

(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2006-133767

(P2006-133767A)

(43) 公開日 平成18年5月25日(2006.5.25)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO2B 21/06 (2006.01)</b>	GO2B 21/06	2H052
<b>GO2B 17/08 (2006.01)</b>	GO2B 17/08 A	2H087

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L 外国語出願 (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2005-309973 (P2005-309973)  
 (22) 出願日 平成17年10月25日 (2005.10.25)  
 (31) 優先権主張番号 102004052276.6  
 (32) 優先日 平成16年10月27日 (2004.10.27)  
 (33) 優先権主張国 ドイツ (DE)

(71) 出願人 597141922  
 カール ツァイス イェナ ゲーエムベー  
 ハー  
 ドイツ連邦共和国 D-07745 イェ  
 ナ カールツァイスプロメナーデ 1  
 O  
 (74) 代理人 100068755  
 弁理士 恩田 博宣  
 (74) 代理人 100105957  
 弁理士 恩田 誠  
 (72) 発明者 ヨハネス ヴィンテロット  
 ドイツ連邦共和国 D-07745 イェ  
 ナ コルンブルーメンヴェーグ 10  
 Fターム(参考) 2H052 AA07 AC15 AC18 AC26 AC27  
 AC34

最終頁に続く

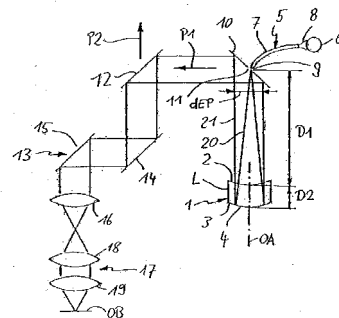
(54) 【発明の名称】 光学システム、特に顕微鏡

(57) 【要約】

【課題】 光学ユニット(17)およびコリメータ(1)を備える光学システム、特に、顕微鏡を提供する。

【解決手段】 コリメータは、光学システムのビーム経路において光学ユニット(17)の前方または後方に配置され、前記光学ユニット(17)は、所定の縦方向色収差を、前記ビーム経路に供給されるビームに付与する。前記ビームは、コリメータ(1)に、拡散ビームまたは平行ビームとして入射し、前記コリメータによって平行ビームまたは集束ビームに変換される。コリメータ(1)は、少なくとも1枚のレンズ(L)と、ビーム経路を折り曲げて、供給されるビームがレンズ(4)を2回通過するようにする湾曲ミラー(4)とを備える。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

光学ユニット(17)およびコリメータ(1)を備える光学システム、特に、顕微鏡であって、前記コリメータは、前記光学システムのビーム径路において前記光学ユニット(17)の前方または後方に配置され、前記光学ユニット(17)は、所定の縦方向色収差を前記ビーム経路に供給されるビームに付与し、前記ビームは前記コリメータ(1)に拡散ビームまたは平行ビームとして入射し、前記コリメータによって平行ビームまたは集束ビームに変換され、前記コリメータ(1)は、少なくとも1枚のレンズ(L)と、前記ビーム経路を折り曲げて、前記供給されたビームが前記レンズ(4)を2回通過するようにする湾曲ミラー(4)とを備える、光学システム。

10

## 【請求項 2】

請求項1に記載の光学システムにおいて、前記コリメータ(1)の縦方向色収差特性は、前記光学ユニット(17)によってビームに付与される縦方向色収差を不変のままに維持するか、あるいは低減するように構成されている、光学システム。

## 【請求項 3】

請求項1または2に記載の光学システムにおいて、前記ミラー(4)は、前記レンズ(L)の一方の側に背面ミラーとして設けられている、光学システム。

## 【請求項 4】

請求項1～3のいずれか1項に記載の光学システムにおいて、前記コリメータ(1)は、前記レンズ(L)を唯一のレンズとして、前記ミラー(4)を唯一のミラーとして備える、光学システム。

20

## 【請求項 5】

請求項1～4のいずれか1項に記載の光学システムにおいて、前記レンズ(L)の両面(2,3)は、球面として設けられている、光学システム。

## 【請求項 6】

請求項1～5のいずれか1項に記載の光学システムにおいて、前記ビーム(20)は、当該ビーム(20)の主光線が前記コリメータ(1)の光軸(OA)と一致するように、前記コリメータ(1)に入射する、光学システム。

## 【請求項 7】

請求項6に記載の光学システムにおいて、貫通孔(11)を備える偏向ミラー(10)が前記ビーム経路において前記コリメータ(1)の前方または後方に配置され、前記ビーム(20)が拡散ビームである場合、前記ビーム(20)は前記貫通孔(11)を通過し、前記コリメータ(1)に入射し、前記コリメータから来る平行ビーム(21)は前記偏向ミラー(10)によって偏向され、前記ビームが平行ビームである場合、前記ビームは前記偏向ミラー(10)によってコリメータ(1)に向けて偏向され、前記コリメータに入射し、前記コリメータから来る集束ビームは前記貫通孔(11)を通過する、光学システム。

30

## 【請求項 8】

請求項1～7のいずれか1項に記載の光学システムにおいて、前記コリメータ(1)は、第1交換可能コリメータとして設けられ、第2コリメータに交換され得るものであり、該第2コリメータは、前記第1コリメータとは異なる波長領域に対する縦方向色収差特性を有し、前記別の波長領域に対して、前記光学ユニット(17)によって付与された長方向色収差を不変のままに維持するか、あるいは低減するようにする、光学システム。

40

## 【請求項 9】

請求項1～8のいずれか1項に記載の光学システムにおいて、前記コリメータ(1)は、前記ミラー(23;27)と、2枚または3枚のレンズ(20,21;24,25,26)とを備え、前記レンズ(20,21;24,25,26)および前記ミラー(23;27)は、前記コリメータ(1)の光軸(OA)に沿って変位可能であり、前記コリメータ(1)の所望の縦方向色収差特性の調節を可能とする、光学システム。

## 【請求項 10】

50

請求項 9 に記載の光学システムにおいて、全てのレンズ ( 2 0 , 2 1 ; 2 4 , 2 5 , 2 6 ) は同一の材料から製造される、光学システム。

【請求項 1 1】

請求項 1 ~ 1 0 のいずれか 1 項に記載の光学システムにおいて、前記光学ユニット自体が、少なくとも第 2 レンズ ( 2 9 ) および第 2 湾曲ミラー ( 3 0 ) を備える別のコリメータ ( 2 8 ) として設けられ、おり、前記第 2 湾曲ミラー ( 3 0 ) は、供給されたビームが前記第 2 レンズ ( 2 9 ) を 2 回通過するように、前記ビーム経路を折り曲げる、光学システム。

【請求項 1 2】

請求項 1 ~ 1 1 のいずれか 1 項に記載の光学システムにおいて、当該光学システムは、レーザ走査顕微鏡または蛍光相関分光計であり、前記コリメータは励起ビーム経路および/または検出ビーム経路において用いられる、光学システム。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学システムに関し、特に、光学ユニットおよびコリメータを備える顕微鏡に関する。

【背景技術】

【0002】

上記のような光学システムとしては、例えば、蛍光相関分光計またはレーザ走査顕微鏡がある。レーザ走査顕微鏡では、多くの場合、光学ユニット ( 対物レンズ ) の縦方向色収差特性のために、望ましくないことに、サンプルの異なる深さで励起が起こるといった問題が生ずる。

20

【0003】

独国特許出願公開 DE 1 0 2 1 7 5 4 4 A 1 により、異なる光学材料の少なくとも 2 枚のレンズを用いてコリメータを構成すると、このコリメータは、対物レンズの縦方向色収差を低減するように作用することが知られている。しかしながら、異なる光学材料の少なくとも 2 枚のレンズを用いてコリメータを構成するため、その生産は複雑であり費用が嵩む。

【特許文献 1】独国特許出願公開 DE 1 0 2 1 7 5 4 4 A 1

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

以上に鑑み、本発明の目的は、光学ユニットおよびコリメータを備える光学システムであって、前述の欠点を克服することができる光学システムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明によれば、この目的は、光学ユニットおよびコリメータを備える光学システム、特に、顕微鏡によって達成される。コリメータは、光学システムのビーム径路において光学ユニットの前方または後方に配置され、前記光学ユニットは、縦方向色収差を前記ビーム経路に供給されるビームに付与し、前記ビームはコリメータに拡散ビームまたは平行ビームとして入射し、前記コリメータによって平行ビームまたは集束ビームに変換され、コリメータは、少なくとも 1 枚のレンズと、ビーム経路を折り曲げて、供給されたビームがレンズを 2 回通過するようにする湾曲ミラーとを備える。これによって、安価なコリメータの製造が可能となる。

40

【0006】

特に、コリメータの縦方向色収差特性が、光学ユニットによってビームに付与される縦方向色収差を不変のままに維持するか、あるいは低減するように構成することができる。

したがって、本発明による光学システムは、コリメータを設け、拡散ビームを平行ビームに変換するか、あるいは平行ビームを集束ビームに変換し、そのように変換する際に、

50

縦方向色収差を変換ビームに付与しないか、あるいは光学ユニットの縦方向色収差とは逆の縦方向色収差をそれに付与する。これによって、コリメータは、光学ユニットによって引き起こされる縦方向色収差を悪化させないという保証が得られる。好ましくは、コリメータは、光学ユニットによって引き起こされる縦方向色収差を低減する。

**【0007】**

光学システムのコリメータを、当該コリメータによって引き起こされる縦方向色収差が（波長が長くなるにつれて）単調に増加するか、あるいは（波長が長くなるにつれて）単調に減少するように構成することができる。これは、例えば、単に、所定のレンズ材料に対してレンズ形状を変更するのみにより達成され、レンズが拡散レンズとして作用する場合には、縦方向色収差は単調に増加し、レンズが集束レンズとして作用する場合には、縦方向色収差は単調に減少する。

