

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 205950

ЦИФРОВОЙ МИКРОСКОП СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Беззубик Виталий Вениаминович (RU), Белашенков Николай Романович (RU), Рудин Ярослав Вадимович (RU)*

Заявка № 2020138773

Приоритет полезной модели 24 ноября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 12 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 24 ноября 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G02B 21/06 (2021.02); G02B 21/36 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020138773, 24.11.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.11.2020

Дата регистрации:
12.08.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.11.2020

(45) Опубликовано: 12.08.2021 Бюл. № 23

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,
49, лит. А, Университет ИТМО, ОИС

(72) Автор(ы):

Беззубик Виталий Вениаминович (RU),
Белашенков Николай Романович (RU),
Рудин Ярослав Вадимович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский университет ИТМО"
(Университет ИТМО) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: US 10228550 B2, 12.03.2019. RU
200144 U1, 08.10.2020. US 20140126049 A1,
08.05.2014. CN 105324698 B, 02.07.2019.

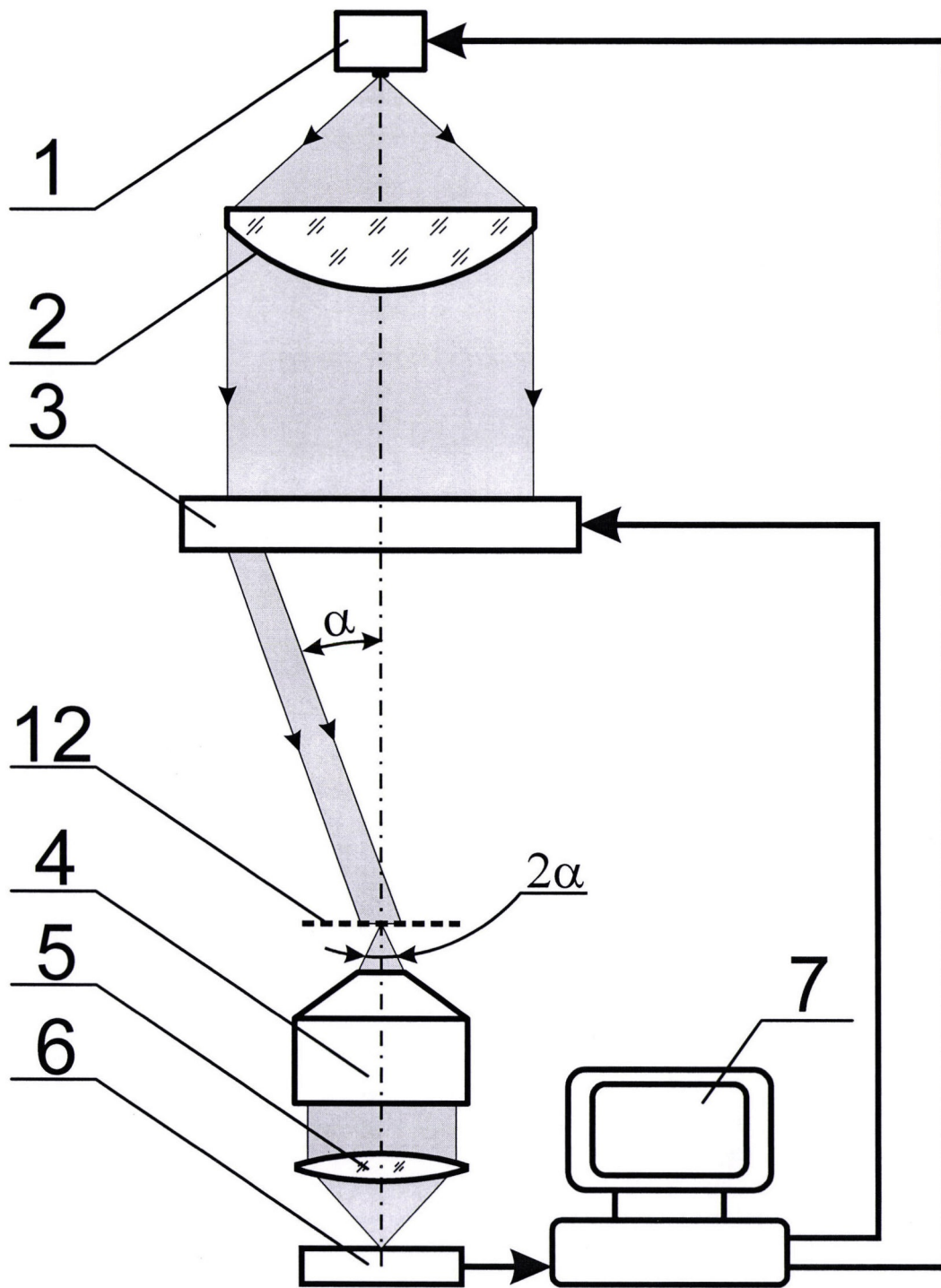
(54) ЦИФРОВОЙ МИКРОСКОП СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к оптической технике, в частности к микроскопии, и может быть использована при получении цифровых изображений микрообъектов со сверхразрешением методом Фурье-птихографии. Цифровой микроскоп со сверхразрешением включает расположенные последовательно вдоль оптической оси линзу, микрообъектив и матричный фотоприемник изображения, а также светодиод, размещенный на оптической оси в передней фокальной плоскости линзы. Между линзой и микрообъективом установлен управляемый селектор-дефлектор, обеспечивающий возможность пространственного выделения части формируемого линзой светового пучка излучения светодиода и отклонения этой части пучка к

