェーハの一点に対する測定自体に長時間を要し、かつウェーハ全面のスキャン測定には、１枚当たり２０分程度の時間を要する。この測定速度向上の解決に立ちはだかる測定原理上の問題のために、ウェーハの全数検査は事実上困難であった。

[0006] 半導体ウェーハを評価する装置として、特許文献１には、第１のフォトンビームを発生し、かつ該第１フォトンビームがウェーハの或る領域に入射したときに、電荷キャリアの波が前記領域に発生しない程度に十分に低い周波数をもって変調された第１の強度を第１フォトンビームに与えるような第１のソースと、第２のフォトンビームを発生し、かつ該第２フォトンビームがウェーハの前記領域に入射したときに、無視し得る数を超えないような電荷キャリアが前記領域に発生する程度に、前記第１ビームのフォトンよりも十分に低いエネルギーを第２ビームのフォトンに与えるような第２のソースと、第２ビームの、前記領域により反射された後に前記周波数にて変調された部分の光路内に配置された光電性素子とを有し、光電性素子が、第１ビームの入射により前記領域内に形成された電荷キャリアの第１の濃度を表す第１の信号を発生する装置が開示されている。

[0007] また特許文献２には、波長が互いに異なる少なくとも２種類の光を、測定対象の半導体における互いに異なる第１および第２領域に照射する光照射部と、第１および第２領域のそれぞれに所定の測定波を照射する測定波照射部

と、第１領域で反射された前記測定波の第１反射波または第１領域を透過した前記測定波の第１透過波と第２領域で反射された前記測定波の第２反射波または第２領域を透過した前記測定波の第２透過波との差である差測定波を、第１反射波または第１透過波のままで用いるとともに第２反射波または第２透過波のままで用いることによって生成する差測定波生成部と、差測定波生成部で生成された差測定波を検出する検出部と、検出部で検出された検出結果に基づいて測定対象の半導体におけるキャリア寿命を求める演算部とを備えた半導体キャリア寿命測定装置が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：特表２００２－５１７９１５号公報

特許文献2：特開２０１１－２３３７４２号公報

非特許文献

[0009] 非特許文献1：「半導体プロセスにおける重金属汚染の検出－キャリアライフタイム測定装置－」、住江伸吾、高松弘行、神戸製鋼技報　Ｖｏｌ．５２，Ｎｏ．２，ｐｐ．８７－９３（２００２）

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 前掲の非特許文献１、特許文献１および２に開示された従来の半導体ウェーハの評価方法、装置では、いずれも、半導体ウェーハの表層部におけるフリーキャリアの状況を、反射波を観測することにより評価している。このような方法は、半導体ウェーハの表層部の結晶品質が問題となるＬＳＩ（Large Scale Integration）においては適用できるが、半導体ウェーハの内部の結晶品質が問われる半導体、例えばＩＧＢＴやＰｉＮダイオードに対しては測定精度が悪く、正しい評価ができない。

そこで本発明は、半導体結晶インゴットから切り出して半導体ウェーハを製造する場合、すべての半導体ウェーハ内部のキャリア寿命を測定する、実

用的で従来法に比べて測定速度と精度、装置操作などの点で大幅に改善されたウェーハ評価技術を確立することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0011] 本発明においては、バルク品質の評価に先立ち、ウェーハに前処理を施さないで、ウェーハ自身を評価装置にセットすれば評価準備が完了するという方法を実現する。

評価原理として、半導体ウェーハの表層のみからの応答を使うのではなく、ウェーハの内部からの応答を使う（内部の状態を反映する方法を使う）という手段を採用する。

従来のマイクロ波ＰＣＤ法（μ－ＰＣＤ法）に比べて、ウェーハ（インゴット）の一点の品質評価時間を格段に短縮できる新規の評価原理を用いる。具体的には、精度向上に繰り返し測定（データ積算）が必要となる従来のシグナル強度測定の代わりに、単発の測定で精度が得られる原理を採用する。

[0012] すなわち本発明は、半導体ウェーハ内部のフリーキャリア（自由電子と自由正孔の総称）の寿命を評価する方法および装置であって、評価対象とする半導体のエネルギーバンドギャップよりも大きなエネルギーのフォトンを含む励起光を照射することによってフリーキャリアを生成（励起）し、生成された当該フリーキャリアの濃度が不均一分布しているウェーハの部分に、評価の対象とする物質のエネルギーバンドギャップよりも小さなフォトンエネルギーの観測光を照射し、当該観測光がウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度を計測することを特徴とするものである。

ここで、「出射する角度を計測する」とは、直接角度を計測する以外に、観測光が励起光の影響を受けずに出射したときの到達点と、観測光が励起光の影響を受けて出射したときの到達点との距離を測定する場合も、この距離と角度とは比例の関係にあることから含まれる。

[0013] 前記半導体ウェーハに照射していた前記励起光を不到達にして、前記観測光が、前記半導体ウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度の時間的な変化を計測すると、時間変化する様子の観測結果から、フリーキャリア

寿命を算出・評価できる。

[0014] 前記励起光照射手段は、前記励起光としてレーザ光、特にＹＡＧレーザを用いることができる。

前記観測光照射手段は、前記観測光としてレーザ光、特に赤外光レーザを用いることができる。また、前記観測光照射手段をＬＥＤにより形成することもできる。

[0015] 前記励起光照射手段は、前記観測光に対して、前記励起光を、平行で逆向き、もしくは平行で同じ向きとなるように照射することができる。

前記励起光照射手段は、前記観測光に対して、前記励起光を平行となるように照射することができる。あるいは、前記励起光照射手段は、前記観測光に対して、前記励起光を傾斜するように照射することができる。

[0016] 前記励起光照射手段と前記観測光照射手段とは、前記励起光と前記観測光とを、前記半導体ウェーハのおもて面もしくは裏面に対して４５度の入射角をもって、前記半導体ウェーハに入射するように照射することができる。

[0017] 前記励起光照射手段または前記観測光照射手段の少なくともいずれか一方は、前記励起光と前記観測光とが、前記半導体ウェーハの内部において、非交差状態から交差状態を経て、非交差状態となるように走査すると、フリーキャリアの半値幅を計測することができる。

前記励起光照射手段または前記観測光照射手段の少なくともいずれか一方は、前記励起光と前記観測光とが、前記半導体ウェーハの内部において、互いに平行で隔たった状態から、互いに一致した状態を経て、互いに平行で隔たった状態となるように走査することができる。

発明の効果

[0018] 発明の直接的な効果は、半導体ウェーハの品質評価速度を従来技術に比べて格段に向上させることである。この評価速度の大幅向上によって、下記のような今までは不可能であった最高水準の品質保証とトラブルシューティングが可能となる。

パワー半導体の製造において、原材料である半導体ウェーハ（結晶インゴ

ット）から最終製品製造までの工程のすべてにおいて良品・不良品の全数管理が可能となり、最終製品の品質保証が格段に向上する、また、最終製品で不良などが発生した場合に、製造工程を結晶インゴット（の部位）までさかのぼってテストデータを調査できるようになるため、不良原因の究明が迅速かつ正確にできるようになる。

さらに、このような製品レベルでごくまれに発生するトラブルの原因究明を通して、製品製造技術そのものを改善してゆく手掛かりが掴める。

図面の簡単な説明

[0019] [図1]本発明の実施の形態に係る半導体ウェーハのバルク品質評価装置の構成と動作を示す模式図である。

[図2]本発明における励起用レーザビームの照射位置の関数となる屈折量およびキャリア濃度の関係を示すグラフである。

[図3]本発明の予備実験で用いた半導体ウェーハのバルク品質評価装置の配置を示す図である。

[図4A]励起用レーザビームと観測用レーザビームとを照射したときの反射光の状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｚ軸に沿った方向から見た図である。

[図4B]励起用レーザビームを照射したときの反射光の状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｙ軸に沿った方向から見た図である。

[図4C]励起用レーザビームと観測用レーザビームとを照射したときの反射光の状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｙ軸に沿った方向から見た図である。

[図5]図３に示す半導体ウェーハのバルク品質評価の変形例の構成図である。

[図6]励起用レーザビームの照射を停止した状態と観測用レーザビームの屈折角との関係を示すグラフである。

[図7A]レーザビームが平行となる配置の例を示すものであり、観測用レーザビームと励起用レーザビームとの関係を示す図である。

[図7B]レーザビームが平行となる配置の例を示すものであり、観測用レーザ

ビームの屈折を示す図である。

[図7C]レーザビームが平行となる配置の例を示すものであり、キャリアの濃度分布を示す図である。

[図8A]立体交差ビーム配置の例を示すものであり、シリコンウェーハの断面方向から見た図である。

[図8B]立体交差ビーム配置の例を示すものであり、シリコンウェーハの正面から見た図である。

[図9]反射法によって半導体ウェーハのバルク品質評価を実施した場合の装置の配置を示す図である。

[図10A]励起用レーザビームを照射しない場合の観測用レーザビームの反射の状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｚ軸に沿った方向から見た図である。

[図10B]励起用レーザビームを照射しない場合の観測用レーザビームの反射の状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｙ軸に沿った方向から見た図である。

[図11A]励起用レーザビームを照射した場合の観測用レーザビームの反射光の屈折状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｚ軸に沿った方向から見た図である。

[図11B]励起用レーザビームを照射した場合の観測用レーザビームの反射光の屈折状態を示すシリコンウェーハの断面図であり、Ｙ軸に沿った方向から見た図である。

符号の説明

[0020] １　観測用レーザ光光源

２　調光部

３　シリコンウェーハ

３１　照射面

３２　反射面

４　レーザビーム検出器

５　フリーキャリア生成（励起）用レーザ光源

６　調光部

７　反射部

８　ＸＹＺステージ

９　シャッタ装置

ＦＤ　濃度分布

Ｒ１１　観測用レーザビーム

Ｒ１２　屈折しない場合の透過したレーザビーム

Ｒ１３　屈折した場合の透過したレーザビーム

Ｒ１４　反射した場合のレーザビーム

Ｒ２１　フリーキャリア生成（励起）用レーザビーム（励起用レーザビーム）

θ　屈折角

ϕ，ϕ'　入射角

発明を実施するための形態

[0021] 以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら具体的に説明する。

図１は、本発明の品質評価技術を、もっとも基本的な形でパワーデバイス用のＭＣＺ（Magnetic field applied Czochralski法で製造）シリコンウェーハ（リンドープ、比抵抗＝約２０±３Ωｃｍ）を評価対象として実施した場合の半導体ウェーハ（以下、単にウェーハと称することがある。）のバルク品質評価装置の構成とその動作説明の模式図である。

[0022] 図１に示すように、観測用レーザ光光源１は、シリコンウェーハ３上の点Ｐｃからの垂線上に位置している。この観測用レーザ光光源１から波長が１５５０ｎｍ（０．７８７ｅＶ）の赤外光の観測用レーザビームＲ１１が観測光として出射される。観測用レーザビームＲ１１は、集光レンズ、スリットないしアパーチャなどの調光部２で所望のビーム径に絞られ、評価対象のシリコンウェーハ３に照射される。

この観測用レーザビームＲ１１はシリコンウェーハ３を容易にかつ真直ぐ

に透過し、計測手段として機能するレーザビーム検出器４に到達する。この観測用レーザビームＲ１１が到達したレーザビーム検出器４上の到達点を点Ｐａとする。レーザビーム検出器４としては、ＣＣＤ（Charge Coupled Device）やＣＭＯＳ（Complementary Metal-Oxide Semiconductor）イメージセンサを用いることができる。