10

**【0008】**

具体的には、本発明による光学システムを、レーザ走査顕微鏡または蛍光相関分光計とすることができる。コリメータは、小型（点状）光源から来るビームを平行化するように作用する。この場合、コリメータを顕微鏡の励起側に配置される。代わりに、平行ビームを一点に集束するために、コリメータを検出ビーム経路において用いることも可能である。この場合、コリメータを、ピンホール光学系として用いることができる。

**【0009】**

コリメータにおいて湾曲ミラーを用いることによって、必要なレンズの枚数を削減することが可能になる。特に、単一のレンズを用いて、コリメータの所望の縦方向色収差特性を設定することが可能となる。勿論、コリメータは、数枚のレンズを備えていてもよい。この場合、全てのレンズを同一の材料から製造することが好ましい。

20

**【0010】**

供給されるビームは、特定の帯域幅を有する所定の波長の放射線（好ましくは、光）から成るとよい。この場合、コリメータは、この波長領域に対して、本発明のように構成することが好ましい。しかしながら、供給されるビームは、重複せず離間した2つ以上の異なる波長または波長領域の光を含む場合もある。この場合、コリメータの縦方向色収差特性を、互いに異なる波長領域に関連付けることができる。

**【0011】**

特に、ミラーは、凹型の曲率を有する。これによって、拡散ビームから平行ビームへの所望の変換、または平行ビームから集束ビームへの所望の変換を、特に容易に実現することが可能となる。

30

**【0012】**

ミラーを、レンズの一方の側に背面ミラーとして設けることができる。これには、ミラーをもはやレンズに対して調整する必要がないという利点がある。更に、背面ミラーのために典型的なコーティングを採用し、ミラーの汚れを効果的に防止することもできる。

**【0013】**

光学システムのコリメータは、そのレンズを唯一のレンズとして、かつそのミラーを唯一のミラーとして有することができる。したがって、所望の縦方向色収差特性を有するコリメータを、非常に少数の光学素子を用いて実現することができる。

40

**【0014】**

好ましくは、レンズの両面は、球面として設けられている。ミラーも球面ミラーとしてもよい。これによって、コリメータの製造コストが削減されることは明らかである。何故なら、所望の精度で球面を製造するのは容易であるからである。

**【0015】**

本発明による光学システムの好適な実施形態は、供給ビームが、当該ビームの主光線がコリメータの光軸と一致するように、コリメータ光学系に入射することから成る。したがって、入射ビームは反射してそれ自体に戻って来る。この場合、コリメータ光学系の望ましくない撮像ずれを最小限に抑えることができる。

**【0016】**

50

更に、貫通孔を有する偏向ミラーをコリメータの前方または後方に配置することができ、ビームが拡散ビームである場合、そのビームは貫通孔を通過し、コリメータに入射し、コリメータから来る平行ビームは偏向ミラーによって偏向される。ビームが平行ビームである場合、そのビームは偏向ミラーによってコリメータに向けて偏向され、コリメータに入射し、コリメータから来る集束ビームは貫通孔を通過する。この実施形態では、供給ビームをコリメータ上に垂直に入射させることが特に容易に実現される。

【0017】

更に、本発明による光学システムのコリメータは、第1交換可能コリメータとして設けられ、光学システムの第2コリメータと交換され得るものである。前記第2コリメータは、第1コリメータとは異なる波長領域に対する縦方向色収差特性を有し、この別の波長領域に対して、光ユニットによって付与された長方向色収差を不変のままに維持するか、あるいは低減するようにしている。

10

【0018】

この交換可能なコリメータを有する変形例は、光学システムが、異なる波長を有するビームを連続的に用いる場合に特に便利である。

本発明による光学システムの更に別の好適な実施形態では、コリメータは、ミラーと、2枚または3枚のレンズとを備えており、そのレンズおよびミラーは、コリメータの光軸に沿って変位可能であり、コリメータの所望の縦方向色収差特性の調節を可能とする。したがって、光学システムの動作の間であっても、必要に応じてコリメータの縦方向色収差特性を変化させ、適合させることもできる。特に、この調節を、他の光学パラメータは変化せず一定であるように実行することができる。例えば、一定の焦点距離を有するコリメータを設けることもできる。

20

【0019】

全てのレンズは、同一の材料から製造されることが好ましい。これによって、製造コストは削減され、安価であるが非常に柔軟性のあるコリメータが得られる。

光学システムがレーザ走査顕微鏡として設けられる場合、偏向または走査ユニットをそれぞれ備えればよく、コリメータと光学ユニットとの間に配置される。

【0020】

光学システムでは、好ましくは、光学ユニット自体が、少なくとも第2レンズおよび第2湾曲ミラーを備える別のコリメータとして設けられてもよい。第2湾曲ミラーは、供給されたビームが第2レンズを2回通過するように、ビーム経路を折り曲げる。

30

【0021】

特に、貫通孔を有する偏向ミラーを介して両コリメータを結合し、供給されるビームが偏向ミラーによって第1のコリメータまたは別のコリメータに導かれるようにし、次いでビームは前記コリメータによって反射されてそれ自体に戻り、貫通孔上で合焦し、前記貫通孔を通過し、前記2つのコリメータの他方に入射し、後者によって反射してそれ自体に戻り、偏向ミラーに向けて導かれ、これによって再度偏向を受ける。これにより、特に、平行ビームのビーム断面を増減する手段を設けることができ、この手段は、同時に所望の縦方向色収差特性も有する。

【0022】

別のコリメータは、更に、本発明による光学システムの前述の好適な実施形態における第1コリメータと同様に具体化され得る。

40

光学システムは、励起ビーム経路および/または検出ビーム経路に配置されたコリメータを有するレーザ走査顕微鏡または蛍光相関分光計として設けられ得る。

【発明を実施するための最良の形態】

【0023】

図1に示す実施形態において、本発明による光学システムはレーザ走査顕微鏡として設けられており、凹面2および凸面3を有する単一レンズLを含むコリメータ1を備えている。前記凸面3には銀メッキが施され、その上に背面ミラー4が形成される。

【0024】

50

更に、レーザ走査顕微鏡は、光源ユニット 6 と単一モード・ファイバ 7 とを備えている光源 5 を含み、光源ユニット 6 からの光は、単一モード・ファイバ 7 にその一端から入射し、他端 9 から出射する。したがって、端部 9 は点光源を形成し、偏向ミラー 10 の背後に配置され、前記端部が光を直接偏向ミラー 10 の貫通孔 11 に出射できるようになっている。勿論、光がファイバから出射する位置には、例えば、合焦光学系（図示せず）の焦点が存在するとよい。

【0025】

更に、レーザ走査顕微鏡は、主カラー・スプリッタ 12、偏向ユニット 13、2 枚の偏向ミラー 14 および 15、ならびに走査用光学系 16、および円筒状レンズ (tube lens) 18 と対物レンズ 19 とを備えている顕微鏡光学系 17 を含む。勿論、偏向ユニット 13 は、2 枚の偏向ミラー 14 および 15 の代わりに、1 枚だけの偏向ミラー（図示せず）を備え、例えば、2 本の軸を中心として枢動可能としてもよい。

10

【0026】

動作の間、発散照明ビーム 20 がファイバ 7 の端部 9 から出射し、発散照明ビーム 20 の主要な光線はコリメータ（または平行化光学系それぞれ）1 の光軸 OA と一致し、平行化光学系 1 に入射する。平行化光学系 1 は、照明ビーム 20 を平行ビーム 21 に変形し、平行ビーム 21 は偏向ミラー 10 に入射し、矢印 P1 で示すように、後者によって主カラー・スプリッタ 12 に向けて反射される。周知の態様で、平行ビーム 21 は次に主カラー・スプリッタ 12、偏向ユニット 13、および顕微鏡光学系 17 によって検査対象の物体 OB 上に合焦および移動し、例えば、蛍光発光を励起する。蛍光は、顕微鏡光学系 17、偏向ユニット 13 を通過し、次いで、矢印 P2 で示すように、主カラー・スプリッタ 12 によって検出ビーム経路に導かれる。検出ビーム経路において、蛍光を周知の方法で分析する。

20

【0027】

平行化光学系 1 は、光源 5 の光に対するその縦方向色収差が、顕微鏡光学系 17 の縦方向色収差を低減するように構成されている。光源 5 の光は、例えば、 $565\text{ nm} \pm 15\text{ nm}$  の波長を有する光とするとよい。この場合、この波長領域に対する平行化光学系 1 は、この波長領域における顕微鏡光学系 17 の縦方向色収差を低減するように構成されている。

【0028】

図 2 は、本発明による平行化光学系 1 の 5 つの変形の縦方向色収差特性を示す。横軸に沿って、波長  $\lambda$  が nm 単位で表されており、縦軸に沿って、縦方向色収差  $a_{02}(\lambda)$  が、 $a_{02}(\lambda)$  の波面変形として分けて示されており、 $s(\lambda) = 1.1 * a_{02}(\lambda) / nA^2$  により、物理的焦点切片 (physical focal intercept) を計算することができる。 $s(\lambda) = s(\lambda) - s(546\text{ nm})$  は、波長  $\lambda$  に対する焦点切片差を示し、 $nA$  は開口数であり、ここでは、 $1/2 \cdot dEp / f$  と定義する ( $dEp$  は入射瞳の直径であり、ここでは  $dEp = 3.2\text{ mm}$  であり、 $f$  はコリメータの焦点距離である)。 $\lambda = 350\text{ nm}$  に対する  $a_{02}(\lambda)$  の値は、この場合、単に  $a_{02}$  で示し、コリメータの異なる縦方向色収差特性を区別するためのパラメータとして作用する。

30

【0029】

線分  $a_{02} = -2$  は、図 1 のコリメータ 1 の縦方向色収差特性を示し、以下のパラメータを有する、背面銀メッキした単一レンズとして設けられる。