оптической оси в плоскость установки исследуемого объекта с разных направлений под углом, равным апертурному углу микрообъектива. Указанный управляемый селектор-дефлектор может быть выполнен в виде установленного с возможностью управляемого вращения вокруг оптической оси непрозрачного диска, имеющего смещенное относительно оси вращения отверстие, сопряженное с оптическим клином, установленным таким образом, что его утолщенная часть обращена в сторону оптической оси, а угол оптического клина δ связан с апертурным углом микрообъектива α следующим соотношением:

$\delta = \alpha / (n - 1)$, где n - показатель преломления оптического материала клина.



ФИГ. 1

Полезная модель относится к оптической технике, в частности к микроскопии, и может быть использована при получении цифровых изображений микрообъектов со сверхразрешением методом Фурье-птихографии. В основе этого метода лежит использование поочередного освещения помещенного на предметный столик микроскопа объекта под разными углами и фиксации этих изображений фотоприемником. Затем полученные изображения с низким пространственным разрешением объединяют по специальному алгоритму в один снимок с более высоким пространственным разрешением. В результате, например, работая с микрообъективом с малой числовой апертурой и имея соответствующее поле зрения, можно получить изображение объекта с разрешением, соответствующим микрообъективу с высокой числовой апертурой, без изменения поля зрения.

Известен цифровой микроскоп с лазерной системой подсветки объекта наблюдения (Патент США, US 10228550, опубл. 12.03.2019 «Laser-based Fourier Ptychographic imaging systems and methods»). Данное устройство реализует метод Фурье-птихографии при получении цифровых изображений со сверхвысоким пространственным разрешением и включает лазерную систему подсветки объекта наблюдения, микрообъектив, матричный фотоприемник, контроллер и дисплей для отображения результата наблюдения, причем лазерная система подсветки объекта наблюдения выполнена в виде лазерного источника, оптического сканера и совокупности зеркал, совместно обеспечивающих возможность освещения объекта наблюдения коллимированным излучением под разными углами относительно оптической оси микрообъектива.

Недостатком этого устройства является сложность механического управления лазерным лучом с обеспечением высокой точности его ориентации, а также наличие спекл-структуры в световом поле лазерного излучения, являющейся источником шумов при обработке изображений.

