

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-38218
(P2016-38218A)

(43) 公開日 平成28年3月22日(2016.3.22)

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| (51) Int.Cl. | F I | テーマコード(参考) |
| GO1N 21/64 (2006.01) | GO1N 21/64 | 2G043 |
| GO2B 21/06 (2006.01) | GO2B 21/06 | 2H052 |

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2014-159837 (P2014-159837)
 (22) 出願日 平成26年8月5日(2014.8.5)

(出願人による申告)平成22年度、独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業チーム型研究(CREST) 研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」における研究課題「高性能レーザーによる細胞光イメージング・光制御と光損傷機構の解明」、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 504133110
 国立大学法人電気通信大学
 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1

(74) 代理人 100107766
 弁理士 伊東 忠重

(74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦

(72) 発明者 小林 孝嘉
 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

(72) 発明者 王 楠
 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

最終頁に続く

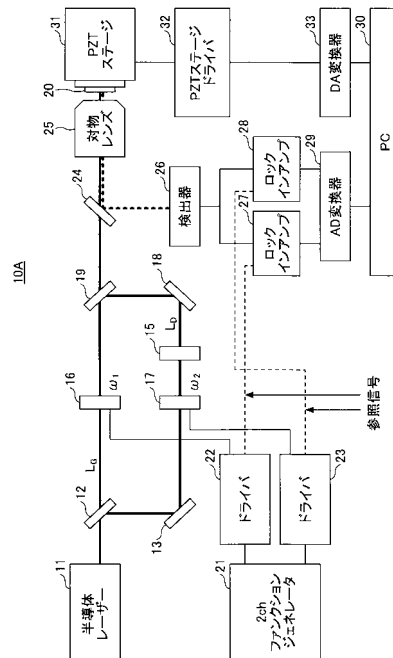
(54) 【発明の名称】 光学測定装置及び光学測定方法

(57) 【要約】

【課題】 サブトラクション超解像法で機械的要素を低減または排除して、信頼性の高い超解像イメージングを実現する。

【解決手段】 光源からの光を2つに分割し、一方のビームをそのままガウスビームとして用いて第1の変調周波数で変調し、他方のビームを第2の変調周波数で変調するとともにドーナツビームにモード変換し、第1の変調周波数で変調されたガウスビームと、第2の変調周波数で変調されたドーナツビームを重畳して試料を照射し、試料からの蛍光のうち、ガウスビームの照射による第1の蛍光成分とドーナツビームの照射による第2の蛍光成分を、前記第1の変調周波数と前記第2の変調周波数のそれぞれで同時に復調し、第1の蛍光成分と第2の蛍光成分の差分を算出することで迅速かつ信頼性の高い超解像の光学測定を実現する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源と、
 前記光源から出射される光を第 1 ビームと第 2 ビームに分割するビームスプリッタと、
 前記第 1 ビームを第 1 の変調周波数で変調する第 1 の光変調器と、
 前記第 2 ビームを第 2 の変調周波数で変調する第 2 の光変調器と、
 前記第 2 ビームを、焦点面でドーナツ型の強度分布を有するドーナツモードのビームに変換するモード変換素子と、
 前記第 1 の変調周波数で変調された前記第 1 ビームと、前記第 2 の変調周波数で変調され、かつ前記ドーナツモードに変換された前記第 2 ビームを重畳して試料に導く光学素子と、
 前記試料からの蛍光を前記第 1 の変調周波数で復調する第 1 のロックイン増幅器と、
 前記試料からの蛍光を前記第 2 の変調周波数で復調する第 2 のロックイン増幅器と、
 前記第 1 のロックイン増幅器で復調された蛍光成分と、前記第 2 のロックイン増幅器で復調された蛍光成分の差分を測定結果として算出する演算装置と、
 を有することを特徴とする光学測定装置。

10

【請求項 2】

前記第 1 及び第 2 の光変調器は電気光学変調器であり、
 前記モード変換器は、前記第 2 の光変調器の後段に配置されることを特徴とする請求項 1 に記載の光学測定装置。

20

【請求項 3】

前記第 1 及び第 2 の光変調器は光チョッパーであり、
 前記モード変換器は、前記第 2 の光変調器の前段に挿入されることを特徴とする請求項 1 に記載の光学測定装置。

【請求項 4】

前記試料からの蛍光を検出する蛍光検出器、
 をさらに有し、前記蛍光検出器で検出された蛍光が、前記第 1 のロックイン増幅器と前記第 2 のロックイン増幅器に入力されることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の光学測定装置。

30

【請求項 5】

前記試料を 1 次元、2 次元、または 3 次元に駆動する駆動メカニズム、
 をさらに有し、
 前記演算装置は、前記第 1 の蛍光成分と前記第 2 の蛍光成分の差分を前記重畳されたビームのスポット位置ごとに算出することを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の光学測定装置。

【請求項 6】

光源からの光を第 1 ビームと第 2 ビームに分割し、
 前記第 1 ビームを第 1 の変調周波数で変調し、
 前記第 2 ビームを第 2 の変調周波数で変調するとともに、焦点面でドーナツ型の強度分布を有するドーナツモードのビームに変換し、
 前記第 1 の変調周波数で変調された前記第 1 ビームと、前記第 2 の変調周波数で変調され、かつ前記ドーナツモードに変換された前記第 2 ビームを重畳して試料を照射し、
 前記試料からの蛍光のうち、前記第 1 ビームにより励起され放出された第 1 の蛍光成分を前記第 1 の変調周波数で復調し、
 前記試料からの蛍光のうち、前記ドーナツモードのビームに変換された前記第 2 ビームにより励起され放出された第 2 の蛍光成分を前記第 2 の変調周波数で復調し、
 前記第 1 の蛍光成分と前記第 2 の蛍光成分の差分を算出する、
 工程を有することを特徴とする光学測定方法。