40

凹状前面 2 の曲率半径：54.13 mm

凸状背面 3 の曲率半径：42.34 mm

レンズの厚さ  $D_2$ ：3.71 mm

点光源から前面 2 の距離  $D_1$ ：17.14 mm

材料パラメータ： $n_e = 1.58481$ ,  $v_e = 40.57$

焦点距離  $f$ ：20 mm

顕微鏡光学系 17 の縦方向色収差のみ（曲線  $a_{02} = 0$ ）、およびコリメータ 1 との組み合わせ（曲線  $a_{02} = -2$ ）を図 3 に示す。この場合も、波長  $\lambda$  は、横軸に沿って nm

50

単位で示されており、縦方向色収差  $a_{02}$  ( ) は縦軸に沿って mm 単位で示されている。

【0030】

図3における曲線  $a_{02} = 0$  および  $a_{02} = -2$  の比較から明らかなように、顕微鏡光学系17の縦方向色収差は、550 nm よりも長い領域では単調に減少し(図3における曲線  $a_{02} = 0$ )、したがってコリメータ1の逆向きの縦方向色収差(図2における曲線  $a_{02} = -2$ )によって、卓越した補償を行うことができる(図3における曲線  $a_{02} = -2$ )。550 から 600 nm の領域における縦方向色収差は、実際には0であり、つまり殆ど完全に排除されている。したがって、レーザ走査顕微鏡は、この波長領域においては、励起側において色消しされている。更に、600 から 650 nm の領域における縦方向色収差は、顕微鏡光学系17のみの縦方向色収差特性(曲線  $a_{02} = 0$ )と比較すると、最大でも半分に過ぎない。

10

【0031】

図2には、図1によるコリメータの変更例の縦方向色収差特性を示したが、背面に銀メッキした凹凸単一レンズとしての基本構造は維持されており、その上、同一のレンズ材料を用いている。単に、曲率半径、ならびにレンズの厚さおよび距離  $D_1$  が異なるだけである。

【0032】

以下の表は、対応する曲率半径および距離を、図1のコリメータ1の焦点距離  $f$ 、および以下の表による変更例の焦点距離を各々 20 mm とした場合について示す。

20

【0033】

【表1】

曲線 $a_{02} =$	前面2の曲率半径 [mm]	背面3の曲率半径 [mm]	$D_2$ [mm]	$D_1$ [mm]
-6	177.96	56.89	3.74	17.66
0	40.21	42.34	3.71	17.74
+2	31.98	39.31	4.00	17.59
+6	22.66	34.29	4.05	17.60

30

図2におけるグラフから明らかなように、縦方向色収差特性は、単に曲率半径および距離を選択するか、あるいは幾何学的寸法を変更することによって、波長が長くなるにつれて ( $a_{02} = 6$  または  $2$ ) 単調な減少し、波長に無関係となる領域を経て、波長が長くなるにつれて ( $a_{02} = -6$  または  $-2$ ) 単調に増加するように設定することができ、その際、材料を変更することはない。これによって、顕微鏡光学系17の所望の光学補正を、対応する用途の場合(即ち、対応する波長)に合わせて設定することが可能となる。

【0034】

また、図3は、 $a_{02} = 2$  として、コリメータ1と組み合わせた顕微鏡光学系17の縦方向色収差特性を示す。この場合、450 から 550 nm の波長範囲において、縦方向色収差の卓越した低減が達成される。

40

【0035】

図1のコリメータ1および図2に示す変更は全て、次の条件を満たす。

【0036】

【数1】

$$\left| 1/R_2 - (a_{02} * (b_2/f^2 + b_1/f + b_0) + c_2/f^2 + c_1/f + c_0) \right| < 0.0003$$

$R_2$  は、背面3の曲率半径であり、 $f$  はコリメータ1の焦点距離であり、定数  $c_0$  ,  $c_1$  ,  $c_2$  ,  $b_0$  ,  $b_1$  ,  $b_2$  は以下の値を有する。

50

## 【0037】

$$\begin{aligned} b_0 &= -0.0010395 & c_0 &= 0.00068469 \\ b_1 &= -0.003737 & c_1 &= -0.570058 \\ b_2 &= 0.0844626 & c_2 &= 1.679172 \end{aligned}$$

上述の条件によって、R2したがってミラー4の曲率半径を規定することができる。コリメータは、異なる焦点距離を有するように構成することもできる。次の不等式： $0.002 < 1/f < 0.1$ を満たす焦点距離を設定することができる。

## 【0038】

上述の条件は、構成したコリメータまたは光学システムの数値分析から、それぞれ、所定の限界条件（例えば、コリメータの焦点距離、レンズの材料、...）の関数として導き出すことができる。

10

## 【0039】

更に、本発明による光学システムでは、距離D1を変更することも可能である。具体的には、これは、平行化光学系1を光軸OAに沿って移動させることにより実現することができる。図2のグラフにおいて、距離D1を延長すると、対応する曲線が縦軸に沿って低い値に向かって変位する。したがって、距離D1を短縮すると、曲線は上方に変位することになる。

## 【0040】

また、ミラー4を別個のミラーとして設けることも勿論可能である。また、平行化光学系1は、格子を備えてもよく、例えば、前面2、背面3またはミラー面4の上に配される。

20

## 【0041】

本発明による光学システムでは、供給される光が異なる波長領域（例えば、 $500\text{ nm} \pm 15\text{ nm}$ および $430\text{ nm} \pm 15\text{ nm}$ ）を含む場合、双方の波長領域に対するその縦方向色収差が、顕微鏡光学系の対応する縦方向色収差を補償するか、少なくとも低減するようにコリメータ光学系1を設けることができる。

## 【0042】

図4は、コリメータ1の更に別の変更例を示す。この実施形態では、コリメータ1は、2枚の凹凸レンズ20, 21, および凹状ミラー23を備えている。レンズ20および21ならびにミラー23は、それらの距離が可変となるように、光軸に沿って移動可能である。例えば、図4におけるコリメータ1の焦点距離fを一定にすると、光学システム（即ち、顕微鏡光学系17およびコリメータ1）の縦方向色収差を、補償不足（顕微鏡光学系17の縦方向色収差が完全には補償されていない）から補償過剰（コリメータ1の縦方向色収差が非常に大きく、顕微鏡光学系17の縦方向色収差を補償するものの、この場合コリメータ1によって生じた縦方向色収差が光学システムに出てしまう）まで連続的に調整することが可能となる。

30

## 【0043】

図4の実施形態では、レンズ20および21は、同一の材料から製造され、アッペの分散数は36.16である。コリメータ1の入射瞳からレンズ20の凹状面までの距離はD1であり、互いに面するレンズ20および21の2面間の距離はD2であり、レンズ21の凸状面からミラー23までの距離はD3である。レンズ20および21の厚さは、D4およびD5である。焦点距離fは20mmである。この場合、ミラー23の曲率、レンズ20および21の屈折力、ならびに移動のダイナミクス（即ち、距離D1, D2, およびD3のばらつき）は、以下のように、システムの焦点距離の関数として記述することができる。この場合、焦点距離の合焦および調節は、3つの距離D1, D2, およびD3のうちの2つを選択することによって行い、縦方向色収差特性は、3番目の距離（この場合、D3）の値を選択することによって規定することができる。

40

## 【0044】



【数 2】

$$|1/R + 0.4088/f + 0.0023| < 0.001$$

$$|f1 + 0.0669 * f + 28.788| < 0.05 * f$$

$$|f2 - 0.0271 * f - 57.22| < 0.05 * f$$

$$|D3(\Delta s(=0)) - D3(\Delta s(<0)) - 0.4179 * f + 1.4475| < 0.02 * f$$

10

$$|D3(\Delta s(>0)) - D3(\Delta s(<0)) - 0.731 * f - 2.867| < 0.02 * f$$

Rは、ミラー23の曲率半径であり、f1およびf2はそれぞれレンズ20および21の焦点距離である。s(<0)は、sの値が0未満であることを表す。s(=0)は、sの値が0であることを表し、s(>0)は、sの値が0よりも大きいことを表す。ここに記載している実施形態では、s(<0)とすると、値a02は約-3.5となり、s(>0)とすると、値a02は約+3.5となる。

【0045】

図4のコリメータ1の正確なパラメータは、次の通りである。

20

凹面F1の曲率半径：13.10

凸面F2の曲率半径：48.39

凹面F3の曲率半径：18.44

凸面F4の曲率半径：12.78

凹状ミラー23の曲率半径：43.99

D4 = 2.00

D5 = 2.00

【0046】

【表 2】

	$\Delta s (< 0)$	$\Delta s (= 0)$	$\Delta s (> 0)$
D1	14.05	6.93	3.12
D2	4.83	3.12	0.55
D3	0.50	7.68	16.57

30

上の表は、sに対する特殊な値を示す。図5は、縦方向色収差特性の距離D1, D2, およびD3に対する依存性を、a02の値を横軸に沿って示し、対応する距離の値を縦軸に沿ってmm単位で示したグラフである。一方、パラメータa02の個々の各値には、縦方向色収差特性が関連付けられている。ここでは図示されていないが、定性的に図2に表したものに对应する。したがって、設定すべき距離D1~D3は、図5のグラフから、所望の縦方向色収差特性の関数として取り込むことができる。a02の値が-3.5, 3.5および0の場合の対応する距離を、上の表に示す。

40

【0047】

コリメータ4を、焦点距離fが次の不等式 $0.002 < 1/f < 0.1$ を満足するように構成することができる。レンズ20および21のアッペの分散数は、60未満であることが好ましく、40未満であることが更に好ましい。全体的に、図4のコリメータ1は、負の屈折力および低いアッペの分散数を有するレンズ20、正の屈折力および低いアッペの分散数を有するレンズ21、および正の屈折力を有するミラー23を備えている。距離D1~D3を調節することによって、システム全体の焦点距離は一定のまま、所望の縦方向色収差特性を設定および変更することができる。