Известен цифровой микроскоп с изображающей системой, основанный на использовании метода мультиплексной Фурье-птихографии (Международная заявка WO 2016/0890331, опубл. 09.06.2016 (Multiplexed Fourier Ptychography imaging systems and methods)), включающий систему подсветки объекта наблюдения, микрообъектив, матричный фотоприемник, контроллер и дисплей для отображения результата наблюдения. В данном устройстве осветитель объекта выполнен в виде матрицы светодиодов, а цифровые изображения объекта получают путем последовательного освещения объекта наблюдения излучением нескольких светодиодов, образующих уникальные световые паттерны. Контроллер цифрового микроскопа обеспечивает управление светодиодами в матрице и обрабатывает получаемые с выхода матричного фотоприемника цифровые изображения. Таким образом, получают первый набор изображений с низким разрешением, относящийся к режиму подсветки наблюдаемого объекта несколькими паттернами. Далее формируют второй набор изображений с низким разрешением путем математической обработки первого набора с целью соотнесения каждого изображения с низким разрешением с индивидуальным светодиодом в матрице. Изображение со сверхразрешением получают в результате математической обработки изображений второго набора методом Фурье-птихографии. Данный микроскоп реализует такой сложный алгоритм с целью сокращения времени получения цифрового изображения объекта с высоким пространственным разрешением, однако, компромисс достигается за счет получения результирующих цифровых изображений с непрогнозируемым качеством, т.к. для достижения максимального качества каждый объект наблюдения требует, вообще говоря, индивидуального набора паттернов, который заранее неизвестен.

Качество изображения со сверхразрешением определяется рядом предъявляемых к осветителю технических требований: высокая точность позиционирования каждого из светодиодов в матрице, идентичность их спектральных и энергетических характеристик, достаточная мощность светового потока, достигающего фотоприемника и др.

Известен цифровой микроскоп со сверхразрешением (патент РФ №200144 опубл. 08.10.2020, Бюл. №28), включающий светодиодный осветитель исследуемого объекта, который содержит, по меньшей мере, три светодиода, микрообъектив, фотоприемник изображения и компьютер, включающий средства управления светодиодным осветителем, а также средства обработки и отображения цифрового изображения, расстояния между каждым светодиодом осветителя и двумя ближайшими к нему светодиодами равны, светодиоды в осветителе расположены на одинаковых расстояниях от центра входного зрачка микрообъектива и каждый из них снабжен коллиматорной линзой, установленной таким образом, что ее оптическая ось пересекает оптическую ось микрообъектива в его переднем фокусе под углом равным апертурному углу микрообъектива.

Наиболее близким к заявляемой полезной модели и выбранным за прототип является цифровой микроскоп со сверхразрешением, описанный в статье (Jiasong Sun, Chao Zuo, Jialin Zhang, Yao Fan & Qian Chen «High-speed Fourier ptychographic microscopy based on programmable annular illuminations» Scientific Reports. 2018. V. 8(7669). P. 1-12). Прототип включает осветитель, микрообъектив, матричный фотоприемник и программно-аппаратный модуль для реализации метода Фурье-птихографии. Осветитель прототипа выполнен в виде матрицы одинаковых светодиодов с коллимирующими микролинзами. Светодиоды в матрице ориентированы соосно друг другу и расположены в узлах прямоугольной координатной сетки. Осветитель дополнительно включает линзу, расположенную между матрицей светодиодов и микрообъективом.