40

【請求項 7】

前記第 1 の変調周波数による変調と、前記第 2 の変調周波数による変調を電気光学変調

50

器によって行い、

前記第2ビームを前記第2の変調周波数で変調した後に、前記ドーナツモードのビームに変換する、
ことを特徴とする請求項6に記載の光学測定方法。

【請求項8】

前記第1の変調周波数による変調と、前記第2の変調周波数による変調を光チョッパーによって行い、

前記第2ビームを前記ドーナツモードのビームに変換した後に、前記第2の変調周波数で変調する、
ことを特徴とする請求項6に記載の光学測定方法。

10

【請求項9】

前記試料からの蛍光を検出し、

前記検出された蛍光を、第1のロックイン増幅器と第2のロックイン増幅器に入力し、前記第1のロックイン増幅器で前記第1の蛍光成分を復調し、前記第2のロックイン増幅器で前記第2の蛍光成分を復調する、

ことを特徴とする請求項6～8のいずれか1項に記載の光学測定方法。

【請求項10】

前記試料を1次元、2次元、または3次元に駆動し、

前記第1の蛍光成分と前記第2の蛍光成分の差分を前記重畳されたビームのスポット位置ごとに算出する

20

ことを特徴とする請求項6～9のいずれか1項に記載の光学測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ガウスビームとドーナツビームを用いた光学測定技術に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、レーザ顕微鏡で光の回折限界値以下の空間分解能を有する超解像を得る様々な方法が提案されている。その一つに、焦点面において動径方向(r)にガウス関数状の強度分布を持つガウスモードのビーム(「ガウスビーム」と称する)と、ドーナツ状の強度分布を持つドーナツモードのビーム(「ドーナツビーム」と称する)で交互に試料を励起し、それぞれのビームによる蛍光イメージの差分をとることで解像度を向上させるサブトラクション超解像法が知られている(たとえば、非特許文献1及び2参照)。

30

【0003】

公知のサブトラクション超解像法では、メカニカルシャッターや回転式のミラーによりガウスビームとドーナツビームを切り替えている。しかし、機械的な機構では切り替え時間に数ミリ秒以上の時間がかかるため、一方のビームで1フレームまたは1ライン分の測定を行った後にビームを切り替え、その後同じ領域を他方のビームで走査して差分を計算している。

40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】"Breaking the Diffraction Barrier Using Fluorescence Emission Difference Microscopy" Scientific Report 3, 1441(2013)

【非特許文献2】"Resolution and contrast enhancement in laser scanning microscopy using dark beam imaging" Optics Express 21, 15912 (2013)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

サブトラクション超解像法では、測定中に外部からの振動や温度変化等に起因するドリ

50

フトの影響を受けると、2つのビームの間で測定した場所がずれてしまうため、差分により計算された像は正しい象を反映しておらず、間違った結果を生じる。

【0006】

また、機械的機構は切り替え時に光学系に振動を与え、測定に不安定をもたらす。サブトラクション超解像法では、厳密に同じ位置に照射した2本のビームの差を計算することが重要であるから、従来の機械的なビームの切り替えは信頼性の観点から好ましくない。

【0007】

本発明は、サブトラクション超解像法で機械的要素を低減または排除して、信頼性の高い超解像イメージングを実現することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

課題を解決するために、実施形態では、ガウスビームとドーナツビームの機械的な切り替えを行わず、ロックイン検出法により同時測定を行い、ピクセル毎に差分を計算する。

【0009】

具体的には、光学測定装置は、
光源と、

前記光源から出射される光を第1ビームと第2ビームに分割するビームスプリッタと、

前記第1ビームを第1の変調周波数で変調する第1の光変調器と、

前記第2ビームを第2の変調周波数で変調する第2の光変調器と、

前記第2ビームを、焦点面でドーナツ型の強度分布を有するドーナツモードのビームに変換するモード変換素子と、

前記第1の変調周波数で変調された前記第1ビームと、前記第2の変調周波数で変調された前記第2ビームを重畳して試料に導く光学素子と、

前記試料からの蛍光を前記第1の変調周波数で復調する第1のロックイン増幅器と、

前記試料からの蛍光を前記第2の変調周波数で復調する第2のロックイン増幅器と、

前記第1のロックイン増幅器で復調された蛍光成分と、前記第2のロックイン増幅器で復調された蛍光成分の差分を測定結果として算出する演算装置と、

を有する。

【発明の効果】

【0010】

サブトラクション超解像法において機械的な要素を排除または低減して、信頼性の高い超解像イメージングを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施形態の光学測定装置の概略構成図である。

【図2】焦点面におけるガウスビームとドーナツビームの点広がり関数(PSF: Point Spread Function)のサイズと、ドーナツビームの強度プロファイルの図である。

【図3】サブトラクション超解像法の原理を説明する図である。

【図4】減算係数を説明する図である。

【図5】実施形態の光学測定装置の変形例を示す図である。

【図6】実施形態の光学測定法による蛍光ビーズの画像である。

【図7】実施形態の光学測定法により得られた標識したマウスの神経細胞の画像を、ガウスビームによる通常の画像と比較して示す図である。

【図8】実施形態の光学測定法により得られた標識したマウスの神経細胞の画像を、ガウスビームによる通常の画像と比較して示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

図1は、実施形態の光学測定装置10Aの概略構成図である。光学測定装置10Aは、従来のサブトラクション超解像法と異なり、ガウスビームとドーナツビームを機械的に切

10

20

30

40

50

り替えて差分をとるのではなく、2台のロックイン増幅器を用いた同時検出により、各ビームによる蛍光の強度差分をピクセルごとに算出する。

【0013】

光学測定装置10Aでは、単一光源としての半導体レーザ11から出射される同一波長のビームをビームスプリッタ12で2つに分割し、一方をそのままガウスビーム L_G として用い、他方をドーナツビーム L_D に変換して用いる。ガウスビーム L_G は、ビームの動径方向にガウスモードの強度分布 $\exp(-r^2/(2w^2))$ を有する。ドーナツビーム L_D は、焦点面でドーナツモードの強度分布 $r^2 \cdot \exp(-r^2/(2w^2))$ を有する。ここで、 r はビーム中心軸からの距離、 w はビームのスポットサイズである。