50

## 【 0 0 4 8 】

特に、図 4 のコリメータ 1 は、レンズ 2 0 および 2 1 用ならびにミラー 2 3 用の調節素子も備えることができ、縦方向色収差特性の変更を自動的に行うことができる。

図 6 は、正の屈折力を有するレンズ 2 4、負の屈折力を有するレンズ 2 5、および正の屈折力を有するミラー・レンズ 2 6 を備えているコリメータ 1 を示す。これらのレンズは、各々、例えば 6 0 未満、好ましくは 4 0 未満の低いアップの分散数を有する。ここに記載する具体的な実施形態では、アップの分散数は 3 6 . 1 6 である。図 6 におけるコリメータは、全システムの焦点距離を一定にして、縦方向色収差を補正過剰から補正不足まで連続的に調整することができるように構成されている。入射瞳からレンズ 2 5 の表面 F 5 までの距離を D 1 とし、互いに面するレンズ 2 4 および 2 5 の表面 F 6 および F 7 間の距離を D 2 とし、レンズ 2 5 および 2 6 の表面 F 8 および F 9 間の距離を D 3 とする。レンズ 2 4 , 2 5 , および 2 6 の厚さは、それぞれ、D 4 , D 5 , および D 6 である。

10

## 【 0 0 4 9 】

図 6 のコリメータは、以下の条件を満たすように構成されている。

## 【 0 0 5 0 】

## 【数 3】

$$|1/R6 + 0.3143/f + 0.0088| < 0.001$$

$$|f1 - 0.1175 * f - 45.775| < 0.1 * f$$

20

$$|f2 + 0.0133 * f + 14.621| < 0.1 * f$$

$$|f3 - 0.0286 * f - 9.6999| < 0.1 * f$$

$$|D2(\Delta s(=0)) - D2(\Delta s(<0)) - 0.0004 * f^2 + 0.2172 * f - 1.6243| < 0.01 * f$$

$$|D2(\Delta s(>0)) - D2(\Delta s(<0)) - 0.0011 * f^2 + 0.4239 * f - 2.7441| < 0.01 * f$$

30

この実施形態でも、 $s (< 0)$  の場合、値  $a 0 2$  は約 - 3 . 5 となり、 $s (> 0)$  の場合、値  $a 0 2$  は約 3 . 5 となる。レンズ面の正確な曲率は以下の通りである。

## 【 0 0 5 1 】

凸面 F 5 の曲率半径 : 7 1 . 7 6 m m

凹面 F 6 の曲率半径 : 5 1 . 0 7 m m

凹面 F 7 の曲率半径 : 8 . 9 0 m m

凹面 F 8 の曲率半径 : 2 5 4 . 8 8 m m

凸面 F 9 の曲率半径 : 4 9 . 0 8 m m

凸面 F 1 0 の曲率半径 : 4 0 . 9 4 m m

40

D 4 = 2 . 0 0

D 5 = 5 . 5 2

D 6 = 4 . 0 0

## 【 0 0 5 2 】

【表 3】

	$\Delta s (< 0)$	$\Delta s (= 0)$	$\Delta s (> 0)$
D1	4.50	8.91	12.95
D2	5.51	3.10	0.61
D3	2.22	1.51	0.88

縦方向色収差特性の個々の距離 D 1 ~ D 3 に対する依存性を、図 7 のグラフ表現にて示す。この表現は、図 5 のそれに対応する。図 7 の表現により、距離 D 1 ~ D 3 を、所望の縦方向色収差  $a_0 2$  に合わせて決定することが可能となる。

10

## 【0053】

記載した実施形態において特に有益なことは、全ての曲面レンズまたはミラー面をそれぞれ球面として設けられることである。

図 4 および図 6 の実施形態に示した条件は、それぞれのコリメータの光学特性の計算の数値分析から、当業者には容易に導き出すことができる。

## 【0054】

前述のコリメータにおける光路は、焦点面（この場合、例えば、偏向ミラー 10 における貫通孔 11）から出射される拡散ビームをコリメータによって平行ビームに変形し、平行ビームを集束ビームに変換して焦点面に合焦するように、逆向きにもできる。

## 【0055】

図 8 は、本発明による光学システムの代替実施形態を示し、2つのコリメータ 1 および 28 が、偏向ミラー 10 を介して直列に結合され、これらが平行ビームのビーム断面を拡大または縮小する手段として作用するようにしている。この目的のために、第 1 コリメータを、例えば、図 1 の実施形態の場合と同様に設け、ミラー 10 にも同様に貫通孔 11 を設け、この場合ミラー 10 の両面に銀メッキを施す。

20

## 【0056】

ミラー 10 に続いて（即ち、図 8 の表示におけるミラーの上部に）配置されるのは、第 2 レンズ 29 を備えた第 2 コリメータ 28 であり、第 2 レンズ 29 の背面には銀メッキが施され、湾曲ミラー面 30 が設けられている。2 枚のレンズ L および 29 の偏向ミラーからの距離、およびレンズ L、29 の寸法は、矢印 P 3 の方向に沿って伝搬する平行ビーム 31 が偏向ミラー 10 によって下方向に偏向されレンズ L に向かうように選択する。コリメータ 1 によるビーム 31 の反射の後、前記ビームは集束ビーム 32 に変換され、貫通孔 11 上に合焦する（即ち、ビーム 32 はその最少ビーム断面を貫通孔 11 の近傍に有する）。

30

## 【0057】

ミラー 10 の後、貫通孔 11 を通過したビーム 32 は、拡散ビームとなり、コリメータ 28 によって反射されそれ自体に戻って、平行ビーム 33 に変換される。平行ビーム 33 は、ミラー 10 に入射し、後者によって右（矢印 P 4 の方向）に偏向される。この場合、伝搬方向 P 3 および P 4 は一致し、ビーム 31 および 33 の主要光線が共通軸上に位置するようにしている。ビーム 33 がビーム 31 と異なるのは、そのビーム断面の方が小さいことである。したがって、図 8 の光学システムは、ビーム断面を縮小するための手段として作用し、勿論、この手段に対して逆方向に通過させることも可能であり、その場合前記手段はビーム拡大器となる。

40

## 【0058】

2つのコリメータ 1 および 28 は、勿論、図 1 から図 7 に関して説明したように、改良または具体化され得る。特に、レンズ L および 29 は、同一の材料から形成され得る。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0059】

【図 1】本発明による光学システムの一実施形態の模式図。

【図 2】図 1 の光学システムのコリメータの縦方向色収差を例示する図。

50

【図3】図1の光学システム全体の縦方向色収差を例示する図。

【図4】第2実施形態によるコリメータ。

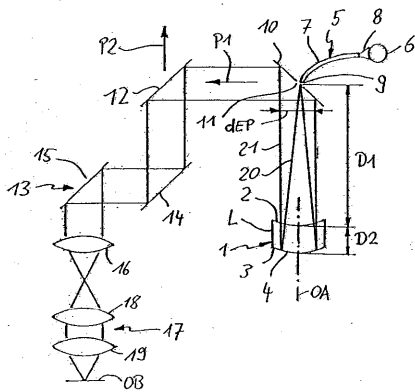
【図5】所望の縦方向色収差特性のために調節すべきレンズおよびミラーの位置を明示する図。

【図6】更に別の実施形態によるコリメータ。

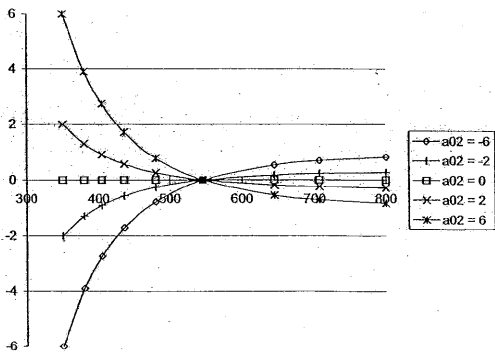
【図7】図6のコリメータの調節可能なレンズ位置を、所望の縦方向色収差特性の関数として明示する図。