[0023] 図１においては、シリコンウェーハ３を透過したレーザビームＲ１２が、レーザビーム検出器４の点Ｐａに真っ直ぐ到達している状態において、励起光照射手段として機能するフリーキャリア生成（励起）用レーザ光光源５（波長１０６４ｎｍ：フォトンエネルギー１．１６５ｅＶ：出力１．３Ｗ）から、励起光として出射される励起用レーザビームＲ２１を、観測用レーザビームＲ１１がシリコンウェーハ３に到達する点Ｐｃ（図１参照）の近傍に、観測用レーザビームＲ１１に対して傾斜した状態となるように照射する。

ここで、傾斜した状態とは、シリコンウェーハ３の厚みを見るような方向で、観測用レーザビームＲ１１に対して、励起用レーザビームＲ２１が三次元的に傾いている状態を示す。

このレーザ照射によって、シリコンウェーハ３上の点Ｐｃ近傍に自由電子と自由正孔（フリーキャリア）が生成され、このフリーキャリアがシリコンウェーハ３内部と周囲に向かって拡散する。以下、フリーキャリア生成（励起）用レーザ光光源５を、励起用レーザ光光源５と略す。

[0024] 電子と正孔の濃度が大きくなる部分は、図１では、シリコンウェーハ３の濃い色で影付けをした部分（濃度分布ＦＤ）として示してある。この生成された電子と正孔は、拡散の最中に再結合を起こし消滅（対消滅）する。電子と正孔が生成されてから再結合消滅するまでの平均時間をキャリアの寿命と呼ぶが、これを決めているのが結晶品質である。

励起用レーザ光光源５からの励起用レーザ照射の定常状態においては、励起用レーザビームＲ２１の照射によって自由電子と自由正孔、すなわちフリーキャリアが作られる速度と、再結合消滅の速度が釣り合って、図１のシリコンウェーハ３の中に描かれたような、時間に依存しないフリーキャリア濃

度の分布が生じる。

この分布濃度ＦＤの形状がシリコンウェーハの品質を反映する。例えば、結晶品質が良いほど分布濃度ＦＤの分布曲線の広がり（半値幅）が大きくなる。そこで、分布濃度ＦＤの分布曲線の広がり（半値幅）を測定することでシリコンウェーハの品質評価が可能となる。

[0025] この分布濃度ＦＤの半値幅を測定するのには、光照射（レーザ照射）で生成されたフリーキャリアによって観測用レーザビームＲ１１が屈折を受けるという原理を用いる。つまり、図１に示したように、観測用レーザビームＲ１１がフリーキャリア濃度の分布濃度ＦＤの傾斜部分（濃度勾配が存在する部分）を透過する際には、フリーキャリアの濃度勾配と濃度に応じて屈折する。このように、屈折して透過した観測用レーザビームを図１のＲ１３で示している。屈折の大きさは、屈折角θや図１の点Ｐａを基準にした時の点Ｐｂまでの距離に対応する。

[0026] そこで、図１の、励起用レーザ光光源５以外の装置部分は固定しておいて、励起用レーザ光光源５の位置を、点Ｐｃを基準に左から右（あるいはその逆）に移動させてゆくと、移動距離の関数として、点Ｐａと点Ｐｂの距離（言い換えれば屈折角θ）が変化する。この様子を、キャリア濃度の分布とともに描いたのが図２である。

図２の上のグラフは、Ｘ軸を、シリコンウェーハ３における観測用レーザビームＲ１１と励起用レーザビームＲ２１との照射位置の距離（相対位置）とし、Ｙ軸を屈折角θ（点Ｐａに対する点Ｐｂの変位）としている。

図２の下のグラフは、Ｘ軸を、シリコンウェーハ３における観測用レーザビームＲ１と励起用レーザビームＲ２１との照射位置の距離（相対位置）とし、Ｙ軸をキャリア濃度としている。そして、Ｘ軸上の原点０は、励起用レーザビームＲ２１か、または観測用レーザビームＲ１１のいずれか一方の照射位置を平行移動させて、走査したときに、それぞれの照射位置が一致した場所であることを示している。

[0027] 図２に示したように、キャリア濃度の分布濃度ＦＤの半値幅は、フリーキ

ャリアの寿命に対応しており、フリーキャリアを生成するための励起用レーザビームＲ２１の照射位置を変えた時に観測される点Ｐａと点Ｐｂの距離である。言い換えれば、分布濃度ＦＤの半値幅は、屈折角θが最大値となる照射位置と最小値となる照射位置の間の間隔であり、シリコンウェーハ３を透過した後に出射する角度として求められる。

この屈折角θが最大値となる照射位置と最小値となる照射位置の間の間隔が広いシリコンウェーハ３が、フリーキャリアの寿命が長いことを示しているため、品質が良いと評価できる。

[0028] 本発明のバルク品質評価方法の特徴は、

（１）フリーキャリア生成のために光照射（レーザ照射）を行うことと、

（２）生成されたフリーキャリア濃度の勾配によって観測用レーザビームが屈折透過することと、

（３）透過した観測用レーザビームの到達位置などをＣＣＤのような二次元撮像素子を使って検知すること

の三つの要素を組み合わせていることである。

観測用レーザビームは、当然、ウェーハの内部に到達する（透過する）ため、評価対象となっているのは従来のマイクロ波反射減衰法（評価対象は表面近傍のフリーキャリア）と違って、ウェーハ内部の結晶性である。つまり、パワーデバイス用ウェーハで重要となる「バルクライフタイム」が計測されている。

[0029] 一般にレーザビームなどの光ビームを使った評価方法では、評価量を光の強度として計量する方法（光吸収法、反射法、ルミネッセンス法）よりも、光線（ビーム）の方向変化としてとらえる方が、測定時間も短く、精度も上がる。それは、強度測定にたよる方法では、ｓ／ｎ（信号雑音比）向上などのために、シグナルの取得を多数回繰り返す必要があるためである。これに比べ、光線の進行方向を測定する方法（例えばＸ線回折など）では、短時間で測定を完了することができる。

[0030] 更に、ＣＣＤをレーザビーム検出器４として用いることのメリットは非常

に大きく、二次元画像の撮像とその画像解析の手法を組み合わせることで、評価精度の向上と時間短縮が可能となる。

[0031] ここで、この発明に至る予備実験で用いた半導体ウェーハのバルク品質評価装置の配置を図３に示す。以下、半導体ウェーハのバルク品質評価装置を、バルク品質評価装置と略す。

図３に示すバルク品質評価装置では、光源レンズ付きの観測用レーザ光光源１として赤外レーザを用いており、調光部２（第１の調光部）として集光レンズを用いている。また、バルク品質評価装置では、レーザビーム検出器４としてＣＣＤを用いており、励起用レーザ光光源５として、ＹＡＧレーザを用いている。

更に、バルク品質評価装置には、観測用レーザビームを集光するための集光レンズだけでなく、シリコンウェーハ３を透過した観測用レーザビームＲ１２，Ｒ１３を集光するための調光部６（第２の調光部）としての集光レンズと、レーザビーム検出器４へ導光するための反射部７としてのシリコンウェーハとを備えている。また、励起用レーザ光光源５は、走査装置の一例であるＸＹＺステージ８に搭載されている。

[0032] このＸＹＺステージ８は、ステージ水平送り調整部（Ｘ軸方向，Ｙ軸方向）と、ステージ高さ送り調整部（Ｚ軸方向）とを備えている。これらの調整部により、励起用レーザ光光源５を、シリコンウェーハに対して、上下方向に平行移動したり、左右方向に平行移動したり、接近方向または離間方向に移動したりすることができる。このように励起用レーザ光光源５を精度よく移動させることで、シリコンウェーハ３への照射位置を調整することができる。

そして、バルク品質評価装置は、ＸＹＺステージ８の走査を制御すると共に、レーザビーム検出器４にて受光した観測用レーザビームＲ１２，Ｒ１３の位置からシリコンウェーハ３を透過した後に出射する角度として求め、キャリア濃度の分布濃度ＦＤの半値幅を算出することで、シリコンウェーハ３の品質を評価する制御装置、例えば、コンピュータ（図示せず）を備えてい

る。

[0033] 制御装置により制御されるＸＹＺステージ８により、励起用レーザ光光源５を移動させることで、励起用レーザビームＲ２１が、観測用レーザビームＲ１１に、非交差状態から交差状態を経て、非交差状態となるように走査する。

ＸＹＺステージ８により励起用レーザ光光源５を移動させて励起用レーザビームＲ２１を走査して、観測用レーザビームＲ１１が屈折したレーザビームＲ１３をレーザビーム検出器４により測定することで、図２に示すシリコンウェーハ３の特性を得ることができる。

[0034] 図３に示すバルク品質評価装置による評価のうちで特に有効であるシリコンウェーハへのレーザビームの照射例を、図４Ａと図４Ｂとに示す。

図４Ａから図４Ｃでは、直交座標系において、シリコンウェーハ３の厚み方向（左右方向）をＸ軸、奥行き方向をＹ軸、高さ方向（上下方向）をＺ軸として、シリコンウェーハ３を図示している（図３参照）。

[0035] 図４Ａでは、観測用レーザ光光源１（図３参照）から、シリコンウェーハ３に照射される観測用レーザビームＲ１１（赤外レーザ光）と、励起用レーザ光源５からシリコンウェーハ３に照射される励起用レーザビームＲ２１との様子を示している。

[0036] 観測用レーザビームＲ１１は、例えば、シリコンウェーハ３のおもて面上の点Ａに入射角φ＝４５°もって入射すると、その後、シリコンウェーハ３内部で、点Ａから直線ＡＢ，直線ＢＣ、直線ＣＤ，直線ＤＥおよび直線ＥＦにて示される反射を繰り返すと共に、反射位置（例えば、点Ｂ，点Ｄ，点Ｆ）から、直線ＢＰ，直線ＤＱおよび直線ＦＲに示される外部へ出射する光路となる。

このような光路の中で、観測用レーザビームＲ１１が点Ｄからシリコンウェーハ３を出射して直線ＤＱとなる光路がある。

この場合において、励起用レーザビームＲ２１をＺ軸方向から見れば点Ｃと一致する点（以後、この点も同じ記号Ｃを使って点Ｃと表す）から入射角

φ′でシリコンウェーハ３内部に入射させる。但し、励起用レーザビームＲ２１の直線ＵＣは、観測用レーザビームＲ１１の光路に沿う直線ＳＡと直線ＡＢでつくられる仮想平面（ＸＹ平面）、もしくはそれと平行な平面に乗っている状態で入射させ、入射角φ′は観測用レーザビームＲ１１の入射角φ＝４５°と同じになるようにする。点Ｃからシリコンウェーハ３に入射した励起用レーザビームＲ２１は、Ｚ軸方向から見れば、直線ＣＢに示される光路となる。

[0037] つまり、励起用レーザビームＲ２１の光路である直線ＵＣ，直線ＣＢが含まれる仮想平面（ＸＹ平面）は、観測用レーザビームＲ１１の光路である直線ＳＡ，直線ＡＢが含まれる仮想平面（ＸＹ平面）と、互いに平行で隔たった状態から、互いに一致した状態を経て、互いに平行で隔たった状態となるように走査される。この走査は、励起用レーザ光光源５のＺ軸方向をＸＹＺステージ８のＺ軸の調節によって行う。

[0038] このような配置では、観測用レーザビームＲ１１の直線ＢＣにて示される光路部分が、励起用レーザビームＲ２１の直線ＣＢで示される光路部分と、完全に平行（向きは逆向き）になるようにすることができ、かつＸＹＺステージ８のＺ軸方向を調整することによって、相互の高さ（シリコンウェーハ３の板面の位置）関係を変えたり、完全に一致するようにしたりすることができる。