【0014】

図2(A)に示すように、ガウスビーム L_G は焦点面においてスポット中心で強度が最も大きくなり、ドーナツビーム L_D は、焦点面においてスポット中心が暗いドーナツ型の強度分布を有する。図2(B)の強度プロファイルに示すように、ドーナツビーム L_D は強度がほぼゼロとなる中心に対して、径方向に対称な2つのピークと広いフリンジを有する。

【0015】

図1に戻って、ガウスビーム L_G は第1の変調器16に導かれ、角周波数 ω_1 で変調される。この例では、変調器16は電気光学変調器(EOM: Electro-Optic Modulator)であり機械的動作を含まない。

【0016】

分割された他方のビームは、ミラー13により第2の変調器17に導かれ、 ω_1 と異なる角周波数 ω_2 で変調される。第2の変調器17も電気光学変調器(EOM)であり、機械的動作を含まない。 ω_2 で変調された他方のビームは、モード変換素子としての可変位相板(VPP: Variable Phase Plate)15に導かれてドーナツビーム L_D に変換される。

【0017】

EOM16、17に供給される変調周波数 ω_1 と ω_2 は、2チャンネルファンクションジェネレータ21により生成され、ドライバ22、23を介してEOM16、17の図示しない電気光学結晶に印加される。ドライバ22、23の出力は、ロックイン検出のための参照信号としても使用される。ロックイン検出については後述する。

【0018】

ドーナツビーム L_D は焦点面、すなわち試料20の表面で動径方向にドーナツ状の強度分布を持つが、可変位相板15の出射直後は、等位相面が螺旋状になった光渦として生成される。可変位相板15は、たとえば、円周方向に屈折率が変化する位相板であり、結晶中にドーピングする不純物濃度を円周方向に変化させることで屈折率を変えることができる。図2(B)の強度プロファイルは、可変位相板15を用いて生成したドーナツビーム L_D の強度プロファイルである。

【0019】

可変位相板15の中心部では円周方向への屈折率変化が少ないため、光渦の密度はほとんどないが、円周に向かうほど屈折された光が異なる方向に分かれやすいため螺旋状の光渦が生成される。実施形態では、可変位相板15で形成される光ビームを、「ガウスビーム L_G 」と区別するために「ドーナツビーム L_D 」と称する。

【0020】

可変位相板15から出射されるドーナツビーム L_D は、ミラー18によりビームコンバイナ19に導かれ、ガウスビーム L_G と同軸に重ね合わせられる。重ね合されたガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D は、ダイクロイックミラー24を透過し、対物レンズ25により試料20に入射する。

【0021】

試料20は、半導体レーザ11の波長で励起される蛍光色素で標識されており、ガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D のそれぞれによって励起されて、光源波長よりも長い蛍

10

20

30

40

50

光波長の光を発する。試料 20 からの蛍光は、ダイクロイックミラー 24 で反射されて励起光（入射ガウスビーム L_G 及び入射ドーナツビーム L_D ）と分離され、光電子増倍管などの蛍光検出器 26 に導かれる。

【0022】

蛍光検出器 26 で検出される蛍光には、ガウスビーム L_G による励起で放出された蛍光と、ドーナツビーム L_D による励起で放出された蛍光の 2 つの蛍光成分が含まれる。そこで、検出された蛍光を 2 つのロックイン増幅器（アンプ）27 と 28 に入力し、対応する参照周波数 1 と 2 でロックイン検出することで、ガウスビーム L_G による蛍光成分と、ドーナツビーム L_D による蛍光成分をそれぞれ個別に検出する。

【0023】

ロックイン増幅器 27, 28 で参照周波数 1 と 2 で復調された各周波数成分は A/D 変換器 29 でデジタル信号に変換され、パーソナルコンピュータ（PC）30 の演算装置に含まれるサブトラクタ（不図示）で、1 ピクセル分の強度の差分が算出される。

【0024】

同軸上に重畳されたガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D を、試料 20 面（X - Y 面）に対して相対的に走査することで平面画像を得ることができる。3次元蛍光メーキングを行う場合は、試料 20 を Z 軸方向（試料の X - Y 面に対する垂直方向）に駆動するピエゾステージ 31 を用いる。ピエゾステージ 31 は、たとえば圧電アクチュエータとしてチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）セラミックを用いた PZT ステージ 31 である。

【0025】

PC 30 は、1 ピクセル分の強度差分が算出される都度、制御信号を生成する。D/A 変換器 33 でアナログ変換された制御信号は PZT ステージドライバ 32 に入力され、PZT ステージドライバ 32 から出力される駆動信号で、試料 20 を保持する PZT ステージ 31 が駆動される。

【0026】

図 1 の光学測定装置 10A は、機械的要素を全く含まないので、光学系に対する振動等の影響を排除することができる。また、ガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D を重畳して同時に試料測定を行い、ピクセル単位で 2 つのロックイン増幅器 27, 28 で各蛍光成分を検出し差分計算することから、ドリフトの影響を排除することができる。したがって、非常に高速かつ安定した動作で、光の回折限界を超える超高解像の蛍光画像を取得することができる。

【0027】

図 3 は、サブトラクション超解像法の原理を説明する図である。たとえば、情報パターン S を有する試料 20 を光学測定する。ガウスビームを対物レンズ 25 を介して試料 20 に照射して蛍光標識された試料 20 を励起し、試料 20 からの蛍光を検出することで、強度 I_1 の画像 A が得られる。また、ドーナツビームを対物レンズ 25 を介して試料 20 に照射して試料 20 を励起し、試料 20 からの蛍光を検出することで、強度 I_2 の画像 B が得られる。

【0028】

焦点面で異なるスポット形状を有する 2 つのビームを照射することで、異なる PSF を有するコンフォーカルイメージが得られる。ガウスビームによるスポット画像（強度 I_1 ）からドーナツビームによるスポット画像（強度 I_2 ）を引き算することで、スポット中心部の強度情報だけを抽出することができ、解像度を向上することができる。