【図8】本発明による光学システムの別の実施形態。

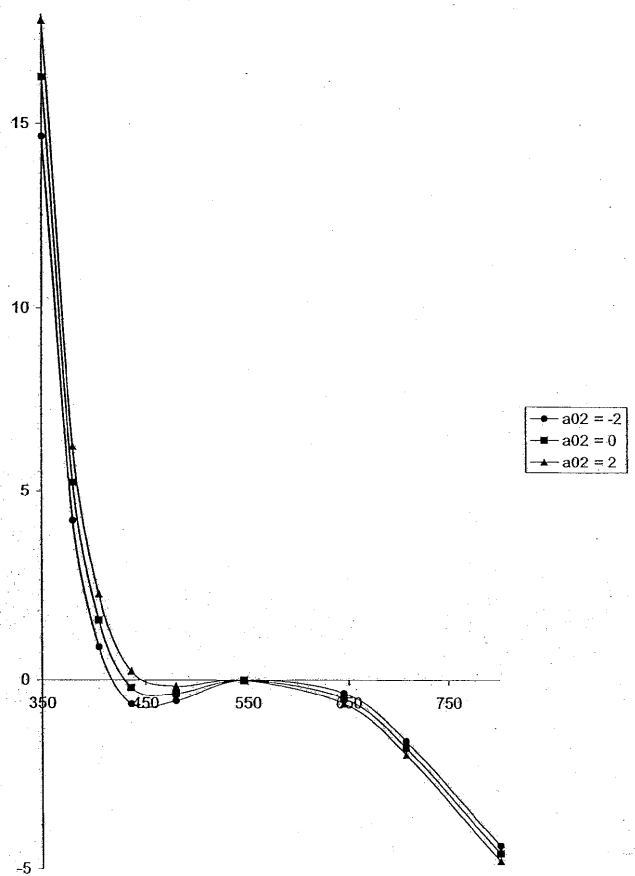
【図1】



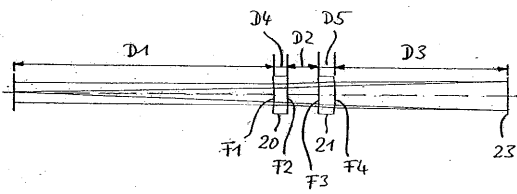
【図2】



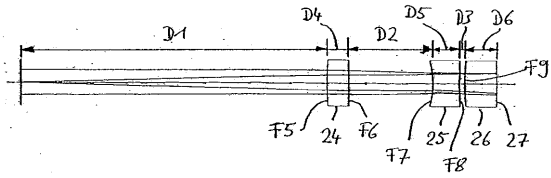
【図3】



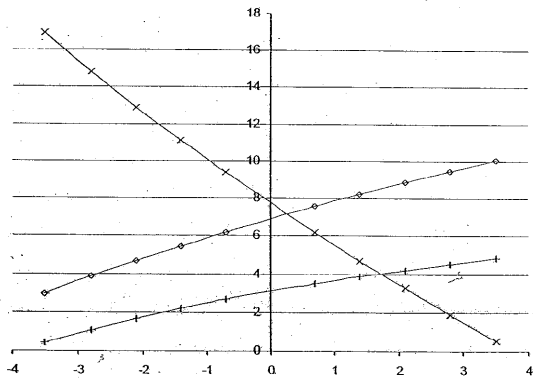
【 図 4 】



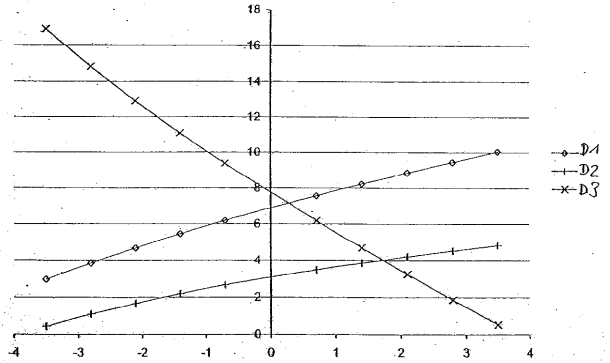
【 図 6 】



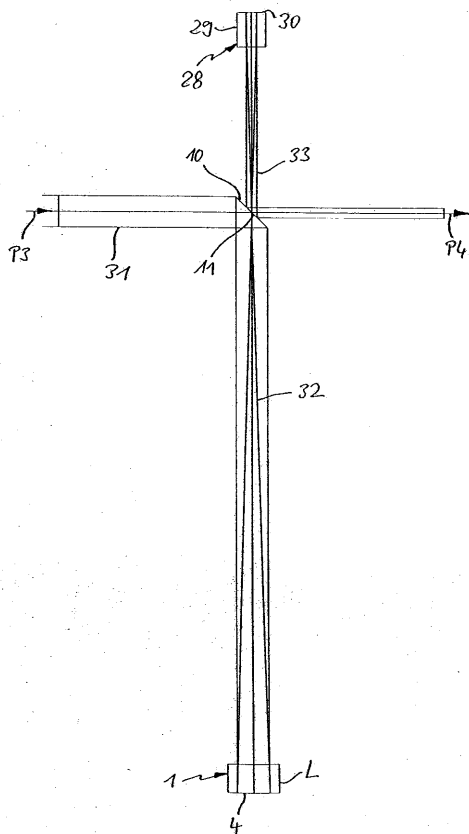
【 図 5 】



【 図 7 】



【 図 8 】



---

フロントページの続き

Fターム(参考) 2H087 KA09 LA25 PA01 PA17 PB01 QA02 QA06 QA12 QA17 QA32  
QA36 TA01 TA03 TA08

## 【 外国語明細書 】

**Optical system, in particular microscope**

The invention relates to an optical system, in particular to a microscope, comprising an optical unit and a collimator.

Such optical system is, for example, a fluorescence correlation spectroscopy or a laser-scanning microscope. In a laser-scanning microscope, there is often the problem that, due to the longitudinal chromatic aberration characteristic of the optical unit (the objective), excitation undesirably occurs at different depths in a sample.

It is known from DE 102 17 544 A1 to construct a collimator using at least two lenses of different optical materials, which collimator serves to reduce the longitudinal chromatic aberration of the objective. However, since the collimator is constructed using at least two lenses of different optical materials, its production is complex and costly.

In view thereof, it is an object of the invention to provide an optical system comprising an optical unit and a collimator, said system allowing the above-described disadvantages to be overcome.

According to the invention, the object is achieved by an optical system, in particular a microscope, comprising an optical unit and a collimator, which collimator is arranged preceding or following the optical unit in a beam path of the optical system, said optical unit imposing a longitudinal chromatic aberration on a beam supplied to said beam path and said beam impinging on the collimator as a diverging beam or a parallel beam and being converted by said collimator into a parallel beam or a converging beam, with the collimator comprising at least one lens as well as a curved mirror which folds the beam path such that the supplied beam passes twice through the lens. This allows inexpensive manufacture of a collimator.

In particular, the longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator may be designed such that the longitudinal chromatic aberration imposed on the beam by the optical unit remains unchanged or is reduced.

- 2 -

Thus, the optical system according to the invention provides a collimator which either converts a diverging beam into a parallel beam or a parallel beam into a converging beam and, in doing so, either imposes no longitudinal chromatic aberration on the converted beam or imposes thereon a longitudinal chromatic aberration which is opposed to the longitudinal chromatic aberration of the optical unit. This ensures that the collimator does not deteriorate the longitudinal chromatic aberration caused by the optical unit. Preferably, the collimator even reduces the longitudinal chromatic aberration caused by the optical unit.

The collimator of the optical system may be designed such that the longitudinal chromatic aberration caused by the collimator increases monotonically (as the wavelength increases) or decreases monotonically (as the wavelength increases). For example, this is achieved solely by changing the lens shape for a predetermined lens material, with the longitudinal chromatic aberration increasing monotonically, if the lens acts as a diverging lens, and the longitudinal chromatic aberration decreasing monotonically, if the lens acts as a collecting lens.

The optical system according to the invention may be, in particular, a laser-scanning microscope or a fluorescence correlation spectroscopy. The collimator may serve to parallel a beam coming from a small (punctiform) light source. In this case, the collimator is arranged on the excitation side of the microscope. As an alternative, it is possible to use the collimator in the detection beam path in order to converge a parallel beam to one point. In this case, the collimator may be used as pinhole optics.

The use of the curved mirror in the collimator allows the number of lenses needed to be reduced. In particular, it is possible to use one single lens and to thus set the desired longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator. Of course, the collimator may also comprise several lenses. In this case, all lenses are preferably manufactured from the same material.

The supplied beam may comprise radiation (preferably light) of a predetermined wavelength having a certain bandwidth. In this case, the collimator is preferably designed for this wavelength region in the manner of the invention. However, the supplied beam may also contain light of two or more different wavelengths or wavelength regions, respectively, which do not overlap, but are spaced apart. In this case, the longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator may be related to the different wavelength regions relative to each other.



In particular, the mirror has a concave curvature. This allows the desired conversion of the diverging beam into the parallel beam or of the parallel beam into a converging beam to be realized with particular ease.

The mirror may be provided as a rear surface mirror on one side of the lens. This has the advantage that the mirror need no longer be adjusted relative to the lens. Moreover, typical coatings for rear surface mirrors may be employed, thus effectively preventing soiling of the mirror.

The collimator of the optical system may have the lens as the only lens and the mirror as the only mirror. Thus, a collimator having the desired longitudinal chromatic aberration characteristic can be realized using an extremely small number of optical elements.

Preferably, both sides of the lens are provided as spherical surfaces. The mirror may also be a spherical mirror. This leads to a clear reduction in the manufacturing cost of the collimator, because spherical surfaces are easy to manufacture with the desired accuracy.

A preferred embodiment of the optical system according to the invention consists in that the supplied beam is incident on the collimator optics such that the main ray of the beam coincides with the optical axis of the collimator. Thus, the incident beam is reflected back in itself. In this case, undesired imaging errors of the collimator optics can be minimized.

Further, a deflecting mirror having a through hole may be arranged preceding or following the collimator, wherein the beam, if it is a diverging beam, passes through the through hole and impinges on the collimator, and the parallel beam coming from the collimator is deflected by the deflecting mirror, and wherein the beam, if it is a parallel beam, is deflected by the deflecting mirror to the collimator and impinges on the collimator, and the converging beam coming from the collimator passes through the through hole. In this embodiment, the perpendicular incidence of the supplied beam on the collimator is particularly easy to realize.

Further, the collimator of the optical system according to the invention may be provided as a first exchangeable collimator, which may be replaced with a second collimator of the optical system, said second collimator having a longitudinal chromatic aberration characteristic for a different wavelength region than the first collimator such that, for the other wavelength region, the longitudinal chromatic aberration imposed by the optical unit remains unchanged or is reduced.

- 4 -

This variant with exchangeable collimators is particularly advantageous if the optical system is consecutively used with beams having different wavelengths.

A further preferred embodiment of the optical system according to the invention consists in that the collimator comprises the mirror as well as two or three lenses, and the lenses as well as the mirror are displaceable along the optical axis of the collimator, so as to allow adjustment of a desired longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator. Thus, even during operation of the optical system, the longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator may be changed and adapted as required. In particular, this adjustment can be effected such that other optical parameters remain unchanged. For example, the collimator may be provided such that it has a constant focal length.

All lenses are preferably made from the same material. This reduces manufacturing costs and leads to an inexpensive, but very flexible collimator.

If the optical system is provided as a laser-scanning microscope, it may also comprise a deflecting or scanning unit, respectively, which is arranged between the collimator and the optical unit.

The optical system may preferably be provided such that the optical unit itself is provided as a further collimator comprising at least a second lens and a second curved mirror, the latter folding the beam path such that the supplied beam passes twice through the second lens.