これは、シリコンウェーハ３の外側では互いに非平行な二つのレーザビームが、シリコンウェーハ３内部では、励起用レーザビームＲ２１と観測用レーザビームの光路の一部（図４Ａでは区間ＣＢの光路）がＺ軸方向から見れば完全に一致するという理想的な状況を実現することができるということを示している。このようにして、図３に示すバルク品質評価装置では、観測用レーザビームＲ１１と励起用レーザビームＲ２１とを平行ビーム配置することが可能である。

[0039] この場合には、図４Ｃに示すシリコンウェーハ３の側面図（Ｙ軸方向から見た図）に示した通り、励起用レーザビームＲ２１を照射した際に生成され

る電子・正孔の濃度分布ＦＤによって、観測用レーザビームＲ１１の直線ＢＣで示される光路は、図４Ｃにおける下方に曲げられ、点Ｃで反射したのち、直線ＣＤで示される光路を辿り、下方に屈折を受けた直線ＤＱに示される光路となってシリコンウェーハ３の外部に出射する。

[0040] もちろん、図４Ａにおいては、観測用レーザビームＲ１１の入射角φ’＝励起用レーザビームＲ２１の入射角φの条件を満たせば、その入射角φおよび入射角φ’値が４５°以外の角度であってもよい。

[0041] なお、本実施の形態では、励起用レーザ光光源５は、ＸＹＺステージ８により、励起用レーザビームＲ２１の出射方向を決定しているが、市販の装置により励起用レーザ光光源５の出射方向を設定するようにしてもよい。しかし、市販の装置では、光学定盤のように対称性の良い角度、例えば、４５度ごとしか設定できないものが多い。そのため、シリコンウェーハ３への入射角度に関しては、高い精度を保ちながら、安価な装置（定盤）加工で実現できるという点で、入射角φ’＝入射角φ＝４５°の配置が有利である。

[0042] また、図４Ａに示すように、入射角φ’＝入射角φの条件を満たすビーム配置では、シリコンウェーハ３内での様々な反射の結果、励起用レーザビームＲ２１の反射が観測用レーザビームＲ１１と同じ（平行な）光路を辿り、屈折量計測用レーザビーム検出器４のＣＣＤや、赤外レーザ光を照射する観測用レーザ光光源１に到達して、測定を阻害することがある。この対策として、光路上のレーザビーム検出器４と、観測用レーザ光光源１と前方（図４Ａに示す直線ＳＡに示すの光路の途中）にノッチフィルタを配置することで、励起用レーザビームＲ２１がレーザビーム検出器４や観測用レーザ光光源１に到達するのを防止することができる。

[0043] 図３に示すバルク品質評価装置では、観測用レーザ光光源１が固定で、励起用レーザ光光源５がＸＹＺステージ８により走査される。しかし、観測用レーザ光光源１をＸＹＺステージ８などの走査装置により走査するようにしてもよい。

[0044] 上に挙げた実施の形態では、励起用レーザの照射によって生成されたフリ

ーキャリアの不均一な濃度分布ＦＤ（ウェーハ内の位置の関数としての濃度の不均一）が時間によらず、一定になるように制御された条件下（以下、定常状態と呼ぶ）で行われるという、本評価原理を用いた評価法のうちでも、比較的単純かつ簡単な方法である。

[0045] この他にも、同じ原理に基づく以下のような有効な品質評価法の実施例を挙げることができる。

例えば、屈折ビーム（屈折したレーザビームＲ１３）の時間変化を観測する評価法である。

励起用レーザビームＲ２１の照射によって生成されたフリーキャリアの不均一な濃度分布ＦＤ（ウェーハ内の位置の関数としての濃度の不均一）が時間とともに変化（減衰）するという状態（以下、非定常状態と呼ぶ）を利用して、観測用レーザビームの到達点（図１の点Ｐｂ）が時間変化する様子の観測結果から、フリーキャリア寿命を算出・評価する。この非定常状態を使ってフリーキャリア寿命を算出・評価するバルク品質評価装置を図５に示す。なお、図５においては、図３と同じ構成のものは同符号を付して説明を省略する。

[0046] 図５に示すバルク品質評価装置は、励起用レーザ光光源５と、シリコンウェーハ３との間に、励起光である励起用レーザビームＲ２１をシリコンウェーハ３へ不到達とする手段であるシャッタ装置９が配置されている。

このシャッタ装置９により励起用レーザビームＲ２１を遮蔽すると、励起用レーザビームＲ２１により生成されていたフリーキャリアの濃度が低下する。従って、図６に示すように定常状態から非定常状態となり、屈折角θが減衰して徐々に０に近づく。これをレーザビーム検出器４により測定して、図示しない制御装置にて、指数関数的な減衰（点Ｐａから点Ｐｂまでの距離の減少）の時定数からフリーキャリア寿命を算出・評価する。屈折角θが０になる時間が長いと、フリーキャリア寿命が長いことを示すので、シリコンウェーハ３が品質良いと評価できる。

[0047] なお、図５に示すバルク品質評価装置では、シャッタ装置９により励起用

レーザビームＲ２１を遮蔽して、シリコンウェーハ３へ不到達となるようにしていたが、励起用レーザ光源５の電源を投入・切断したり、励起用レーザ光源５の内部で励起用レーザビームＲ２１が出射しないようにしたりして不到達とすることができる。また、励起用レーザビームＲ２１の出射方向を変更して不到達とすることもできる。

[0048] この場合、到達点の時間変化はマイクロ秒の時間スケールで起こる場合を想定する必要があるため、その様子を観測するためには、レーザビーム検出器４は、ＣＣＤよりも応答速度の速いフォトダイオードアレイやＣＭＯＳイメージセンサなどの高速度光電デバイスを用いる。

[0049] 上述した図３および図５に示す実施の形態では、シリコンウェーハ３の表面に対してフリーキャリア生成（励起）用レーザビーム（以下、励起用レーザビームＲ２１と称す。）を斜めから照射した例を示したが、この例は、基本的には、図７Ａに示すレーザビームが平行となるように配置した場合（以下、このような配置でのレーザビームを平行ビームと称する。）と同様の作用効果を示す。すなわち、励起用レーザビームＲ２１と観測用レーザビームＲ１１をシリコンウェーハ３の表面に対して距離ｄだけ離れた平行ビームとして照射する。図７Ｂ，図７Ｃに示すように、シリコンウェーハ３の内部では、励起用レーザビームＲ２１の光軸の回りにフリーキャリアの濃度分布ＦＤが生じ、励起用レーザビームＲ２１の光軸の近傍を観測用レーザビームＲ１１が通過する際、濃度分布ＦＤの傾きにより屈折が起こる。シリコンウェーハ３を透過したレーザビームＲ１３は、フリーキャリアの濃度分布の傾きに応じた屈折角θでシリコンウェーハ３を透過し、レーザビーム検出器４で検知される。観測用レーザビームＲ１１と励起用レーザビームＲ２１の距離ｄを“＋”（図７Ｃのように、観測用レーザビームＲ１１の到達点が励起用レーザビームＲ２１の到達点の右側となる状態）から“０”（二つのビームの到達点が重なる状態）を経て“－”（観測用レーザビームＲ１１到達点が励起用レーザビームＲ２１の到達点の左側となる状態）まで相対的に移動させつつ屈折角θを計測する。屈折角θが左側に最も大きくなる場合の距離ｄ

と、右側に最も大きくなる場合の距離ｄとを測定する。これらの距離ｄの値からシリコンウェーハ３の品質を評価することができる。

[0050] 図８Ａ，図８Ｂは、観測光と励起光とが立体交差した状態のビーム配置の例を示す。図５に示すバルク品質評価装置での平行ビーム配置では、励起用レーザビームＲ２１と観測用レーザビームＲ１１とが、シリコンウェーハ３に対して同じおもて面側から入射される。図９に示すバルク品質評価装置での立体交差ビーム配置では、シリコンウェーハ３のおもて面側から励起用レーザビームＲ２１を照射し、シリコンウェーハ３の側部（厚み方向）から観測用レーザビームＲ１１を照射するものである。

[0051] 励起用レーザビームＲ２１と観測用レーザビームＲ１１とは、光軸が交わらない非交差状態から交差状態を経て、非交差状態となるようにし、励起用レーザビームＲ２１の光軸の回りに生じたキャリア濃度分布によって屈折した観測用レーザビームＲ１３の角度θで品質を評価するようにする。

この立体交差ビーム配置の例においても、励起用レーザビームＲ２１と観測用レーザビームＲ１１との光軸同士が非交差状態から交差状態に遷移し、そして非交差状態となるようにすれば、励起用レーザビームＲ２１をシリコンウェーハ３の表面に対して必ずしも垂直に照射する必要はなく、傾斜するように照射してもよい。

[0052] 図３に示すバルク品質評価装置では、観測用レーザビームＲ１１に対してシリコンウェーハ３が直角になっていなくても、シリコンウェーハ３の高い面平行度のために、シリコンウェーハ３を透過してきたレーザビームＲ１２は入射光ビームからわずかに平行移動するが、その進行方向は入射光の進行方向からずれることはない。つまり評価に当たり、観測用レーザビームＲ１１の方向に対してシリコンウェーハ３の面の角度を正確にセットするという点に特別な注意を払う必要性がなく、ウェーハセッティングに手間や熟練を要する必要性は生じない。この点も、評価操作の簡単化による評価速度向上に寄与する。

[0053] 図３におけるバルク品質評価装置では、シリコンウェーハ３を透過してき

たレーザビームＲ１２をレーザビーム検出器４にて計測していたが、図９に示す他の実施の形態に係るバルク品質評価装置では、シリコンウェーハ３を反射したレーザビームＲ１４をレーザビーム検出器４にて計測することもできる。

[0054] ここで、図９に示すバルク品質評価装置を説明する。なお、図９においては、図３と同じ構成のものは同符号を付して説明を省略する。

図９に示すバルク品質評価装置は、レーザビーム検出器４が、シリコンウェーハ３からの反射光（レーザビームＲ１４）を計測する位置に配置されている。

このバルク品質評価装置においては、励起用レーザ光源５からの励起用レーザビームＲ２１をシリコンウェーハ３にて反射させる。シリコンウェーハ３の照射面３１は、励起用レーザビームＲ２１や観測光レーザビームＲ１１が入射できるが、照射面と反対側となる裏面は、レーザビームが出射できないように、鏡面加工が施されているため。鏡面加工は、例えば、シリコンウェーハ３の裏面に反射膜を設けるなどすることができる。この反射膜により反射面３２が、シリコンウェーハ３の裏面に形成される。

観測用レーザビームＲ１１がシリコンウェーハ３にて反射したレーザビームＲ１４によりシリコンウェーハ３を評価する方法を図１０Ａ，図１０Ｂおよび図１１Ａ，図１１Ｂに基づいて説明する。

[0055] 図１０Ａおよび図１０Ｂでは、シリコンウェーハ３の厚み方向（左右方向）をＸ軸、高さ方向（上下方向）をＹ軸、奥行き方向をＺ軸として、シリコンウェーハ３を図示している。

図９Ａに示すように、Ｚ軸方向から見ると、直線ＳＡにて示される観測用レーザビームＲ１１は、点Ａにて入射すると共に、入射角と同じ反射角で、直線ＡＴで示される方向へ反射する。シリコンウェーハ３内へ入射した観測用レーザビームＲ１１は、反射面３２と照射面３１との間で、直線ＡＢ、直線ＢＣ、直線ＣＤ、直線ＤＥおよび直線ＥＦで示される反射を繰り返しながら、反射光として進行する。この状態を図１０Ｂに示すように、Ｙ軸方向か