【0029】

引き算を行う際の係数を適切に選択することで、解像度を調整することができる。たとえば、PC 30 にて $I_1 - b \times I_2$ の演算を行う際に、減算係数 b を変えることで所望の解像度を得ることができる。減算係数 b は、ドーナツビーム画像の重み付け係数と言い換えることができる。画像 C は $b = 0.4$ のときの画像、画像 D は $b = 0.7$ のときの画像、画像 E は $b = 1.0$ のときの画像である。

【0030】

10

20

30

40

50

図4は、減算係数を説明する図である。サブトラクション超解像法では減算後に負になる部分は通常ゼロとする。そのため観察像のサイズは減算係数が大きいほど小さくなるが、大きすぎると実際のサイズより小さくなってしまい、間違ったイメージになる。従って観察像と実際の物体のサイズが等しくなる最適な減算係数を決める必要がある。

【0031】

図4(A)は物体のサイズとその観察像のサイズの減算係数依存性を計算した結果を示す。縦軸、及び横軸は入射光の波長で規格化している。対物レンズの開口数(NA)は1.3としている。実線Aは共焦点(コンフォーカル)顕微鏡での観察値、破線Bは回折限界値である。一点鎖線Cは物体のサイズと観察像が等しくなる条件を示しており、この直線上の減算係数値を最適な減算係数と定義することができる。

10

【0032】

図4(B)は最適な減算係数と物体サイズの関係を示す。波長より大きい物体の場合は減算係数を小さくして通常の共焦点顕微鏡に近い条件で観察するのが好ましく、一方で波長より小さい物体の場合は減算係数を大きくし、サブトラクション法を有効に働かせることで超解像を達成することができる。

【0033】

図4(B)から決まる最適な減算係数は照射光の波長や開口数によって異なるが、事前に光学測定装置10Aの減算係数曲線を求めておくことで、観察対象物のサイズに応じた減算係数を選択することができる。

【0034】

図1の光学測定装置10Aでは、ガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D の差分をスポットごと、すなわちピクセルごとに算出するので、ステージを移動する際の機械的振動による誤差やドリフトによる誤差を含まない高解像の測定画像を得ることができる。また、適切に減算係数を選択することで観察画像の解像度を向上することができる。

20

【0035】

図5は、図1の変形例として、光学測定装置10Bの概略構成を示す。光学測定装置10Bでは、光変調器としてEOM16、17に替えて光チョッパー46、47を用い、可変位相板15に替えて、ラジアル偏光板45を用いる。その他の構成は、図1と同様である。

【0036】

半導体レーザ11を出射した光はビームスプリッタ12により2つに分割される。ビームスプリッタ12を透過した一方の光は、ガウスビーム L_G として光チョッパー46に入射し、変調周波数1で変調される。ビームスプリッタ12で反射された他方の光は、ミラー13によりラジアル偏光板45に導かれ、ドーナツビーム L_D が生成される。生成されたドーナツビーム L_D は光チョッパー47に入射し、変調周波数2で変調される。

【0037】

それぞれの周波数で変調されたガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D は、ビームコンバイナ19で同軸に重ね合されて、試料20に入射する。試料20からの蛍光を、2つのロックイン増幅器27、28を用いて参照周波数1と2で個別に復調する構成は図1と同様である。

30

【0038】

図5の構成では、光チョッパー46、47はドライバ22、23からの駆動信号によって機械的に回転する。これらはビームの指向方向を全く変えないでガウスビーム L_G とドーナツビーム L_D を切り替える。一方、従来の方法ではビームの切り替えにメカニカルシャッターやフリップミラーを用いている。これらの機械的パーツはビームの指向方向の揺らぎを与える機械的変動要因を有する。本方法では、それらを用いていないので、その影響はない。また、図1と同様に、スポットごと(ピクセルごと)に2つのビーム照射による蛍光の差分を算出できるので、迅速かつ安定して高解像画像を得ることができる。差分を算出する際に、減算係数 b を適切に選択することで解像度を向上できる点も図1の光学測定装置10Aと同様である。

40

50

【0039】

なお、ドーナツモードの強度分布を実現する光渦の生成には、屈折率可変位相板やラジアル偏光板の他、表面形状を螺旋状に加工した螺旋位相板等、任意のモード変換素子を用いてもよい。光変調器として、電気光学光変調器16、17や光チョッパー46、47の他に、磁気的な光変調器や、光励起キャリアの生成による光変調器を用いてもよい。

【0040】

図6は、図1の光学測定装置10Aによる蛍光ビーズの観察画像である。図6(A)はガウスビーム L_G の入射による蛍光像、図6(B)はドーナツビーム L_D の入射による蛍光像、図6(C)と図6(D)は、図6(A)から図6(B)を引き算したときに得られるサブトラクション像である。ガウスビーム L_G の変調・復調周波数1は1.2kHz、ドーナツビーム L_D の変調・復調周波数2は1.8kHz、図6(C)の減算係数bは0.3、図6(D)の減算係数bは0.7である。

10

【0041】

図6(A)の蛍光像は、通常の光学顕微鏡でガウスビームのみの照射で得られる画像と等価である。実施例の光学測定装置10Aで得られる画像の空間分解能は、減算係数bの値に依存するが、通常の蛍光像(図5(A))と比較して2倍前後に向上する。図6(C)で減算係数 $b = 0.3$ のときのFWHM(Full Width at Half Maximum: 半値全幅)は160nm、図6(D)で減算係数 $b = 0.7$ のときのFWHMは100nmである。図6(A)のガウスビームによる通常の光学測定のFWHMである220nmと比較して、空間分解能が大きく向上していることがわかる。

20

【0042】

図7及び図8は、YFP(Yellow Fluorescent Protein: 黄色蛍光タンパク質)で標識したマウスの神経細胞の観察結果を示す図である。図7(A)及び図8(A)は、実施形態の光学測定装置10Aによる蛍光像(測定画像)、図7(B)及び図8(B)は、比較例として通常のガウスビームによる蛍光像を示す。図7(C)は、図7(A)と図7(B)の矢印で示す範囲の強度分布を示すグラフ、図8(C)は、図8(A)と図8(B)の矢印で示す範囲の強度分布を示すグラフである。図7(C)と図8(C)で、実線(A)が実施形態の方法による強度スペクトル、破線(B)がガウスビームの通常測定で得られる強度スペクトルである。