In particular, both collimators may be coupled via a deflecting mirror with a through hole such that the supplied beam is directed to the first or the further collimator by the deflecting mirror, is then reflected back in itself by said collimator and focused on the through hole, passes through said through hole and impinges on the other one of said two collimators, is reflected back in itself by the latter and directed to the deflecting mirror, by which it is deflected again. This allows to provide a device for decreasing or increasing the beam cross-section, in particular of parallel beams, which device simultaneously also has desired longitudinal chromatic aberration characteristics.

The further collimator may be further embodied in the same manner as the first collimator in the above-described preferred embodiments of the optical system according to the invention.

The optical system may be provided as a laser-scanning microscope or as a fluorescence correlation spectroscopy, with the collimator being arranged in the excitation beam path and/or in the detection beam path.

The invention will be explained in more detail below, by way of example, with reference to the drawings, wherein:

- Fig. 1 shows a schematic view of an embodiment of the optical system according to the invention;
- Fig. 2 shows a diagram illustrating the chromatic longitudinal aberration of the collimator of the optical system of Fig. 1;
- Fig. 3 shows a diagram illustrating the chromatic longitudinal aberration of the entire optical system of Fig. 1;
- Fig. 4 shows a collimator according to a second embodiment;
- Fig. 5 shows a diagram from which the lens and mirror positions to be adjusted for the desired chromatic longitudinal aberration characteristic are evident;
- Fig. 6 shows a collimator according to a further embodiment;
- Fig. 7 shows a diagram from which the adjustable lens positions of the collimator of Fig. 6 as a function of the desired chromatic longitudinal aberration characteristic are evident, and
- Fig. 8 shows a further embodiment of the optical system according to the invention.

In the embodiment shown in Fig. 1, the optical system according to the invention is provided as a laser-scanning microscope, which comprises a collimator 1 including a single lens L having a concave side 2 and a convex side 3, said convex side 3 being silvered so as to form a rear surface mirror 4 thereon.

The laser-scanning microscope further includes a light source 5, which comprises a light-source unit 6 and a single-mode fiber 7, wherein the light from the light-source unit 6 is coupled into the single-mode fiber 7 through one end thereof and coupled out at the other end 9. Thus, the end 9 forms a point light source and is arranged behind a deflecting mirror 10 in a manner allowing said end to emit the light directly into a through hole 11 of the deflecting mirror 10. Of course, at the location where the light exits the fiber, there may be, for example, the focal point of focusing optics (not shown).

The laser-scanning microscope further includes a main color splitter 12, a deflecting unit 13, the two deflecting mirrors 14 and 15 as well as scanning optics 16, and microscope optics 17, which comprise a tube lens 18 and an objective 19. Instead of the two deflecting mirrors 14 and 15, the deflecting unit 13 may, of course, include only one single deflecting mirror (not shown), which is pivotable about two axes, for example.

- 6 -

During operation, a diverging illumination beam 20 exits from the end 9 of the fiber 7, with the main ray of the diverging illumination beam 20 coinciding with the optical axis OA of the collimator (or of the collimation optics, respectively) 1 and impinging on the collimation optics 1, which transform the illumination beam 20 into a parallel beam 21, which impinges on the deflecting mirror 10 and is reflected by the latter to the main color splitter 12, as indicated by the arrow P1. In a known manner, the parallel beam 21 is then focused and moved, by means of the main color splitter 12, the deflecting unit 13 and the microscope optics 17, onto the object OB to be examined, in order to excite fluorescence, for example. The fluorescent light passes through the microscope optics 17, the deflecting unit 13 and is then directed into a detection beam path by the main color splitter 12, as indicated by the arrow P2. In the detection beam path, the fluorescent light is analyzed in a known manner.

The collimation optics 1 are designed such that their chromatic longitudinal aberration for the light of the light source 5 reduces the chromatic longitudinal aberration of the microscope optics 17. The light of the light source 5 may be, for example, light having a wavelength of  $565 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$ . In this case, the collimation optics 1 for this wavelength region are designed such that the chromatic longitudinal aberration of the microscope optics 17 in this wavelength region is reduced.

Fig. 2 shows the longitudinal chromatic aberration characteristic of five variants of the collimation optic 1 according to the invention. Along the abscissa, the wavelength  $\lambda$  is represented in nm, and along the ordinate, the longitudinal chromatic aberration  $a_{02}(\lambda)$  is shown as a wave surface deformation in parts of  $\lambda$ , wherein  $s(\lambda) = 1.1 * \lambda * a_{02}(\lambda)/nA^2$  allows to calculate the physical focal intercept.  $\Delta s = s(\lambda) - s(546 \text{ nm})$  describes a focal intercept difference for the wavelength  $\lambda$ , and nA is the numerical aperture, which is defined here as

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{dEP}{f}$$

(dEP being the diameter of the entrance pupil, which is  $dEP = 3.2 \text{ mm}$  here, and f

being the focal length of the collimator). The value of  $a_{02}(\lambda)$  for  $\lambda = 350 \text{ nm}$  is, in this case, simply referred to as  $a_{02}$  and serves as a parameter for distinguishing different longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator.

The line  $a_{02} = -2$  shows the longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator 1 of Fig. 1, which is provided as a rear surface-silvered single lens having the following parameters:

Radius of curvature of the concave front surface 2: 54.13 mm

Radius of curvature of the convex rear surface 3: 42.34 mm

Thickness D2 of the lens: 3.71 mm

Distance D1 of the front surface 2 from the point light source: 17.14 mm

- 7 -

Material parameter:  $n_e = 1.58481$ ,  $v_e = 40.57$

Focal length  $f$ : 20 mm

The longitudinal chromatic aberration characteristics of the microscope optics 17 (curve  $a_{02} = 0$ ) alone and in combination with the collimator 1 (curve  $a_{02} = -2$ ) are shown in Fig. 3, wherein, again, the wavelength  $\lambda$  is shown in nm along the abscissa and the longitudinal chromatic aberration  $a_{02}(\lambda)$  is shown in mm along the ordinate.

As is evident from the comparison of curves  $a_{02} = 0$  and  $a_{02} = -2$  in Fig. 3, the longitudinal chromatic aberration of the microscope optics 17 decreases monotonically in the region of greater than 550 nm (curve  $a_{02} = 0$  in Fig. 3) and can therefore be excellently compensated for (curve  $a_{02} = -2$  in Fig. 3) by the opposed longitudinal chromatic aberration of the collimator 1 (curve  $a_{02} = -2$  in Fig. 2). The longitudinal chromatic aberration in the region of from 550 to 600 nm is practically 0 and, thus, almost completely eliminated. Therefore, the laser-scanning microscope is achromatized in this wavelength region on the excitation side. Further, the longitudinal chromatic aberration in the region of from 600 to 650 nm is, at maximum, only half as great as compared to the longitudinal chromatic aberration characteristic of the microscope optics 17 alone (curve  $a_{02} = 0$ ).

In Fig. 2, the longitudinal chromatic aberration characteristics of modifications of the collimator according to Fig. 1 are shown, but the basic structure as a rear surface-silvered, concave-convex single lens is maintained and also the same lens material is used. Merely the radiuses of curvature as well as the lens thickness and the distance  $D1$  are varied.

The following Table shows the corresponding radiuses of curvature and distances, with the focal length  $f$  of the collimator 1 of Fig. 1 as well as that of the modifications according to the following Table being 20 mm each.

Curve $a_{02} =$	Radius of curvature Front surface 2 [mm]	Radius of curvature Rear surface 3 [mm]	D2 [mm]	D1 [mm]
-6	177.95	56.89	3.74	17.66
0	40.21	42.34	3.71	17.74
+2	31.98	39.31	4.00	17.59
+6	22.66	34.29	4.05	17.60

As is clearly evident from the illustration in Fig. 2, the longitudinal chromatic aberration characteristic can thus be set from monotonically decreasing, as the wavelength increases ( $a_{02} = 6$  or  $2$ ), via independent from the wavelength ( $a_{02} = 0$ ), to monotonically increasing, as the wavelength increases ( $a_{02} = -6$  or  $-2$ ), by simply selecting the radiuses of curvature and the distances, or by changing the geometrical dimensions, respectively, without changing the material. This allows the desired optimal correction of the microscope optics 17 to be set for the corresponding case of application (i.e. for the corresponding wavelengths).

Fig. 3 also shows the longitudinal chromatic aberration characteristic of the microscope optics 17 in combination with a collimator 1 as being  $a_{02} = 2$ . In this case, an excellent reduction of the longitudinal chromatic aberration in the wavelength region of from 450 – 550 nm is achieved.

The collimator 1 of Fig. 1 as well as the modifications shown in Fig. 2 all satisfy the following condition:

$$\left| \frac{1}{R2} - (a_{02} * (b2/f^2 + b1/f + b0) + c2/f^2 + c1/f + c0) \right| < 0.0003$$

$R2$  is the radius of curvature of the rear surface 3 and  $f$  is the focal length of the collimator 1; and the constants  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  have the following values:

$b_0 = -0.0010395$	$c_0 = 0.00068469$
$b_1 = -0.003737$	$c_1 = -0.570058$
$b_2 = 0.0844626$	$c_2 = 1.679172$

The above condition allows  $R2$  and thus the radius of curvature of the mirror 4 to be defined. The collimator may be designed to have different focal lengths. Focal lengths may be set which satisfy the following inequality:  $0.002 < 1/f < 0.1$ .

The above condition can be derived from the numerical analysis of the designed collimator or optical system, respectively, as a function of predetermined marginal conditions (e.g. focal length of the collimator, lens material, ...).

It is further possible, in the optical system according to the invention, to change the distance  $D1$ . This may be effected, in particular, by moving the collimation optics 1 along the optical axis  $OA$ . In the diagram of Fig. 2, an increase in the distance  $D1$  results in a displacement of the corresponding curve along the ordinate, toward lower values. Accordingly, a decrease in the distance  $D1$  leads to an upward displacement of the curve.