ら見ると、入射光、反射光および出射光は全て一つの直線に重なる。

[0056] この状態で、図１１Ａ，図１１Ｂに示すように、点Ｃに励起用レーザビームＲ１１を、ＸＹ平面に平行に照射する。

この励起用レーザビームＲ１１の照射によって、フリーキャリアの濃度分布ＦＤが生じる。このとき、励起用レーザビームＲ１１の入射角を調整して、シリコンウェーハ３内部で反射した直線ＢＣにて示されるレーザビームが、濃度分布ＦＤの中心から一側（図１１Ｂにおいては濃度分布ＦＤの中心から上側）を通過するようにする。

この励起用レーザビームＲ１１の照射により、反射面３２の点Ｂで反射したレーザビームは、濃度分布ＦＤを通過する際に、曲線ＢＣ’で示すように電子・正孔濃度が高い濃度分布ＦＤの中心側（図１１Ｂにおいては濃度分布ＦＤの中心から下側）に屈折させられ、点Ｃ’に到達する。

[0057] シリコンウェーハ３の照射面３１に到達したレーザビームは、一部が直線Ｃ’Ｕで示される方向に反射して出射する。残余のレーザビームは、照射面３１にて反射して、直線Ｃ’Ｄで示されるレーザビームとなってシリコンウェーハ３に戻る。

シリコンウェーハ３の照射面３１から出射した直線Ｃ’Ｕで示されるレーザビームは、フリーキャリアの濃度分布ＦＤの影響を受け屈折しているため、シリコンウェーハ３から垂直に出射せずに、ＸＹ平面からずれる。

[0058] このように、シリコンウェーハ３内で反射した観測用レーザビームＲ１１に影響を与える励起用レーザビームＲ１１の照射位置を、観測用レーザビームＲ１１と、非交差状態から交差状態を経て、非交差状態となるように走査する。

まず、励起用レーザビームＲ２１の照射位置が、観測用レーザビームＲ１１の反射光の位置と十分に離れている場合には、観測用レーザビームＲ１１の反射光が濃度分布ＦＤの影響を受けないため、図１０Ａ，図１０Ｂと同様な光路となる。

[0059] 次に、励起用レーザビームＲ２１を走査して、観測用レーザビームＲ１１

の反射光が濃度分布ＦＤの影響範囲（濃度分布ＦＤの中心から一側）に入ると、図１１Ａ，図１１Ｂに示すように濃度分布ＦＤの影響を受け屈折し始める。

次に、励起用レーザビームＲ２１が観測用レーザビームＲ１１の反射光と交差する位置、すなわち、観測用レーザビームＲ１１の反射光が濃度分布のピークの位置と一致する状態では、濃度勾配がゼロであるため屈折は起こらないため、図１０Ａ，図１０Ｂと同様な光路となる。

次に、励起用レーザビームＲ２１を走査して、観測用レーザビームＲ１１の反射光が濃度分布ＦＤの中心から他側に移ると、反射光は図１１Ａ，図１１Ｂに示す屈折の方向とは反対側に屈折し始める。

更に、励起用レーザビームＲ２１の照射位置が、観測用レーザビームＲ１１の反射光の位置と十分に離れ、その影響が反射光に及ばない状態になると、反射光はシリコンウェーハ３から外部に出射するときに、シリコンウェーハ３に直角になり、元々の光路に戻る。

[0060] このように励起用レーザビームＲ２１して、反射光の屈折をレーザビーム検出器４にて順次、受光し、その位置から分布濃度ＦＤの半値幅を計測することで、シリコンウェーハ３のキャリア寿命を知ることができ、品質を評価することができる。

[0061] 上述した本発明の実施の形態においては、励起用レーザ光源５として、波長６３５ｎｍ：フォトンエネルギー１．９５ｅＶの励起用レーザビームを用いた例を示したが、フリーキャリア生成（励起）用レーザ光源５としては、シリコンウェーハの内部までキャリア生成が可能な、例えば、波長１０６４ｎｍのＹＡＧ（Yttrium Aluminum Garnet）レーザを用いることができる。

[0062] 半導体や絶縁体に光を照射すると、価電子バンドの電子が電導バンドに励起されるために光の吸収が起こる。多くの結晶固体では、このような電子の励起のみによっておこる光の吸収は、価電子バンドにいた（始状態の）電子の波数ベクトルと励起された後の電導バンドにいる（終状態の）電子の波数ベクトルが等しい場合に限られる（これを垂直遷移則と呼ぶ）。

この規則をシリコンにおける光吸収の場合に当てはめてみると、価電子バンドの最高エネルギー状態にいる電子が同じ波数ベクトルの電導バンドに励起されることによって強い光吸収が起こる。この励起エネルギーを直接遷移吸収端と呼ぶ。

しかし、実際のシリコンの光吸収は、この直接遷移吸収端よりも低いところから起こる。これは、シリコンにおけるバンド間光遷移が、電子の励起のみによっておこるのではなく、格子振動（フォノン）が電子の励起過程に関与するためである。

つまり、光の吸収と同時にフォノンを発射（生成）をともなってバンド間遷移が起こり得る。このような場合の光による電子の励起は、垂直遷移則にとらわれず、価電子バンドの最高エネルギー状態と電導バンドの最低エネルギー状態の間、すなわちバンドギャップの間で起こることが可能になる。このような励起のエネルギーを間接遷移吸収端という。

[0063] 従って、エネルギーを増加させながらシリコンのバンド間光遷移（による光吸収）を考えると、まずバンドギャップエネルギー（１．１４ｅＶ）に対応する間接遷移吸収端から弱い吸収が始まり、直接遷移吸収端に達すると急激に強い吸収が始まるという振る舞いを示す。従って、光吸収の強度の観点からは、間接遷移吸収端と直接遷移吸収端の間では吸収（よって電子の励起）は起こるが非常に弱い。直接遷移吸収端以上のエネルギーの光に対しては、金属と同様な光学物性を示し、光はほとんど反射されて、結晶内部には到達しない。

[0064] フリーキャリア生成（励起）用レーザ光源５であるＹＡＧレーザが発する光のエネルギーは、ちょうど間接遷移吸収端と直接遷移吸収端の間に入り、適度に電子を励起しながら結晶内部に侵入することができる。定量的には、シリコン結晶の中では、０．５ｍｍの光の侵入（進行）長さ当たり強度（フォトン数）は約５０％に低下する。

本発明ではバルクライフタイムの評価を目的としているため、評価対象になっているシリコンウェーハの内部まで電子（よって正孔も）を励起（生成

）することが必要とされるが、ＹＡＧレーザを用いることによってこの目的を達成することができる。

[0065] さらに、レーザ光以外にも、エネルギー、波長によっては、非コヒーレント光であるＬＥＤ光を励起光、観測光とすることもできる。シリコンウェーハの中に電子および＼または正孔を励起するために使われる光源に要求されるのは、バンドギャップエネルギー（１．１４ｅＶ）以上で、直接遷移吸収端のエネルギー（約２ｅＶ）以下というエネルギー範囲に入るフォトンを発生することと、発する光を集光レンズなどで集光できることである。特に、レーザビームのような可干渉性（コヒーレント性）は必須ではない。ＬＥＤとして、この条件を満たすものは存在するし、更に最適なものを現在の技術で作り出すこともできる。

産業上の利用可能性

[0066] 本発明は、実用的で従来法に比べて測定速度と精度、装置操作などの点で大幅に改善されたウェーハ評価技術として、電子デバイス製造用半導体ウェーハの製造および、電子デバイス製造の技術分野に好適に利用することができる。

請求の範囲

[請求項1] 評価対象とする半導体ウェーハのエネルギーバンドギャップよりも大きなエネルギーのフォトンを含む励起光を前記半導体ウェーハに照射することによって当該半導体ウェーハの内部にフリーキャリアを生成する工程と、

生成された当該フリーキャリアの濃度が不均一分布している前記半導体ウェーハの部分に、評価の対象とする物質のエネルギーバンドギャップよりも小さなフォトンエネルギーをもつ観測光を照射する工程と、

当該観測光が前記半導体ウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度を計測する工程と

を有する半導体ウェーハのバルク品質評価方法。

[請求項2] 前記半導体ウェーハに照射していた前記励起光を不到達にする工程と、

前記観測光が、前記半導体ウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度の時間的な変化を計測する工程と

を有する請求項１記載の半導体ウェーハのバルク品質評価方法。

[請求項3] 評価対象とする半導体ウェーハのエネルギーバンドギャップよりも大きなエネルギーのフォトンを含む励起光を前記半導体ウェーハに照射することによって当該半導体ウェーハの内部にフリーキャリアを生成する励起光照射手段と、

生成された当該フリーキャリアの濃度が不均一分布している前記半導体ウェーハの部分に、評価の対象とする物質のエネルギーバンドギャップよりも小さなフォトンエネルギーをもつ観測光を照射する観測光照射手段と、

当該観測光が前記半導体ウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度を計測する計測手段と

を有する半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項4] 前記励起光照射手段からの前記半導体ウェーハに対する励起光を不到達にする手段と、

前記観測光が、前記半導体ウェーハを透過あるいは反射した後に出射する角度の時間的な変化を計測する手段とを備えた請求項３記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項5] 前記励起光照射手段は、前記励起光として、レーザ光を照射する請求項３記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項6] 前記レーザ光はＹＡＧレーザである請求項５記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項7] 前記観測光照射手段は、前記観測光として、レーザ光を照射する請求項３記載の半導体ウェーハの品質評価装置。

[請求項8] 前記励起光照射手段は、前記観測光に対して、前記励起光を平行で逆向き、もしくは平行で同じ向きとなるように照射する請求項３記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項9] 前記励起光照射手段および前記観測光照射手段は、前記励起光と前記観測光とを、前記半導体ウェーハの外部では互いに非平行であり、前記半導体ウェーハの内部では、平行で逆向き、または平行で同じ向き、となるように照射する請求項３記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項10] 前記励起光照射手段と前記観測光照射手段とは、前記励起光と前記観測光とを、前記半導体ウェーハのおもて面もしくは裏面に対して４５度の入射角をもって、前記半導体ウェーハに入射するように照射する請求項９記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