Цифровые изображения со сверхразрешением в прототипе получают методом Фурье-птихографии путем последовательной регистрации ряда изображений с низким пространственным разрешением при освещении наблюдаемого объекта коллимированными световыми пучками, излучаемыми разными светодиодами матрицы, причем освещение объекта каждым светодиодом осуществляют под углом близким к апертурному углу микрообъектива, с последующим синтезом цифрового изображения со сверхразрешением путем математической обработки и преобразования Фурье-спектров изображений с низким пространственным разрешением. Качество цифрового изображения со сверхразрешением в прототипе определяется точностью сведения световых пучков светодиодов на наблюдаемом объекте после прохождения дополнительной линзы, расположенной между матрицей светодиодов и микрообъективом, совпадением их спектральных и энергетических характеристик, а также величиной разброса пространственных параметров волновых фронтов их пучков. Выбор угла сведения световых пучков близким к апертурному углу микрообъектива обеспечивает регистрацию набора изображений низкого разрешения близко к границе режима «светлого поля», что является компромиссом между степенью повышения пространственного разрешения микроскопа и качеством изображений низкого разрешения, обусловленных соотношением сигнал-шум и определяющих устойчивость и сходимость метода Фурье-птихографии.

Недостатком прототипа является низкое качество изображения со сверхразрешением, обусловленное разбросом углов, под которыми наблюдаемый объект освещают пучки светодиодов матрицы, и разбросом пространственных параметров волновых фронтов этих пучков. Первый фактор обусловлен особенностью расположения светодиодов

матрицы в узлах прямоугольной координатной сетки и наличием осевой симметрии дополнительной линзы, обеспечивающей сведение освещающих наблюдаемый объект световых пучков. Эта особенность делает принципиально невозможным точное равенство углов, под которыми разные светодиоды матрицы освещают наблюдаемый объект. Второй фактор связан с наличием коллимирующих микролинз, точнее с разбросом их аберраций, которые вносят различные и неконтролируемые искажения в волновые фронты световых пучков от разных светодиодов матрицы. Оба отмеченных фактора существенно влияют на результат обработки и преобразования Фурье-спектров изображений с низким пространственным разрешением и в конечном итоге определяют основной недостаток прототипа. Кроме того, наличие большого количества светодиодов с коллимирующими микролинзами в прототипе усложняет его конструкцию и повышает стоимость устройства.

Задачей, на решение которой направлена предлагаемая полезная модель, является повышение качества цифровых изображений при обеспечении максимального разрешения микроскопа и упрощении его конструкции.

Поставленная задача решается за счет достижения технического результата, заключающегося в оптимизации осветителя цифрового микроскопа и устранении факторов, снижающих качество цифровых изображений максимального разрешения в прототипе. А именно, в осветителе заявляемого устройства предлагается установить один светодиод без коллимирующей микролинзы непосредственно на оси дополнительной линзы, что соответствует ее осевой симметрии, а сведение освещающих наблюдаемый объект световых пучков под одинаковыми углами предлагается обеспечить за счет расположения между дополнительной линзой и микрообъективом управляемого селектора-дефлектора. Таким образом, волновой фронт светового пучка от единственного светодиода осветителя не имеет неконтролируемых фазовых искажений, т.к. этот светодиод не содержит коллиматорной микролинзы. Отсутствие других светодиодов дополнительно упрощает конструкцию микроскопа.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в цифровом микроскопе со сверхразрешением, включающем расположенные последовательно вдоль оптической оси линзу, микрообъектив и матричный фотоприемник изображения, а также светодиод, размещенный в передней фокальной плоскости линзы на ее оптической оси, между линзой и микрообъективом установлен управляемый селектор-дефлектор, обеспечивающий возможность пространственного выделения части формируемого линзой светового пучка излучения светодиода и отклонения этой части пучка к оптической оси в плоскость установки исследуемого объекта с разных направлений под углом равным апертурному углу микрообъектива. Указанный цифровой микроскоп со сверхразрешением включает также компьютер, обеспечивающий функции управления светодиодом и селектором-дефлектором, а также обработку цифровых изображений, получаемых с выхода матричного фотоприемника, и формирование из них цифрового изображения со сверхразрешением.