It is also possible, of course, to provide the mirror 4 as a separate mirror. The collimation optics 1 may also comprise a grating, which is provided, for example, on the front surface 2, the rear surface 3 or on the mirror surface 4.

In the optical system according to the invention, if the supplied light contains different wavelength regions (e.g. 500 nm  $\pm$  15 nm and 430 nm  $\pm$  15 nm), the collimator optics 1 may be provided such that their longitudinal chromatic aberration with respect to both wavelength regions compensates or at least reduces the corresponding longitudinal chromatic aberration of the microscope optics.

Fig. 4 shows a further modification of the collimator 1. In this embodiment, the collimator 1 comprises two concave-convex lenses 20, 21 as well as a concave mirror 23. The lenses 20 and 21 as well as the mirror 23 are movable along the optical axis such that their distances are variable. For example, for a constant focal length  $f$  of the collimator 1 in Fig. 4, this allows the longitudinal chromatic aberration of the optical system (i.e. of the microscope optics 17 and the collimator 1) to be tuned continuously from under-compensated (the longitudinal chromatic aberration of the microscope optics 17 is not fully compensated) to over-compensated (the longitudinal chromatic aberration of the collimator 1 is so great that, although the longitudinal chromatic aberration of the microscope optics 17 is compensated, the optical system now has a longitudinal chromatic aberration caused by the collimator 1).

In the embodiment of Fig. 4, the lenses 20 and 21 are made from the same material and have an Abbe dispersion number of 36.16. The distance from the entrance pupil of the collimator 1 to the concave side of the lens 20 is  $D_1$ ; the distance between the two sides of the lenses 20 and 21 facing each other is  $D_2$ , and the distance from the convex side of the lens 21 to the mirror 23 is  $D_3$ . The thickness of the lenses 20 and 21 is  $D_4$  and  $D_5$ . The focal length  $f$  is 20 mm. In this case, the curvature of the mirror 23, the refractive power of the lenses 20 and 21, and the dynamics of movement (i.e. the variation of the distances  $D_1$ ,  $D_2$  and  $D_3$ ) may be described as follows as a function of the focal length of the system, wherein focusing and adjustment of the focal length is caused by selecting two of the three distances  $D_1$ ,  $D_2$  and  $D_3$ , and the longitudinal chromatic aberration characteristic may be defined by selecting the value of the third distance (in this case,  $D_3$ ):

$$\left| \frac{1}{R} + 0.4088/f + 0.0023 \right| < 0.001$$

$$\left| f + 0.0669 * f + 28.788 \right| < 0.05 * f$$

$$\left| f - 0.0271 * f - 57.22 \right| < 0.05 * f$$

- 10 -

$$|D3(\Delta s(=0)) - D3(\Delta s(<0)) - 0.4179 * f + 1.4475| < 0.02 * f$$

$$|D3(\Delta s(>0)) - D3(\Delta s(<0)) - 0.731 * f - 2.867| < 0.02 * f$$

R is the radius of curvature of the mirror 23, and f1 as well as f2 are the focal lengths of the lenses 20 and 21, respectively.  $\Delta s(<0)$  represents  $\Delta s$  having a value of less than 0.  $\Delta s(=0)$  represents  $\Delta s$  having a value of 0, and  $\Delta s(>0)$  represents  $\Delta s$  having a value of greater than 0. In the embodiment described herein,  $\Delta s(<0)$  reaches a value  $a02$  of about  $-3.5$  and  $\Delta s(>0)$  reaches a value  $a02$  of about  $+3.5$ .

The exact parameters of the collimator 1 of Fig. 4 are as follows:

Radius of curvature of the concave surface F1: 13.10

Radius of curvature of the convex surface F2: 48.39

Radius of curvature of the concave surface F3: 18.44

Radius of curvature of the convex surface F4: 12.78

Radius of curvature of the concave mirror 23: 43.99

D4 = 2.00

D5 = 2.00.

	$\Delta s(<0)$	$\Delta s(=0)$	$\Delta s(>0)$
D1	14.05	6.93	3.12
D2	4.83	3.12	0.55
D3	0.50	7.68	16.57

The above Table indicates special values for  $\Delta s$ . Fig. 5 graphically illustrates the dependence of the longitudinal chromatic aberration characteristic of the distances D1, D2 and D3 such that the value of  $a02$  is indicated along the abscissa and the value of the corresponding distance is indicated in mm along the ordinate. Each individual value of the parameter  $a02$  in turn has longitudinal chromatic aberration characteristics associated to it, which are not shown here, but qualitatively correspond to those represented in Fig. 2. Thus, the distances D1-D3 to be set may then be taken from the representation of Fig. 5 as a function of the desired longitudinal chromatic aberration characteristic. The corresponding distances for the values of  $a02$  of  $-3.5$ ,  $3.5$  and  $0$  are indicated in the above Table.

The collimator 4 may be designed for focal lengths  $f$  which satisfy the following inequality:  $0.002 < 1/f < 0.1$ . The Abbe dispersion numbers of the lenses 20 and 21 are preferably less than 60, more preferably less than 40. On the whole, the collimator 1 of Fig. 4 comprises a lens 20



having negative refractive power and a low Abbe dispersion number, a lens 21 having positive refractive power and also a low Abbe dispersion number, as well as a mirror 23 having positive refractive power. By adjusting the distances D1-D3, the desired longitudinal chromatic aberration characteristic may be set and changed, while the focal length of the total system remains constant.

In particular, the collimator 1 of Fig. 4 may also comprise adjusting elements for the lenses 20 and 21 and for the mirror 23, so that the change in the longitudinal chromatic aberration characteristic can be automatically effected.

Fig. 6 shows a collimator 1 which comprises a lens 24 having positive refractive power, a lens 25 having negative refractive power, and a mirror lens 26 having positive refractive power. The lenses each have a low Abbe dispersion number of, for example, less than 60, preferably less than 40. In the specific embodiment described herein, the Abbe dispersion number is 36.16. The collimator in Fig. 6 is also designed in a manner allowing the longitudinal chromatic aberration to be continuously tuned from over-corrected to under-corrected for a constant focal length of the total system. The distance from the entrance pupil to the surface F5 of the lens 25 is D1, the distance between the surfaces F6 and F7 of the lenses 24 and 25 facing each other is D2, and the distances between the surfaces F8 and F9 of the lenses 25 and 26 is D3. The lenses 24, 25 and 26 respectively have thicknesses D4, D5 and D6.

The collimator of Fig. 6 is designed such that the following conditions are satisfied:

$$|1/R6 + 0.3143/f + 0.0088| < 0.001$$

$$|f1 - 0.1175 * f - 45.775| < 0.1 * f$$

$$|f2 + 0.0133 * f + 14.621| < 0.1 * f$$

$$|f3 - 0.0286 * f - 9.6999| < 0.1 * f$$

$$|D2(\Delta s(=0)) - D2(\Delta s(<0)) - 0.0004 * f^2 + 0.2172 * f - 1.6243| < 0.01 * f$$

$$|D2(\Delta s(>0)) - D2(\Delta s(<0)) - 0.0011 * f^2 + 0.4239 * f - 2.7441| < 0.01 * f$$

In this embodiment, too,  $\Delta s(<0)$  reaches a value  $a_{02}$  of about  $-3.5$  and  $\Delta s(>0)$  reaches a value  $a_{02}$  of about  $3.5$ . The exact curvatures of the lens surfaces are as follows:

Radius of curvature of the convex surface F5: 71.76 mm,

Radius of curvature of the concave surface F6: 51.07 mm,

- 12 -

Radius of curvature of the concave surface F7: 8.90 mm,  
 Radius of curvature of the concave surface F8: 254.88 mm,  
 Radius of curvature of the convex surface F9: 49.08 mm,  
 Radius of curvature of the convex surface F10: 40.94 mm,  
 D4 = 2.00  
 D5 = 5.52 and  
 D6 = 4.00.

	$\Delta s(<0)$	$\Delta s(=0)$	$\Delta s(>0)$
D1	4.50	8.91	12.95
D2	5.51	3.10	0.61
D3	2.22	1.51	0.88

The dependence of the longitudinal chromatic aberration characteristic on the individual distances D1-D3 is shown in the graphical representation of Fig. 7, said representation corresponding to that of Fig. 5. The representation of Fig. 7 allows the distances D1-D3 to be determined for a desired longitudinal chromatic aberration  $a_{02}$ .

It is particularly advantageous in the described embodiments that all curved lens or mirror surfaces, respectively, can be provided as spherical surfaces.

The conditions indicated for the embodiments of Figs. 4 and 6 can be derived by a person skilled in the art from numerical analysis of calculations of the optical properties of the respective collimators.

The light path in the above collimators is reversible such that a diverging beam emitted from the focal plane (in this case, the through hole 11 in the deflecting mirror 10, for example) is transformed into a parallel beam by the collimator, and a parallel beam is converted into a converging beam which is focused into the focal plane.

Fig. 8 shows an alternative embodiment of the optical system according to the invention, wherein two collimators 1 and 28 are coupled in series via a deflecting mirror 10 such that they act as a device for expanding or reducing the beam cross-section of a parallel beam. For this purpose, the first collimator 1 is provided, for example, in the same manner as in the embodiment of Fig. 1, and the mirror 10 is again provided with a through hole 11, both sides of the mirror 10 being silvered in this case.

Arranged following the mirror 10 (i.e. above the mirror in the representation of Fig. 8), there is the second collimator 28 comprising a second lens 29 whose rear surface is silvered and is provided with a curved mirror surface 30. The distances of the two lenses L and 29 from the deflecting mirror as well as the dimensions of the lenses L, 29 are selected such that a parallel beam 31, which propagates along the direction of the arrow P3, is deflected downwards by the deflecting mirror 10, toward the lens L. After reflection of the beam 31 by the collimator 1, said beam is converted into a converging beam 32, which is focused onto the through hole 11 (i.e. the beam 32 has its smallest beam cross-section in the vicinity of the through hole 11).