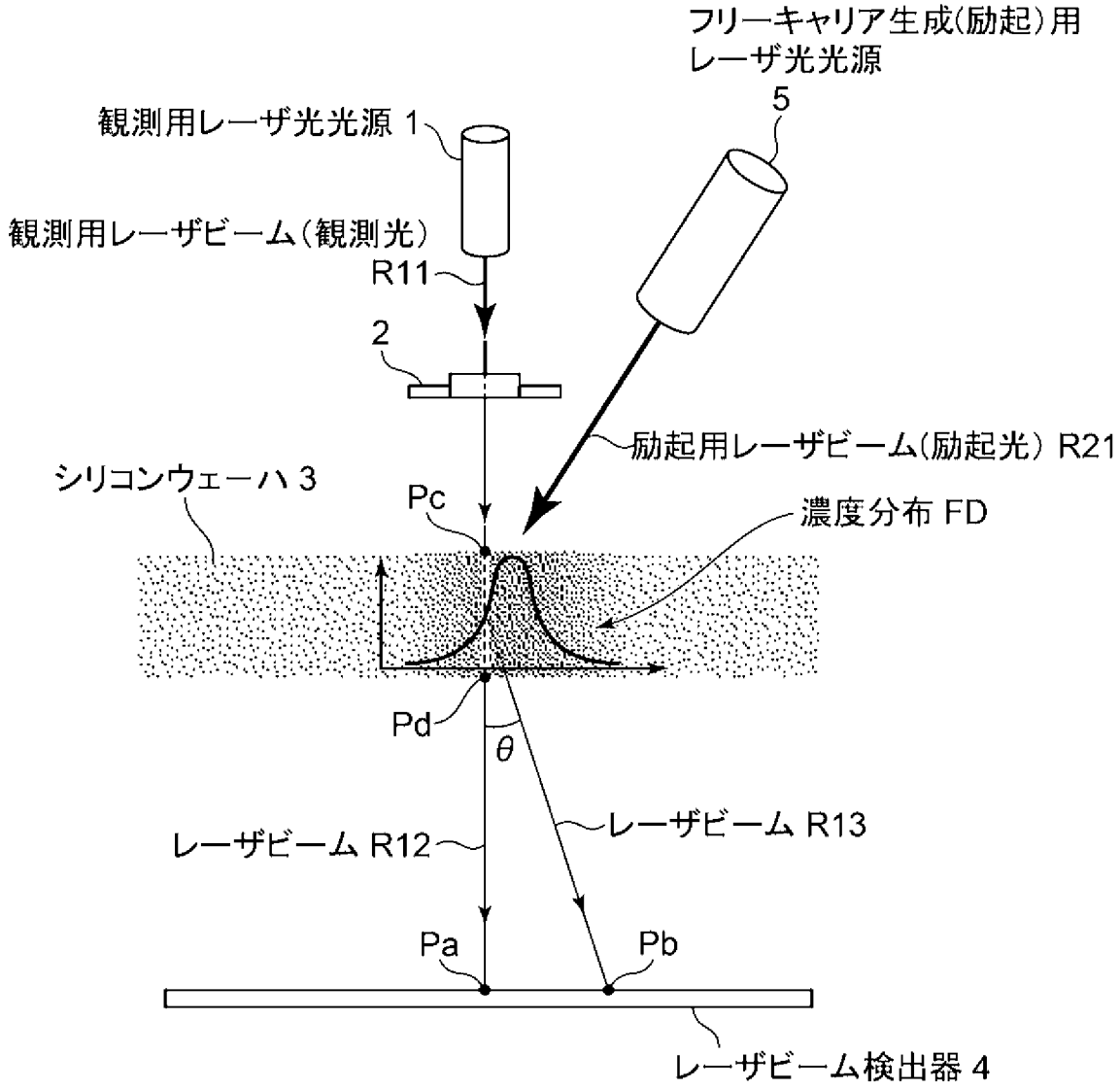
[請求項11] 前記励起光照射手段は、前記観測光に対して、前記励起光を傾斜するように照射する請求項３記載の半導体ウェーハの品質評価装置

[請求項12] 前記励起光照射手段または前記観測光照射手段の少なくともいずれか一方は、前記励起光と前記観測光とが、前記半導体ウェーハの内部において、非交差状態から交差状態を経て、非交差状態となるように

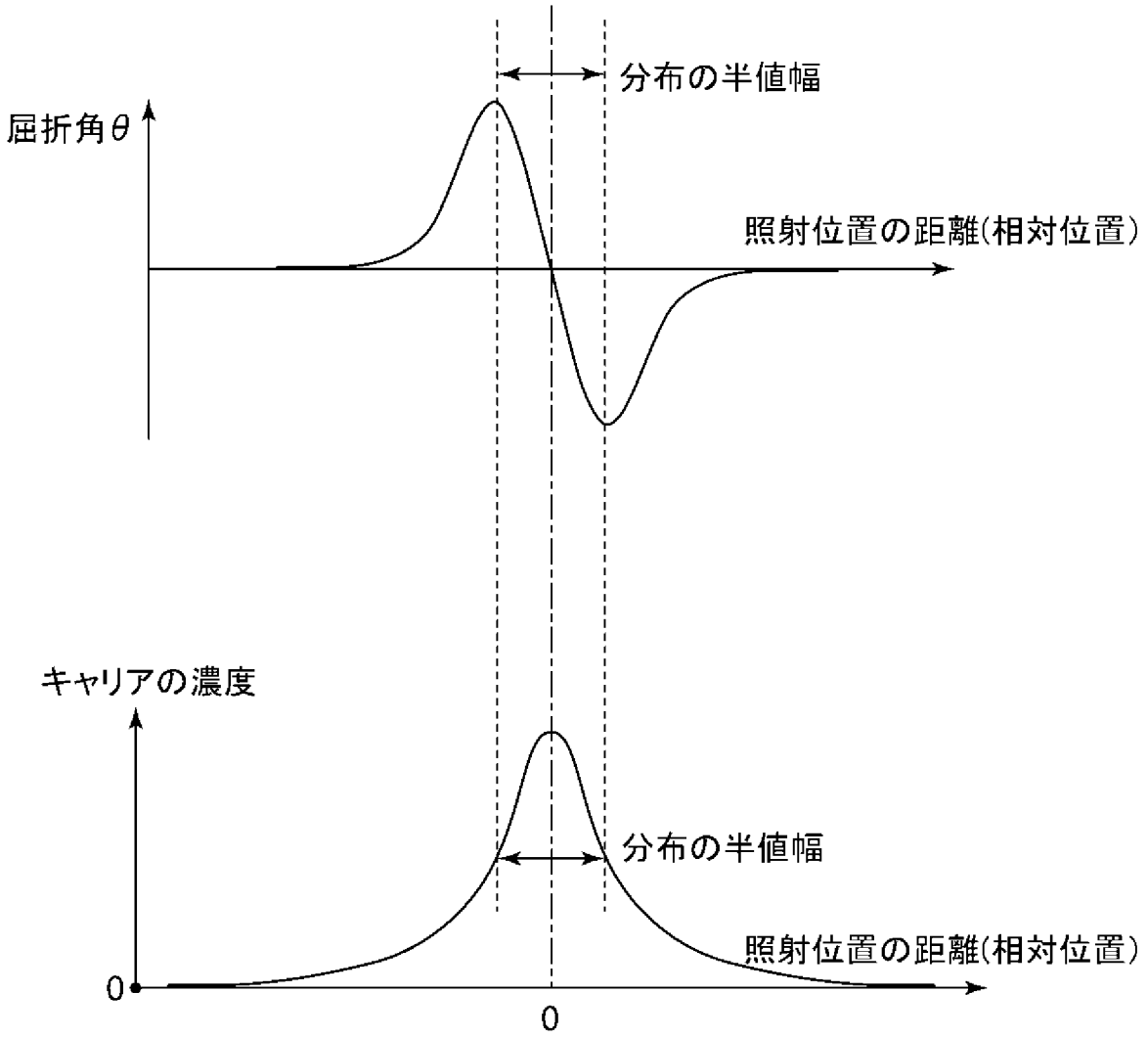
走査する請求項３から９のいずれかの項に記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

[請求項13] 前記励起光照射手段または前記観測光照射手段の少なくともいずれか一方は、前記励起光と前記観測光とが、前記半導体ウェーハの内部において、互いに平行で隔たった状態から、互いに一致した状態を経て、互いに平行で隔たった状態となるように走査する請求項１２記載の半導体ウェーハのバルク品質評価装置。

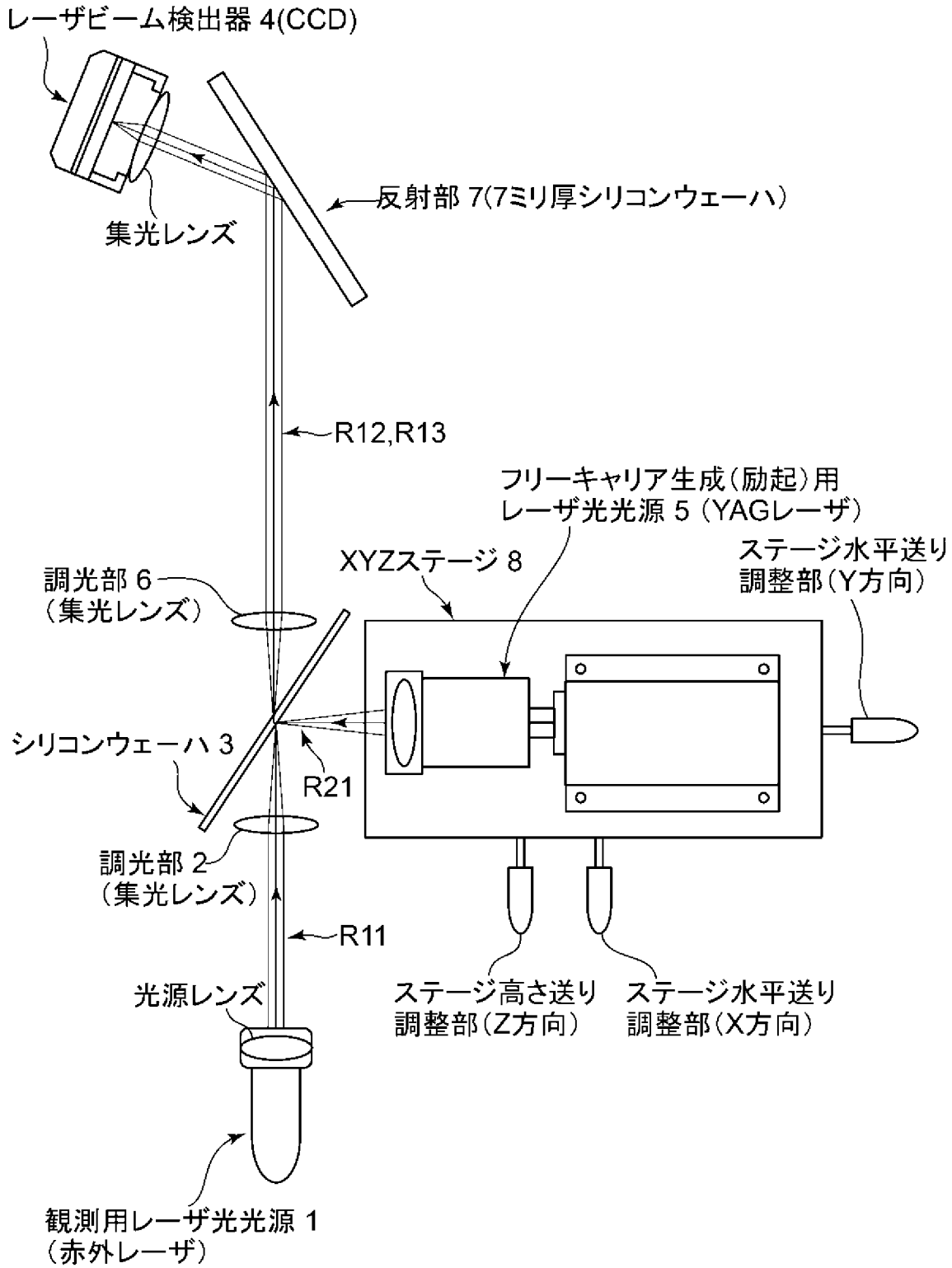
[図1]


フリーキャリア生成(励起)用
レーザ光光源
5
観測用レーザ光光源 1
観測用レーザビーム(観測光)
R11
2
励起用レーザビーム(励起光) R21
シリコンウェーハ 3
Pc
濃度分布 FD
Pd
θ
レーザビーム R12
レーザビーム R13
Pa
Pb
レーザビーム検出器 4