30

【0043】

図8においても、ガウスビームを用いた通常測定でのFWHMが300nmであるのに対し、実施形態の方法による測定では、FWHMが150nmにまで低減され、2倍の分解能が得られることがわかる。

【0044】

実施形態では、ひとつの光源11を用いて、同一波長のガウスビームとドーナツビームを重畳して用いるので、生体試料を対称とした多色イメージングへの拡張が容易である。また、単色の測定では、光源として数mW程度の汎用の半導体レーザを1つ用いるだけなので、STED(Stimulated Emission Depletion: 誘導放出抑制)法等の他の超解像法と比較してコストを1/4~1/2に低減することができる。

40

【符号の説明】

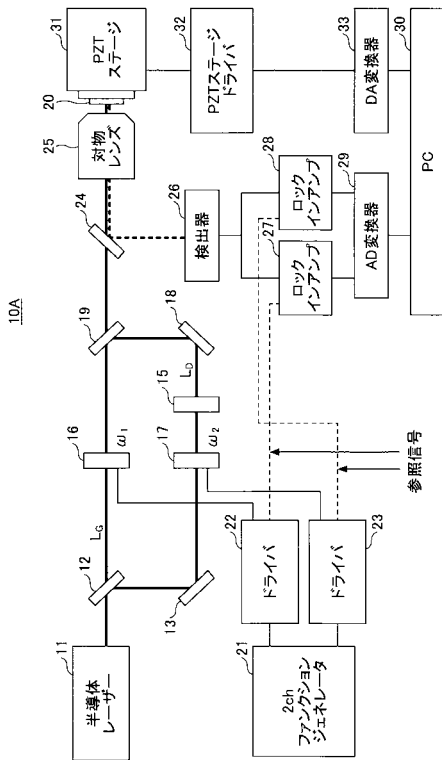
【0045】

- 10A、10B 光学測定装置
- 11 半導体レーザ(光源)
- 15 可変位相板(モード変換素子)
- 16、46 第1の光変調器
- 17、47 第2の光変調器
- 19 ビームコンバイナ
- 20 試料
- 21 2チャンネルファンクションジェネレータ
- 22、23 ドライバ

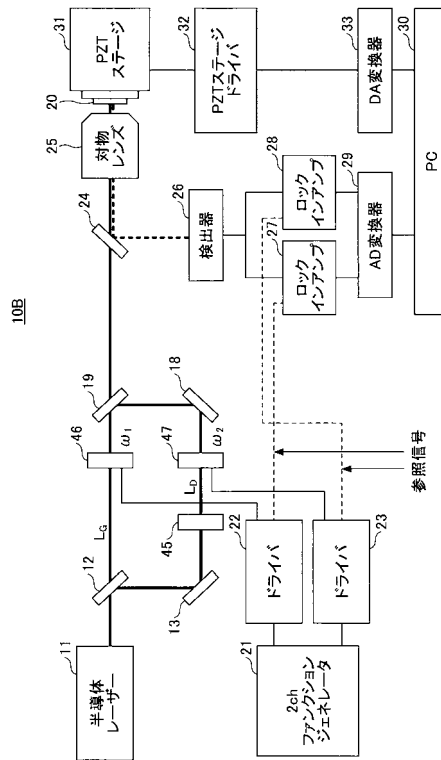
50

- 24 ダイクロミックミラー
- 25 対物レンズ
- 26 蛍光検出器
- 27, 28 ロックイン増幅器
- 30 PC (演算装置)
- 31 PZTステージ
- 45 ラジアル偏光板 (モード変換素子)