Кроме того селектор-дефлектор может быть выполнен в виде установленного с возможностью управляемого вращения вокруг оптической оси непрозрачного диска, имеющего смещенное относительно оси вращения отверстие, сопряженное с оптическим клином, расположенным таким образом, что его утолщенная часть обращена в сторону оптической оси, а угол оптического клина δ связан с апертурным углом микрообъектива α следующим соотношением:

$$\delta = \alpha / (n - 1),$$

где n - показатель преломления оптического материала клина.

Повышение качества цифрового изображения со сверхразрешением по сравнению с прототипом в заявляемой полезной модели определяется повышением точности соблюдения одинаковости условий освещения исследуемого объекта с различных направлений при формировании и регистрации цифровых изображений низкого разрешения. Повышение точности обеспечивается за счет применения одного светодиода причем без коллимирующей микролинзы, а также фактора осевой симметрии выделения части формируемого линзой параллельного светового пучка одним отверстием в непрозрачном диске и применением одного отклоняющего элемента (оптического клина) при совпадении оси вращения диска с оптической осью устройства. Такая схема осветителя микроскопа обеспечивает совпадение спектральных и энергетических характеристик, а также минимизирует величину разброса пространственных параметров волновых фронтов пучков, освещающих исследуемый объект под одним углом с различных направлений.

Сущность полезной модели поясняется чертежом. На фиг. 1 представлена схема предлагаемого устройства. На фиг. 2 изображен вид управляемого селектора-дефлектора.

Цифровой микроскоп со сверхразрешением включает светодиод 1 без коллиматорной микролинзы. Светодиод 1 расположен в переднем фокусе линзы 2 на ее оптической оси. Узел заявляемого устройства со сложным названием «управляемый селектор-дефлектор» 3 расположен на оптической оси между линзой 2 и микрообъективом 4. Матричный фотоприемник изображения 6 установлен на оптической оси за микрообъективом 4 и оптической системой 5. Компьютер 7 обеспечивает электрическое соединение с выходом матричного фотоприемника изображения 6, а также входами светодиода 1 и управляемого селектора-дефлектора 3.

В варианте наилучшей технической реализации заявляемого устройства управляемый селектор-дефлектор 3 выполнен в виде установленного с возможностью управляемого вращения вокруг оптической оси непрозрачного диска 8, имеющего смещенное относительно оси вращения отверстие 9, сопряженное с оптическим клином 10, расположенным таким образом, что его утолщенная часть обращена в сторону оптической оси. Управляемое вращение диска 8 обеспечено двигателем с управляемым приводом 11, например, через зубчатую передачу.

Заявляемое устройство работает следующим образом. Компьютер 6 включает светодиод 1. Светодиод 1, не снабженный коллиматорной микролинзой, испускает световое излучение в широком телесном угле. Это излучение падает на линзу 2. Ввиду того, что светодиод 1 установлен на оптической оси линзы 2 в ее переднем фокусе, излучение светодиода 1 после прохождения линзы 2 представляет собой широкий параллельный световой пучок. Это пучок поступает на вход управляемого селектора-дефлектора 3. Данный узел цифрового микроскопа осуществляет пространственную селекцию части поступающего на его вход светового излучения. Непрозрачный диск 8 не пропускает (поглощает или отражает) световое излучение за исключением той его части, которая падает на отверстие 9, выполненное в непрозрачном диске 8. Этот диск 8 кинематически связан с управляемым от компьютера 7 приводом 11, который обеспечивает возможность вращения диска 8 вокруг оптической оси, а упомянутое выше отверстие 9 в диске 8 смещено относительно оси вращения диска 8. Часть параллельного светового пучка проходит через отверстие 9 и поступает на вход оптического клина 10, расположенного таким образом, что его утолщенная часть обращена в сторону оптической оси. Указанное расположение оптического клина 10 обеспечивает отклонение упомянутой выше части параллельного светового пучка в