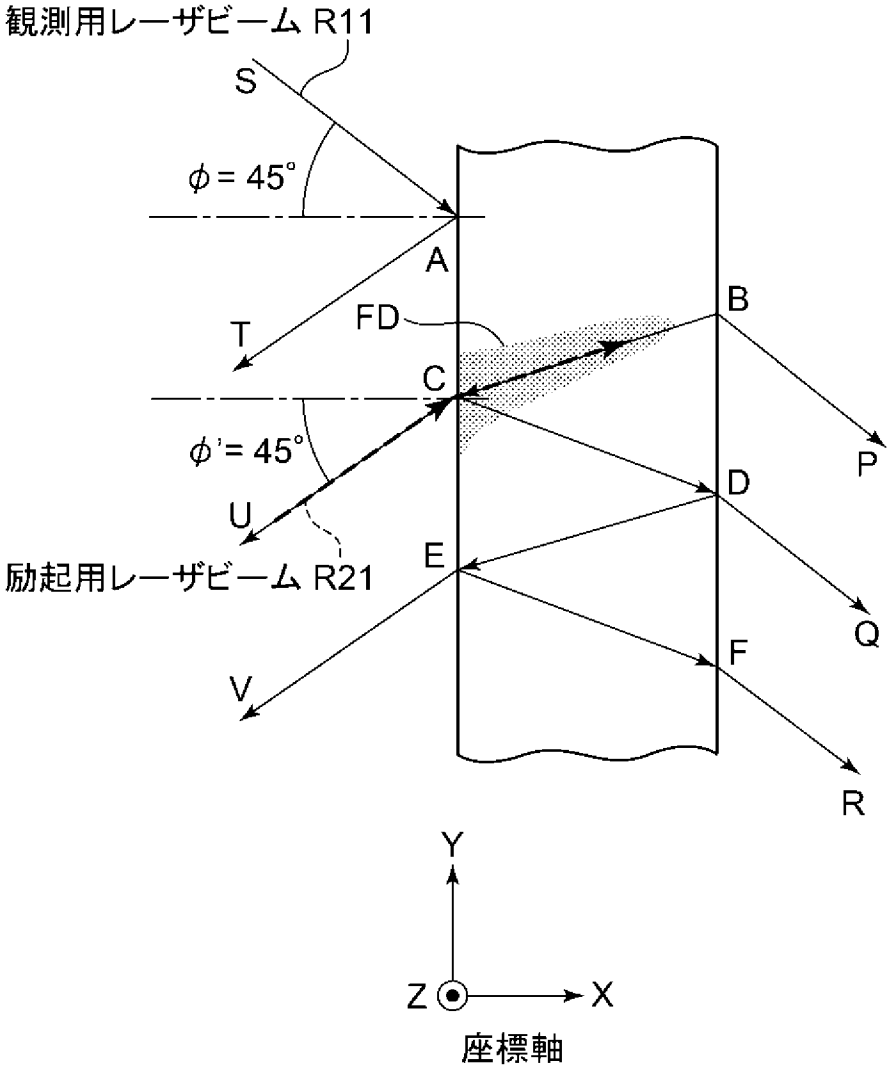
[図2]



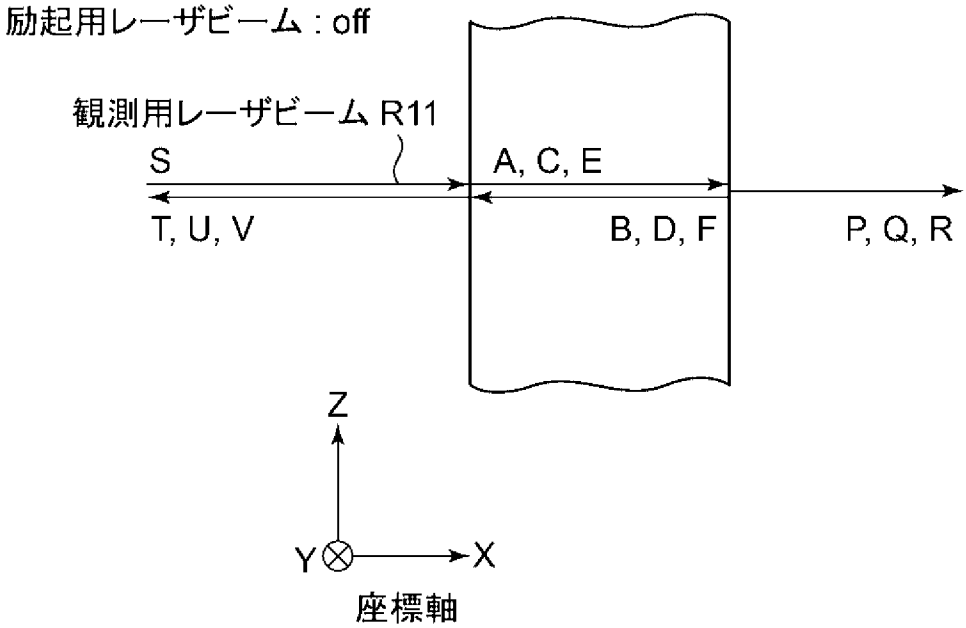
[図3]


レーザビーム検出器 4(CCD)
反射部 7(7ミリ厚シリコンウェーハ)
集光レンズ
R12,R13
フリーキャリア生成(励起)用
レーザ光光源 5 (YAGレーザ)
XYZステージ 8
ステージ水平送り
調整部(Y方向)
調光部 6
(集光レンズ)
シリコンウェーハ 3
R21
調光部 2
(集光レンズ)
R11
光源レンズ
ステージ高さ送り
調整部(Z方向)
ステージ水平送り
調整部(X方向)
観測用レーザ光光源 1
(赤外レーザ)

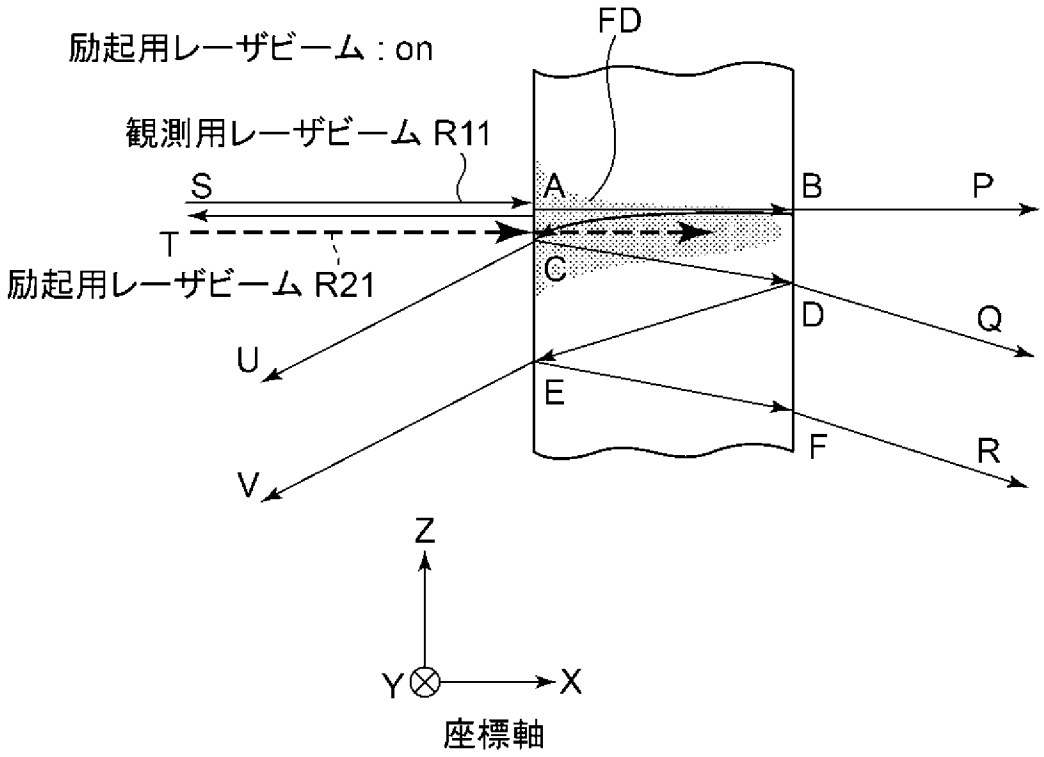
[図4A]


観測用レーザビーム R11
S
φ = 45°
A
T
FD
B
C
φ' = 45°
P
D
U
励起用レーザビーム R21
E
Q
F
V
R
Y
Z
X
座標軸

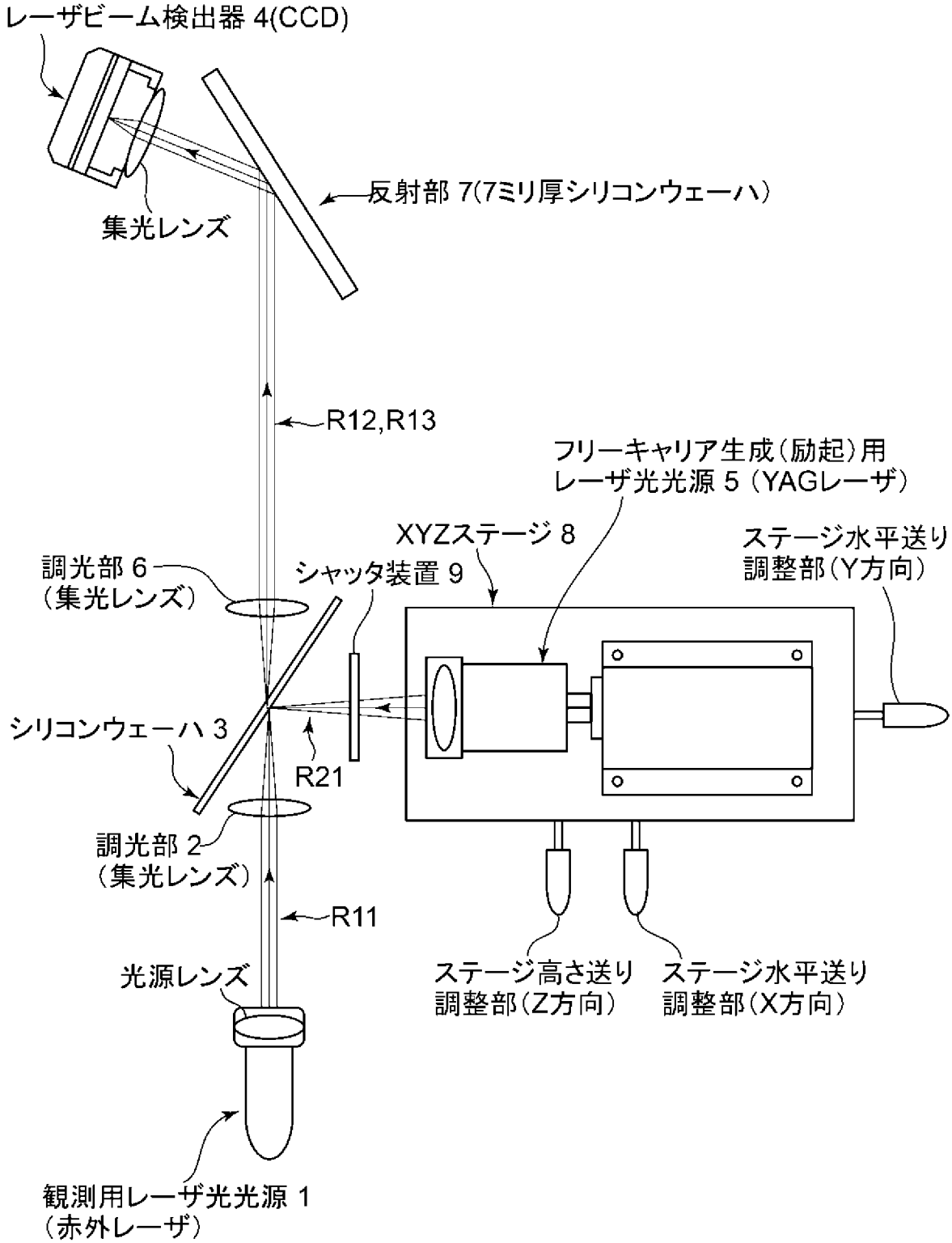
[図4B]