【 図 1 】

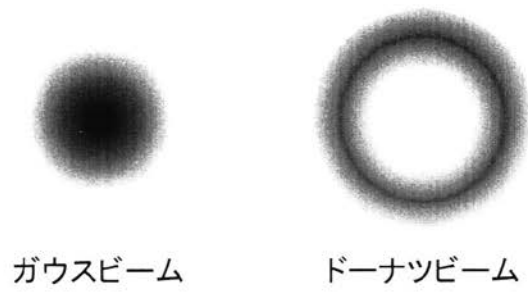


【 図 5 】

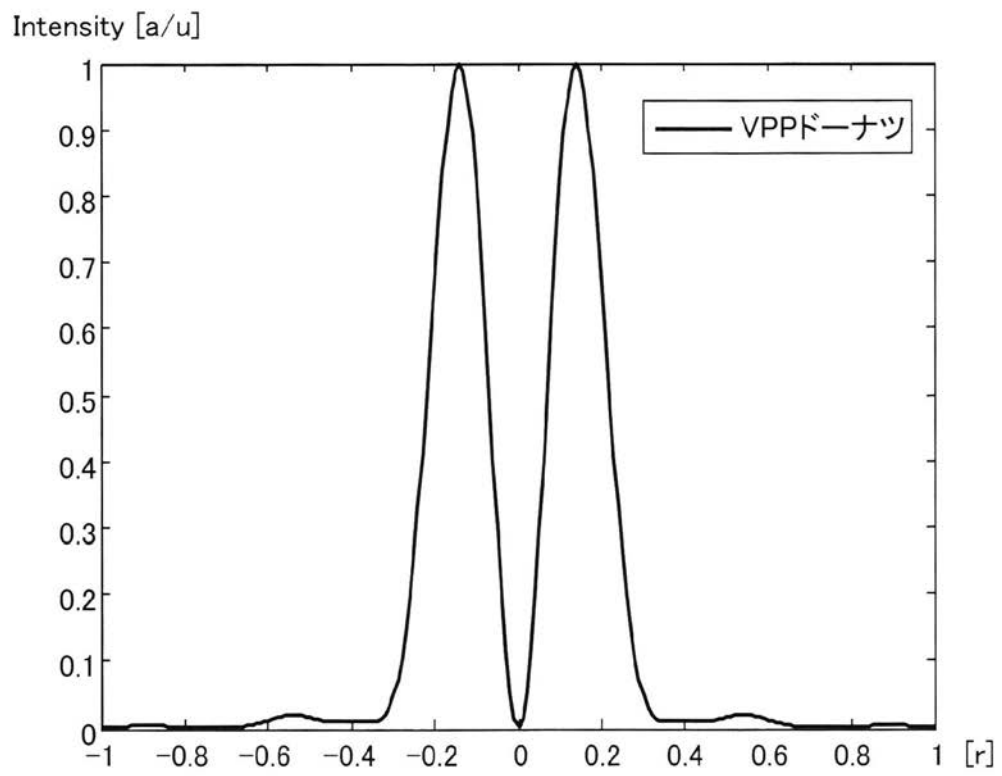


【 図 2 】

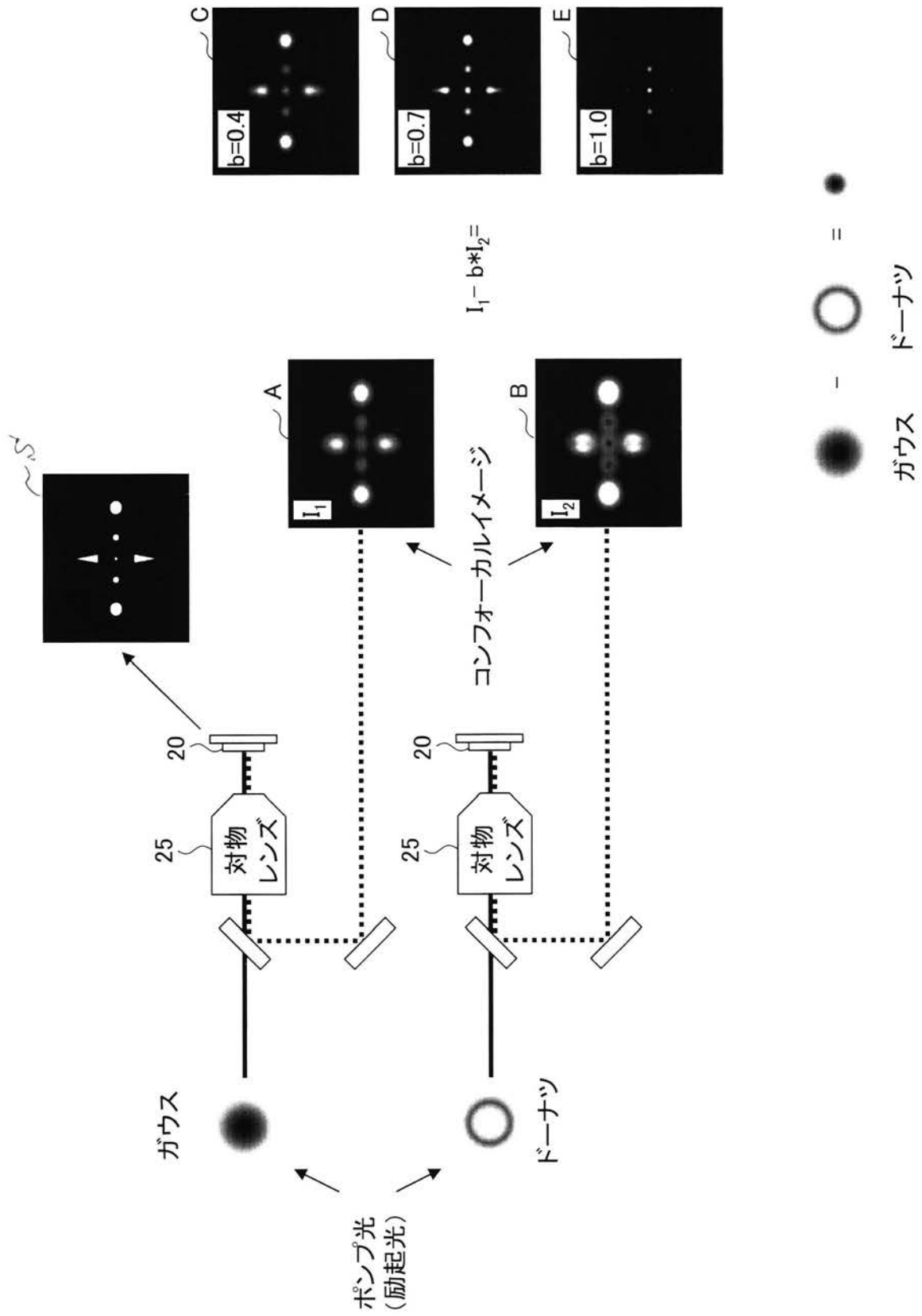
(A)