направлении оптической оси. Угол отклонения α определяется углом θ оптического клина 10 и показателем преломления оптического материала, из которого он изготовлен. Отклоненный оптическим клином 10 параллельный световой пучок освещает плоскость установки исследуемого объекта 12. Оптическая система 5, расположенная между микрообъективом 4 и матричным фотоприемником изображения 6, обеспечивает формирование изображения исследуемого объекта, расположенного перед микрообъективом 4 в его передней фокальной плоскости 12 и освещаемого отклоненным оптическим клином 10 параллельным световым пучком, на приемной площадке матричного фотоприемника изображения 6. После регистрации изображения исследуемого объекта компьютер 7 выключает светодиод 1, подает команду на управляемый привод 11, который поворачивает диск 8 вокруг оптической оси и устанавливает отверстие 9 в новое положение. Далее повторяется процедура регистрации нового изображения исследуемого объекта, освещаемого параллельным световым пучком под тем же углом α , но с другого направления. Полученный таким образом ряд изображений с низким пространственным разрешением при освещении исследуемого объекта коллимированными световыми пучками с разных направлений под одним и тем же углом является основой для получения цифровых изображений со сверхразрешением методом Фурье-психографии.

(57) Формула полезной модели

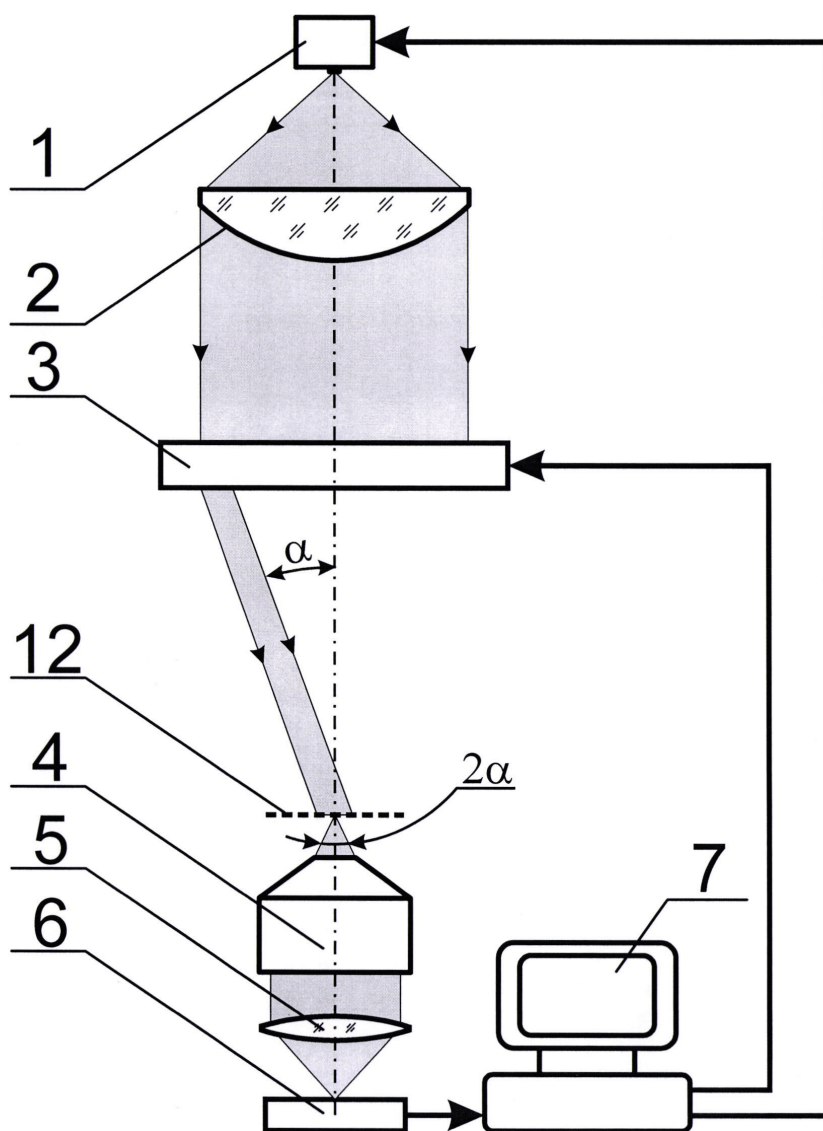
1. Цифровой микроскоп со сверхразрешением, включающий расположенные последовательно вдоль оптической оси линзу, микрообъектив и матричный фотоприемник изображения, а также светодиод, размещенный в передней фокальной плоскости линзы, отличающийся тем, что светодиод расположен на оптической оси, а между линзой и микрообъективом установлен управляемый селектор-дефлектор, обеспечивающий возможность пространственного выделения части формируемого линзой светового пучка излучения светодиода и отклонения этой части пучка к оптической оси в плоскость установки исследуемого объекта с разных направлений под углом, равным апертурному углу микрообъектива.