励起用レーザビーム : off
観測用レーザビーム R11
S
A, C, E
T, U, V
B, D, F
P, Q, R
Z
Y
X
座標軸

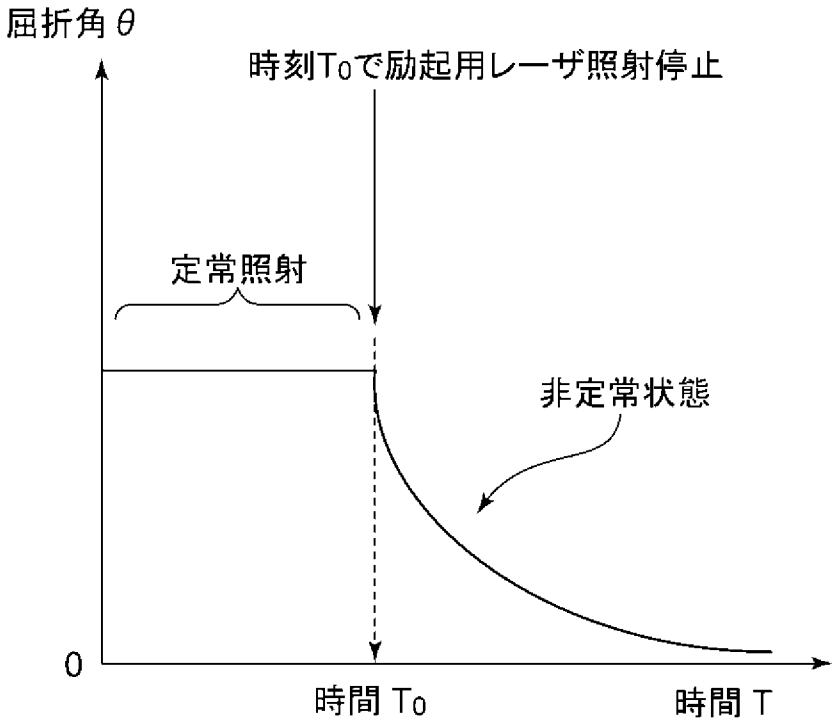
[図4C]


励起用レーザビーム：on
観測用レーザビーム R11
S
T
励起用レーザビーム R21
FD
A
B
P
C
D
Q
U
E
F
R
V
Z
Y
X
座標軸

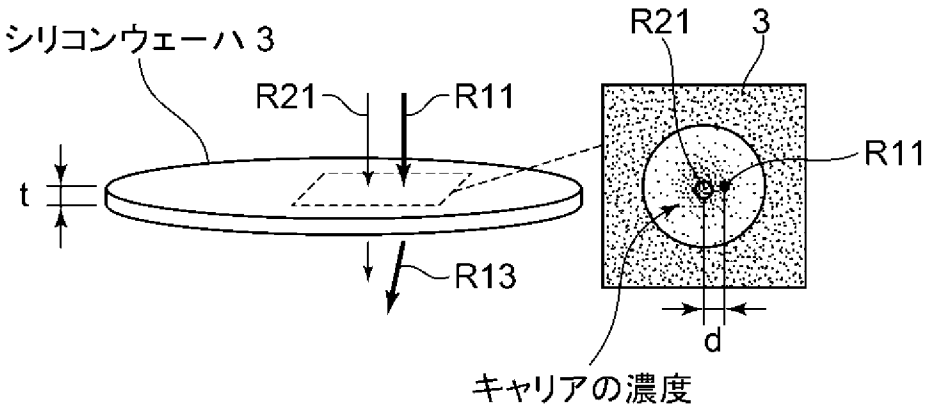
[図5]


レーザビーム検出器 4(CCD)
反射部 7(7ミリ厚シリコンウェーハ)
集光レンズ
R12,R13
フリーキャリア生成(励起)用
レーザ光光源 5 (YAGレーザ)
XYZステージ 8
ステージ水平送り
調整部(Y方向)
調光部 6
(集光レンズ)
シャッタ装置 9
シリコンウェーハ 3
R21
調光部 2
(集光レンズ)
R11
光源レンズ
ステージ高さ送り
調整部(Z方向)
ステージ水平送り
調整部(X方向)
観測用レーザ光光源 1
(赤外レーザ)

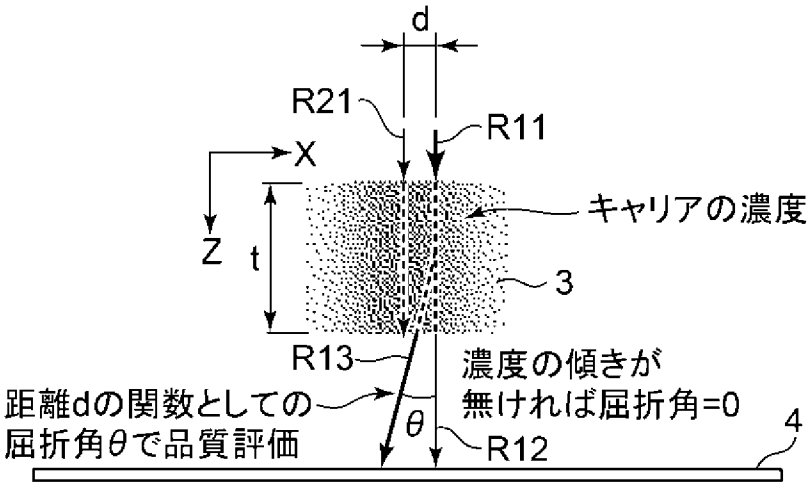
[図6]


屈折角 θ
時刻T0で励起用レーザ照射停止
定常照射
非定常状態
0
時間 T0
時間 T

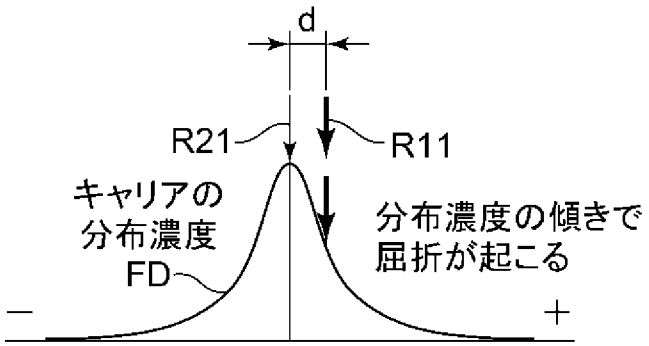
[図7A]


シリコンウェーハ 3
R21
R11
t
R13
R21
3
R11
d
キャリアの濃度

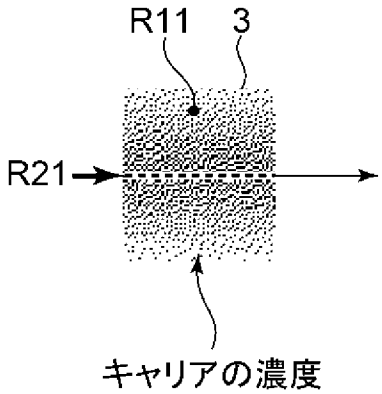
[図7B]


d
R21
R11
X
Z
t
キャリアの濃度
3
R13
濃度の傾きが
無ければ屈折角=0
距離dの関数としての
屈折角θで品質評価
θ
R12
4

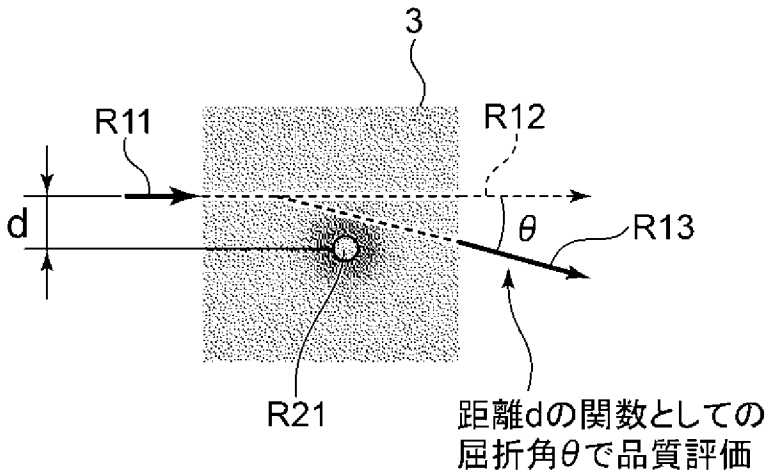
[図7C]


d
R21
R11
キャリアの
分布濃度
FD
分布濃度の傾きで
屈折が起こる
−
+

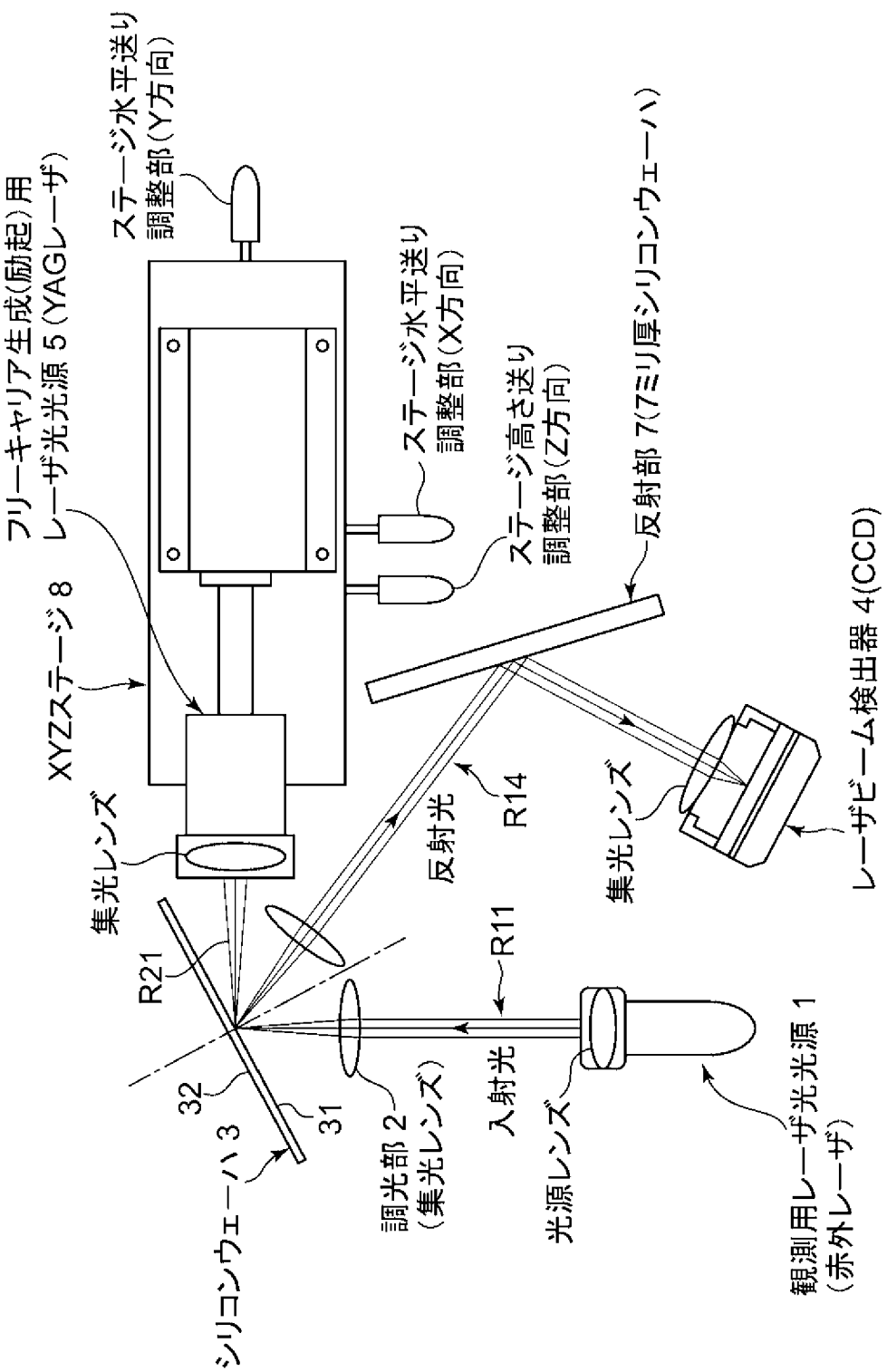
[図8A]