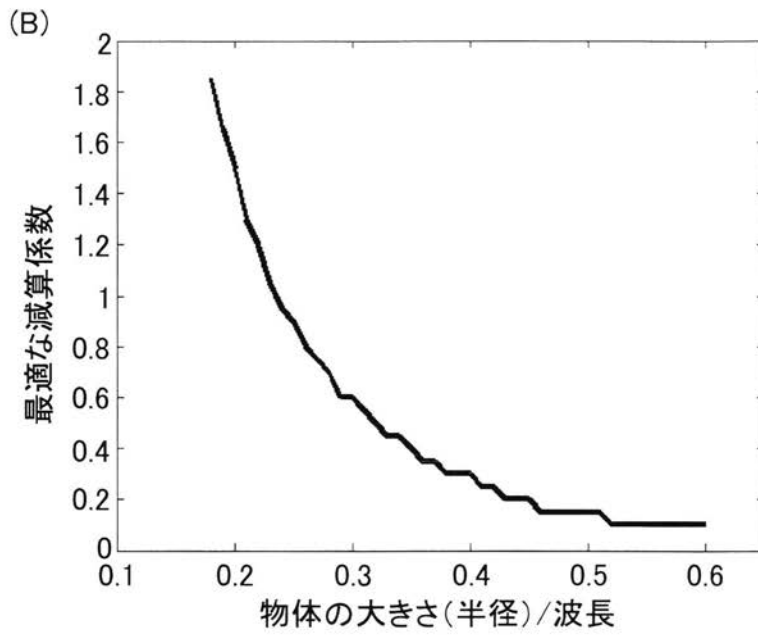
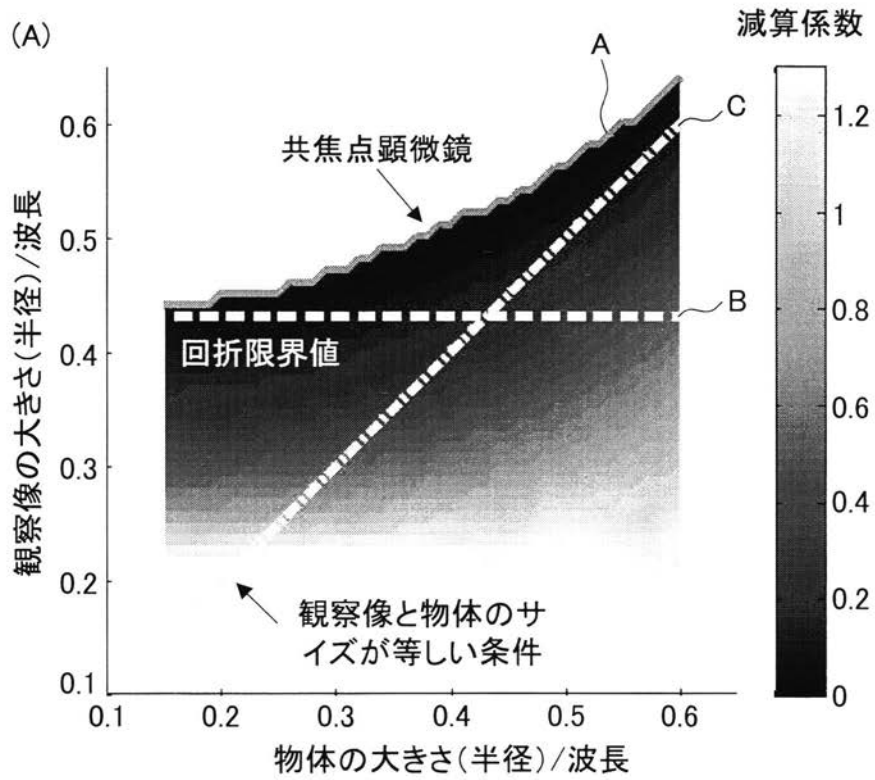
(B)