After the mirror 10, the beam 32, having passed through the through hole 11, is then a diverging beam being reflected back in itself by the collimator 28 and thus being converted into a parallel beam 33, which impinges on the mirror 10 and is deflected by the latter to the right (in the direction of the arrow P4). In this case, the propagation directions P3 and P4 coincide in such a manner that the main rays of the beams 31 and 33 are located on a common axis. The beam 33 differs from the beam 31 in that its beam cross-section is smaller. Thus, the optical system of Fig. 8 acts as a device for reducing the beam cross-section and, of course, it is also possible to pass through the device in the opposite direction, in which case said device is then a beam expander.

The two collimators 1 and 28 may, of course, be improved or embodied as described in connection with Figs. 1 to 7. In particular, the lenses L and 29 may be formed from the same material.

### Claims

1. An optical system, in particular a microscope, comprising an optical unit (17) and a collimator (1), which collimator is arranged preceding or following the optical unit (17) in a beam path of the optical system, said optical unit (17) imposing a predetermined longitudinal chromatic aberration on a beam supplied to said beam path and said beam impinging on the collimator (1) as a diverging beam or a parallel beam and being converted by said collimator into a parallel beam or a converging beam, with the collimator (1) comprising at least one lens (L) as well as a curved mirror (4) which folds the beam path such that the supplied beam passes twice through the lens (4).
2. The optical system as claimed in Claim 1, wherein the longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator (1) is designed such that the longitudinal chromatic aberration imposed on the beam by the optical unit (17) remains unchanged or is reduced.
3. The optical system as claimed in Claim 1 or 2, wherein the mirror (4) is provided as a rear-surface mirror on one side of the lens (L).
4. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the collimator (1) comprises the lens (L) as the only lens and the mirror (4) as the only mirror.
5. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein both sides (2, 3) of the lens (L) are provided as spherical surfaces.
6. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the beam (20) impinges on the collimator (1) such that the main ray of the beam (20) coincides with the optical axis (OA) of the collimator (1).

7. The optical system as claimed in Claim 6, wherein a deflecting mirror (10) comprising a through hole (11) is arranged preceding or following the collimator (1) in the beam path, wherein said beam (20), if it is a diverging beam, passes through the through hole (11) and impinges on the collimator (1), and the parallel beam (21) coming from the collimator is deflected by the deflecting mirror (10), and wherein the beam, if it is a parallel beam, is deflected by the deflecting mirror (10) to the collimator (1) and impinges on the collimator, and the converging beam coming from the collimator passes through the through hole (11).

8. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the collimator (1) is provided as a first exchangeable collimator, which may be replaced with a second collimator, said second collimator having a longitudinal chromatic aberration characteristic for a different wavelength region than the first collimator such that, for the other wavelength region, the longitudinal chromatic aberration imposed by the optical unit (17) remains unchanged or is reduced.

9. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the collimator (1) comprises the mirror (23; 27) as well as two or three lenses (20, 21; 24, 25, 26), and the lenses (20, 21; 24, 25, 26) as well as the mirror (23; 27) are displaceable along the optical axis (OA) of the collimator (1) so as to allow adjustment of a desired longitudinal chromatic aberration characteristic of the collimator (1).

10. The optical system as claimed in Claim 9, wherein all lenses (20, 21; 24, 25, 26) are produced from the same material.

11. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the optical unit itself is provided as a further collimator (28), comprising at least a second lens (29) and a second curved mirror (30), the latter folding the beam path such that the supplied beam passes twice through the second lens (29).

12. The optical system as claimed in any one of the above Claims, wherein the optical system is a laser-scanning microscope or a fluorescence correlation spectroscopy and the collimator is used in the excitation beam path and/or detection beam path.

**Abstract**

An optical system, in particular a microscope, is provided, comprising an optical unit (17) and a collimator (1), which collimator is arranged preceding or following the optical unit (17) in a beam path of the optical system, said optical unit (17) imposing a predetermined longitudinal chromatic aberration on a beam supplied to said beam path and said beam impinging on the collimator (1) as a diverging beam or a parallel beam and being converted by said collimator into a parallel beam or a converging beam, with the collimator (1) comprising at least one lens (L) as well as a curved mirror (4) which folds the beam path such that the supplied beam passes twice through the lens (4).

(Fig. 1)

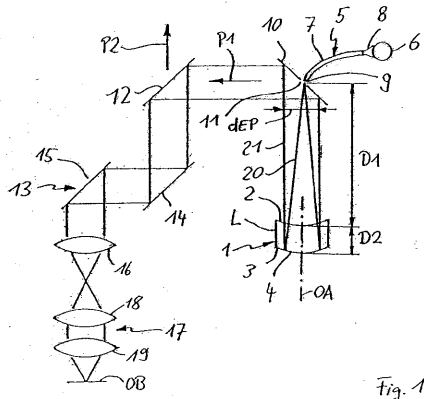


Fig. 1

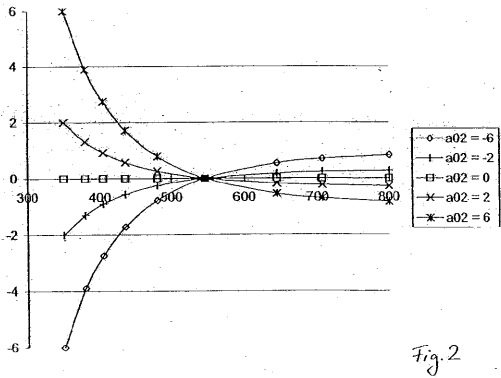


Fig. 2

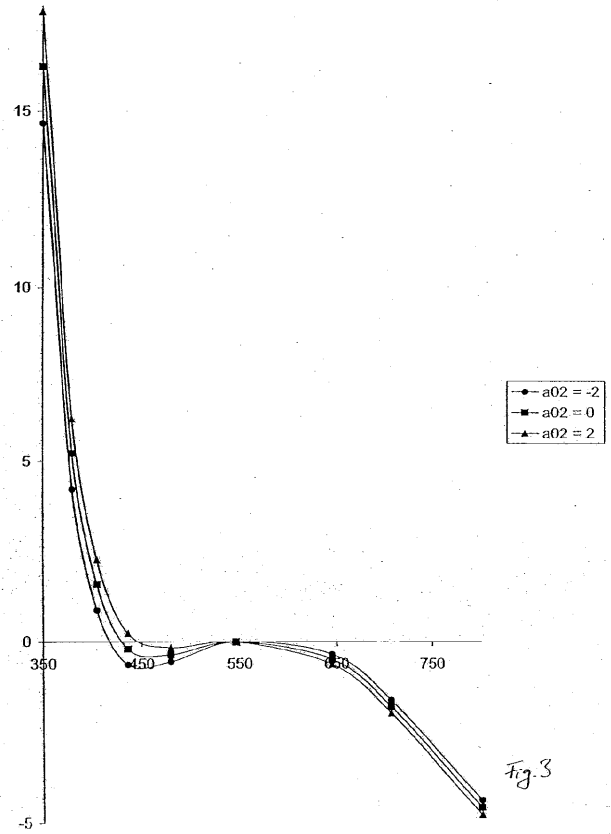


Fig. 3

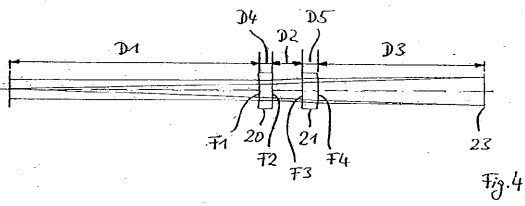


Fig. 4

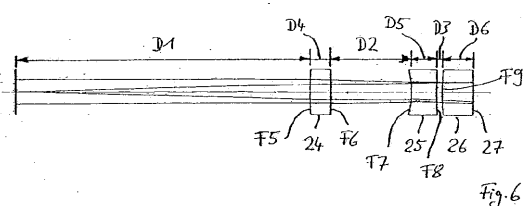


Fig. 6

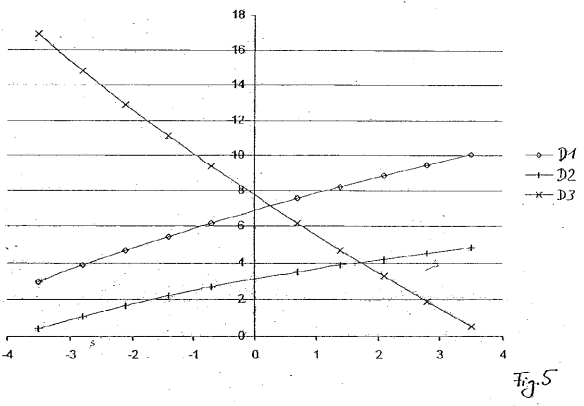


Fig. 5

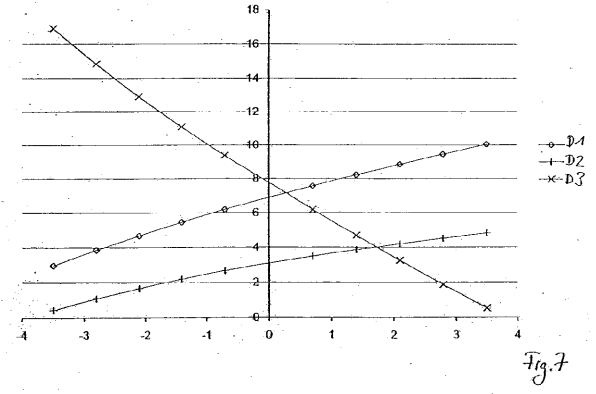


Fig. 7