R11
3
R21
キャリアの濃度

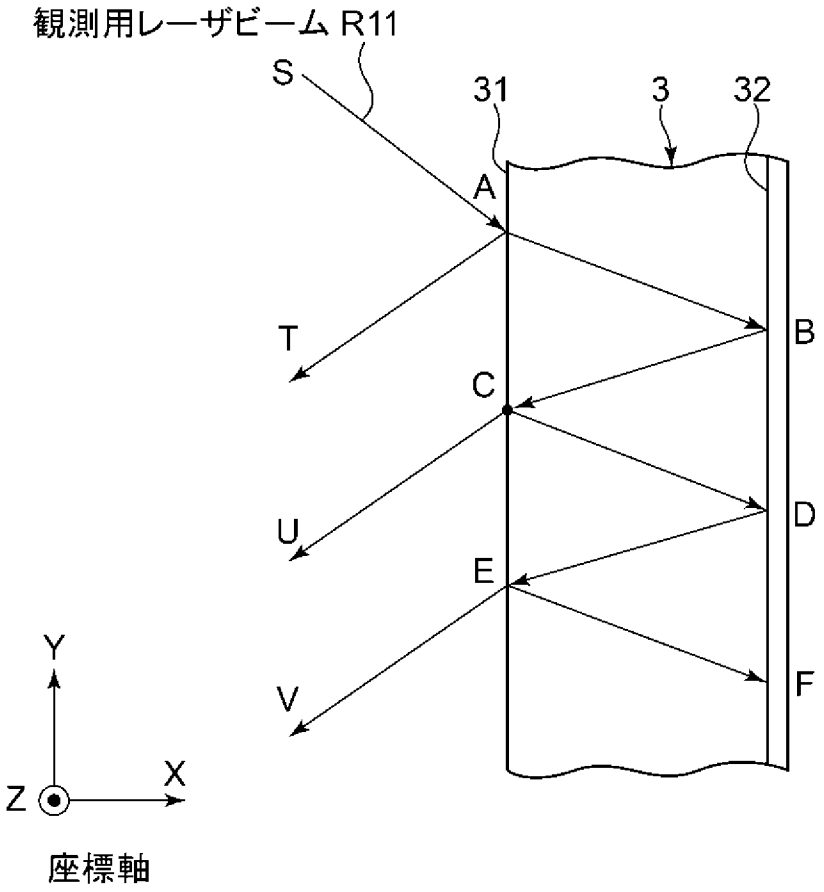
[図8B]



[図9]

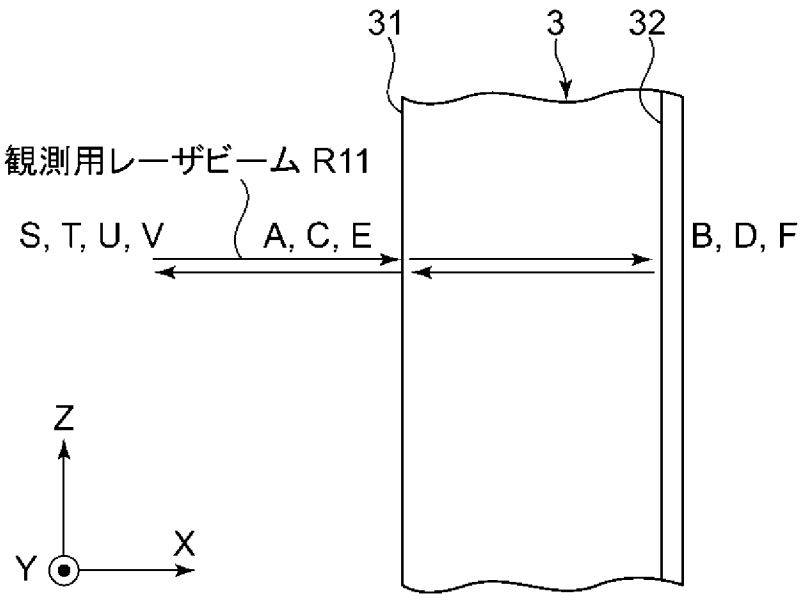

フリーキャリア生成(励起)用
レーザ光光源 5(YAGレーザ)
ステージ水平送り
調整部(Y方向)
ステージ水平送り
調整部(X方向)
ステージ高さ送り
調整部(Z方向)
反射部 7(7ミリ厚シリコンウェーハ)
XYZステージ 8
集光レンズ
R21
反射光
R14
集光レンズ
レーザビーム検出器 4(CCD)
R11
32
31
調光部 2
(集光レンズ)
入射光
光源レンズ
観測用レーザ光光源 1
(赤外レーザ)
シリコンウェーハ 3

[図10A]



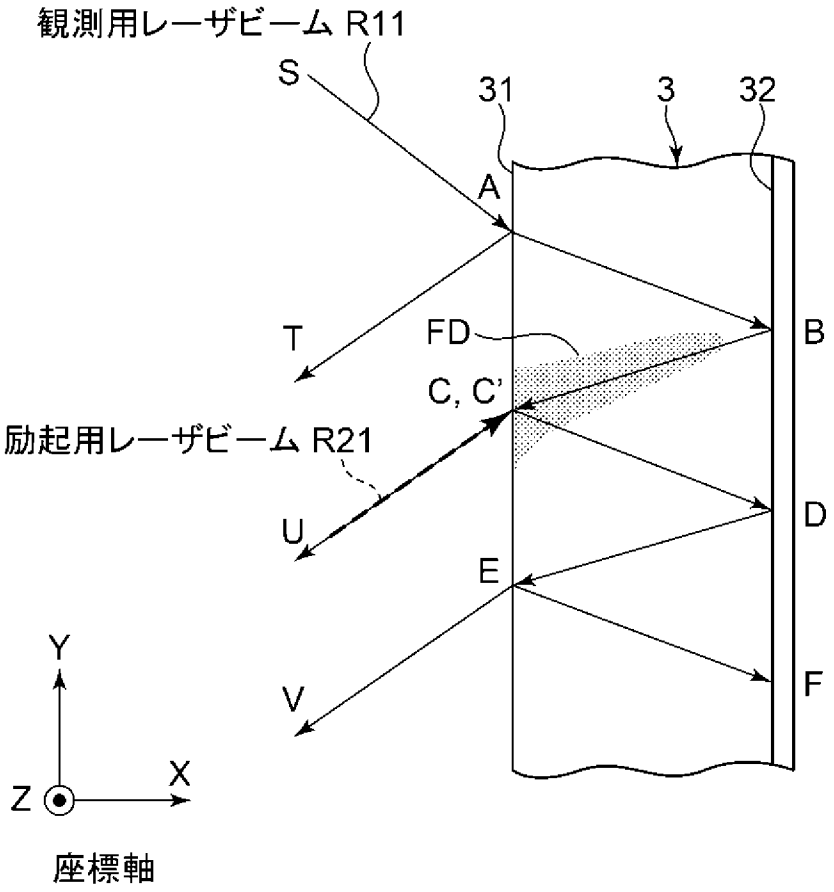
座標軸

[図10B]

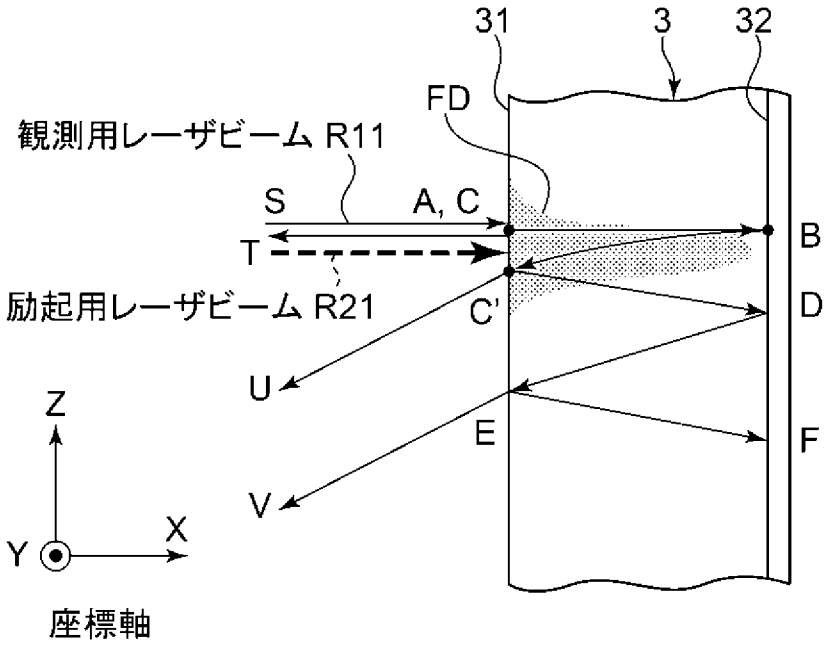


座標軸

[図11A]


観測用レーザビーム R11
S
31
3
32
A
T
FD
B
C, C'
励起用レーザビーム R21
U
D
E
V
F
Y
Z
X
座標軸

[図11B]


31
3
32
FD
観測用レーザビーム R11
S
A, C
B
T
励起用レーザビーム R21
C'
D
U
E
F
V
Z
Y
X
座標軸

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/061387

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01L21/66(2006.01)i, *G01N21/63*(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)
H01L21/66, G01N21/63

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	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2001-519892 A (Brown University Research Foundation), 23 October 2001 (23.10.2001), page 19, lines 3 to 17; page 20, lines 22 to 25; page 30, line 22 to page 31, line 8; page 39, line 25 to page 40, line 2; fig. 1D & US 5844684 A & WO 1997/041418 A1	1-11 12-13
A	JP 2008-523634 A (Interuniversitair Microelektronica Centrum VZW), 03 July 2008 (03.07.2008), paragraphs [0009] to [0010], [0069] & US 2007/0292976 A1 & WO 2006/063809 A2 & EP 1834168 A2	1-13

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

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

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
18 June 2015 (18.06.15)	30 June 2015 (30.06.15)

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
Japan Patent Office 3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915,Japan	Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１５／０６１３８７

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L21/66(2006.01)i, G01N21/63(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.　H01L21/66, G01N21/63

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	１９７１－２０１５年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１５年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１５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）

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 A	JP 2001-519892 A（ブラウン　ユニバーシティー　リサーチ　ファウンデーション）2001.10.23, 第１９頁第３～１７行、第２０頁第２２～２５行、第３０頁第２２行～第３１頁第８行、第３９頁第２５行～第４０頁第２行、図１Ｄ & US 5844684 A & WO 1997/041418 A1	１－１１ １２－１３
A	JP 2008-523634 A（アンテルユニヴェルシテール・ミクロ－エレクトロニカ・サントリュム・ヴェー・ゼッド・ドゥブルヴェ）2008.07.03, 段落［０００９］～［００１０］、［００６９］ & US 2007/0292976 A1 & WO 2006/063809 A2 & EP 1834168 A2	１－１３

☐　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	国際調査報告の発送日
１８．０６．２０１５	３０．０６．２０１５

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　５Ｏ　９１７２
堀江　義隆
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３５５９