【 図 3 】

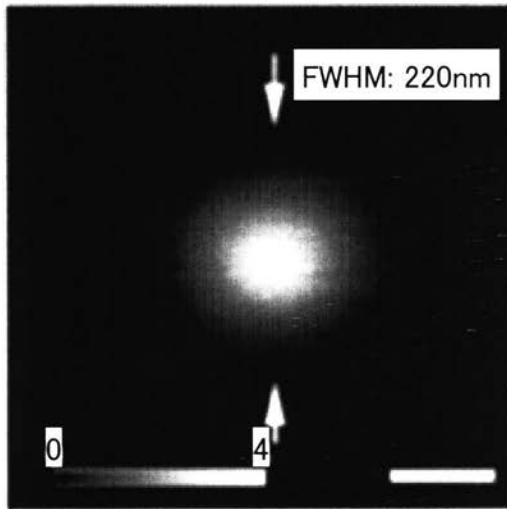


【 図 4 】

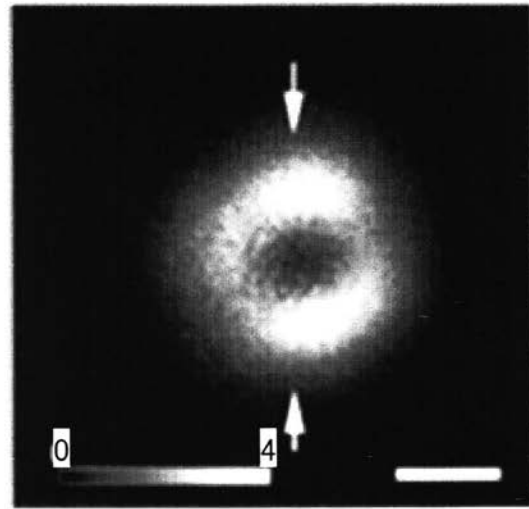


【 図 6 】

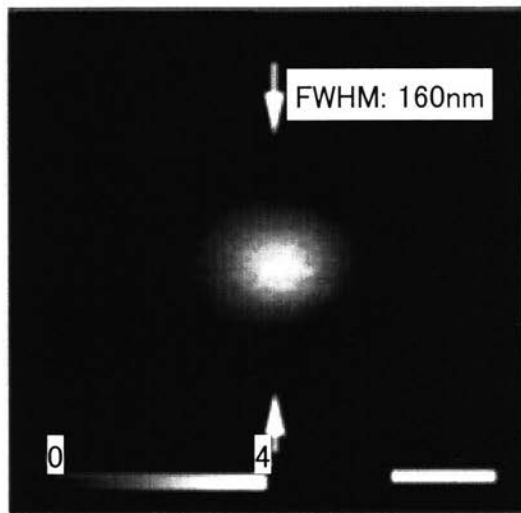
(A)コンフォーカル



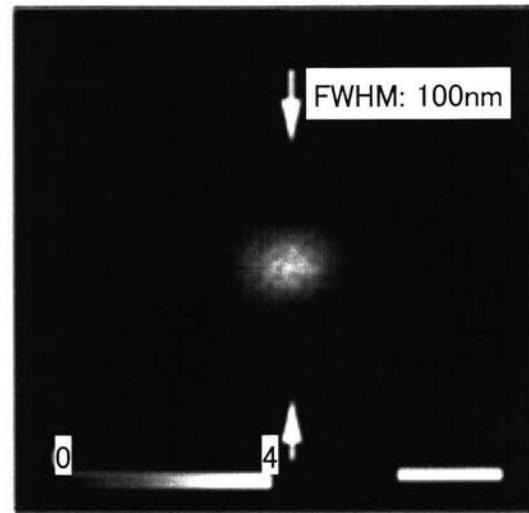
(B)ドーナツ



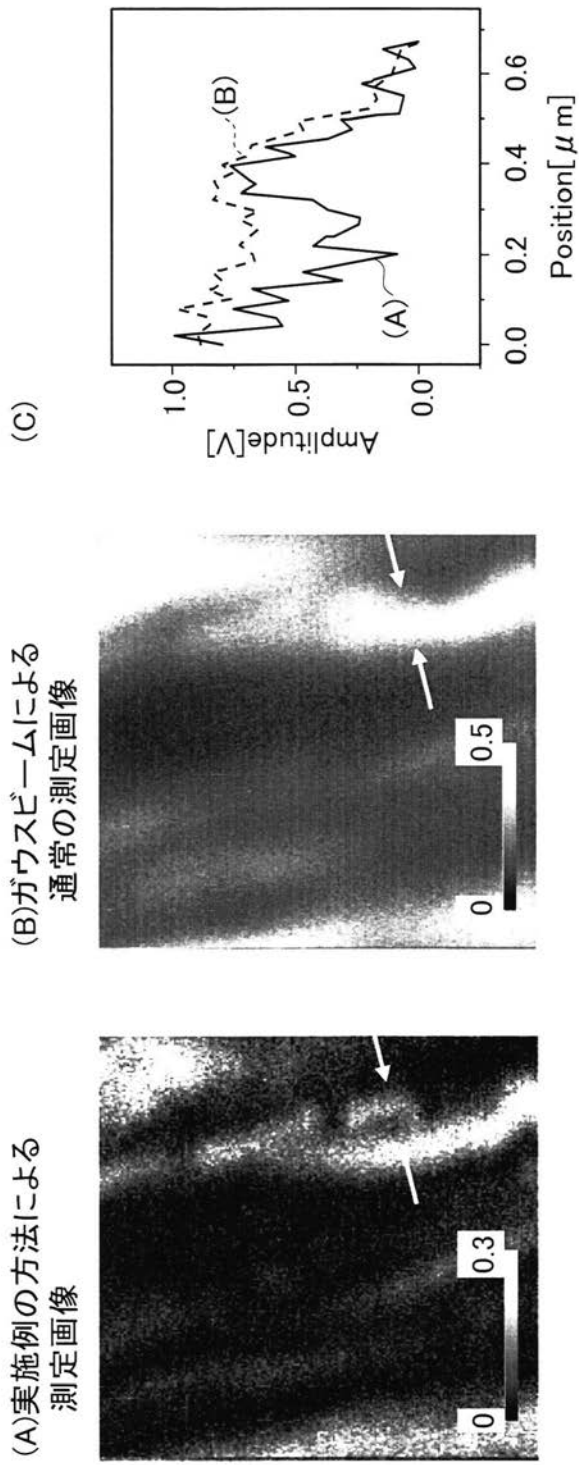
(C) 実施例, $b=0.3$



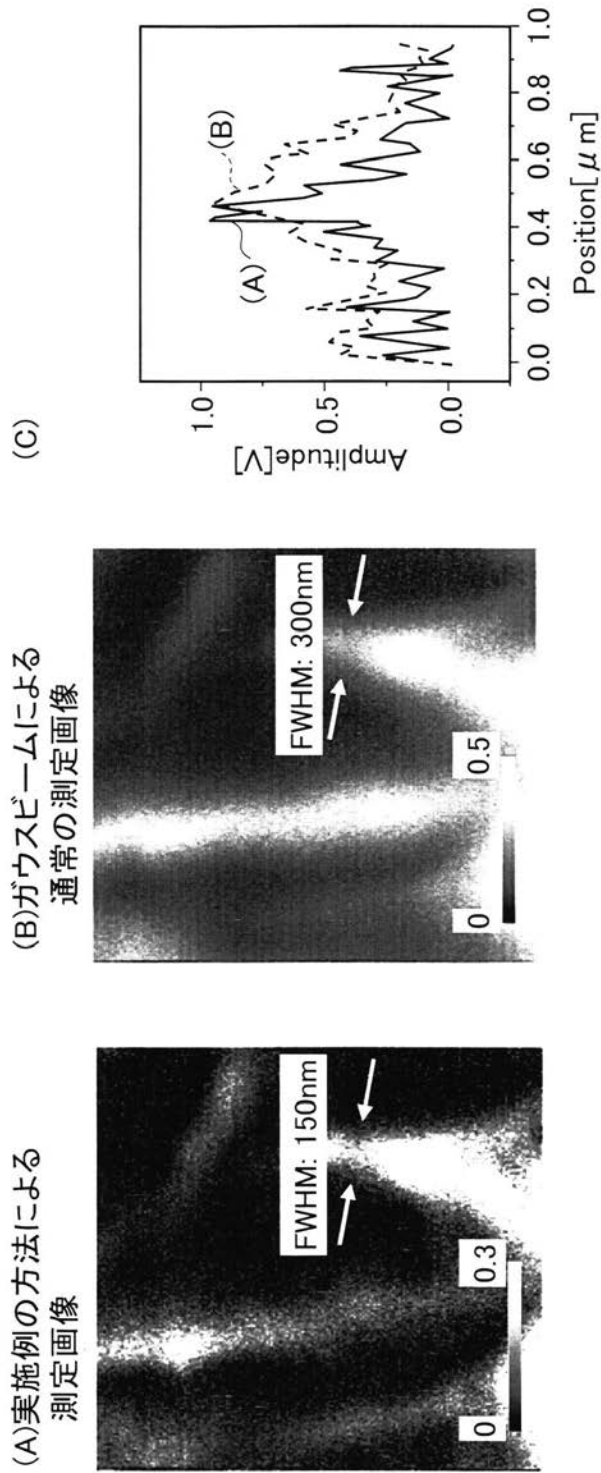
(D) 実施例, $b=0.7$



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(72)発明者 宮崎 淳

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

Fターム(参考) 2G043 AA03 BA16 DA05 EA01 FA01 FA02 FA06 GA01 GA08 GB01
GB05 GB18 HA02 HA06 HA07 HA09 HA12 KA09 LA02 NA01
NA05
2H052 AA07 AA09 AC15 AC34 AD18