2. Цифровой микроскоп со сверхразрешением по п. 1, отличающийся тем, что управляемый селектор-дефлектор выполнен в виде установленного с возможностью управляемого вращения вокруг оптической оси непрозрачного диска, имеющего смещенное относительно оси вращения отверстие, сопряженное с оптическим клином, расположенным таким образом, что его утолщенная часть обращена в сторону оптической оси, а угол оптического клина δ связан с апертурным углом микрообъектива α следующим соотношением:

$$\delta = \alpha / (n - 1),$$

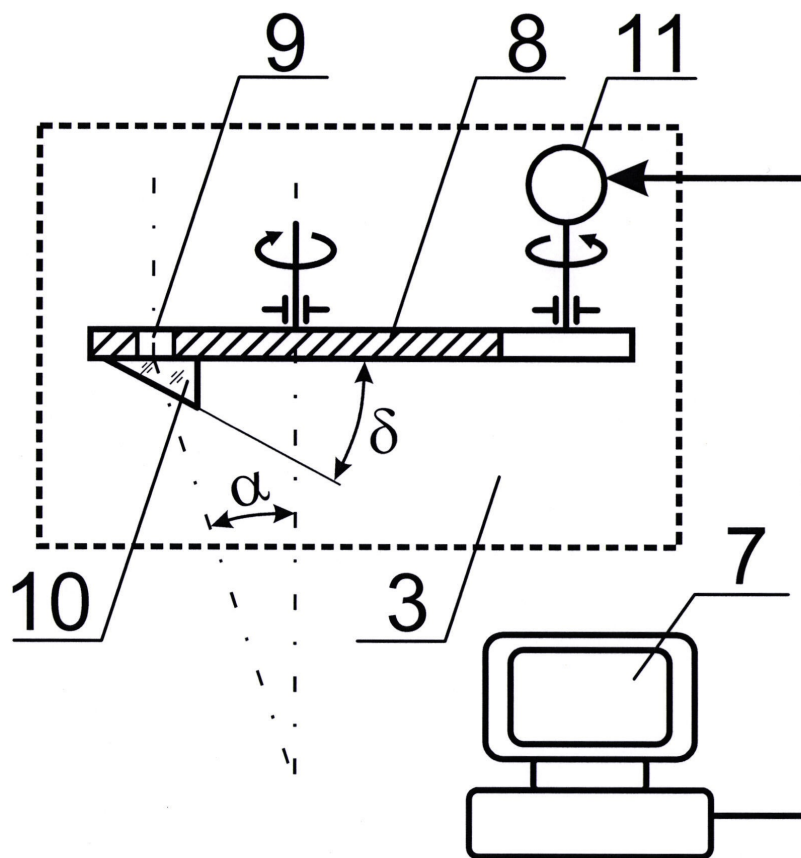
где n - показатель преломления оптического материала клина.

1



ФИГ. 1

2



ФИГ. 2