

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ

Е. В. Леун 

АО «НПО Лавочкина», Россия, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

 stankin1999@mail.ru

Статья направлена на рассмотрение возможностей и поиска новых путей конструктивного совершенствования контактных измерительных головок для высокоточного 3D-контроля геометрических параметров сложных изделий на координатных измерительных машинах. Рассмотрены технические решения на основе оптических методов и средств измерений, в частности волоконно-оптических датчиков.

В статье обсуждаются два типа контактных измерительных головок с жестким и подвижным измерительным штоком. Рассматриваются особенности двух вариантов измерительных головок первого типа, реализованных на основе измерений микроизгибов измерительного штока посредством встроенных в него датчиков с волоконными брэгговскими решетками или волоконных интерферометрических датчиков. Также обсуждаются варианты второго типа измерительных головок с подвижным измерительным штоком и измерением его смещений при касании с контролируемой деталью на основе использования оптоволоконного сканера или трехкоординатного волоконного интерферометрического датчика.

Показано, что в последнем варианте порог чувствительности по трем осям потенциально может иметь субмикрометрические значения. Обсужден вариант встраивания миниатюрной широкоугольной видеокамеры Fisheye «Рыбий глаз» для визуализации приближения измерительного наконечника к контролируемой детали за счет регистрации и измерений геометрических параметров формируемых колец Ньютона.

Ключевые слова: координатная измерительная машина, измерительная головка, измерительный наконечник, измерительный шток, волоконный интерферометрический датчик, лазерный интерферометр, кольца Ньютона

Для цитирования: Леун Е. В. Физико-технические основы совершенствования контактных измерительных головок для координатных измерительных машин на основе волоконных датчиков. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 112–121. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-112-121>. EDN: FZSWXF.



© Леун Е. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PHYSICAL AND TECHNICAL PRINCIPLES OF IMPROVING CONTACT MEASURING HEADS FOR COORDINATE MEASURING MACHINES BASED ON FIBER SENSORS

Е. V. Leun 

Lavochkin Association, Leningradskaya St., 24, Khimki, 141402, Russia

 stankin1999@mail.ru

The article aims at considering the possibilities and finding new ways to constructively improve contact measuring heads for high-precision 3D control of geometric parameters of complex products on coordinate measuring machines. Technical solutions based on optical methods and measuring instruments, in particular, fiber-optic sensors are also considered.

The article discusses two types of contact measuring heads with rigid and movable measuring rods. The features of two variants of measuring heads of the first type are considered, implemented on the basis of measurements of micro bends of the measuring rod by means of sensors with fiber Bragg gratings or fiber interferometric sensors built into it. Options for the second type of measuring heads with a movable measuring rod and measuring its displacements when touching a controlled part based on the use of a fiber-optic scanner or a three-axis fiber interferometric sensor are also discussed.

It is shown that in the latter case, the sensitivity threshold along three axes can potentially have subpicometric values. The option of embedding a miniature wide-angle Fisheye video camera to visualize the approximation of the measuring tip to the controlled part by recording and measuring the geometric parameters of the formed Newton rings is discussed.

Keywords: coordinate measuring machine, measuring head, measuring tip, measuring rod, fiber interferometric sensor, laser interferometer, Newton rings

For citation: Leun E. V. Physical and technical principles of improving contact measuring heads for coordinate measuring machines based on fiber sensors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):112–121. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-112-121>. EDN: FZSWXF. (In Russ.).



© Leun E. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Достижение технологического суверенитета России за счет импортозамещения в машино-, станко- и приборостроении, обеспечивающих успешное развитие ракетно-космической техники, проблематично без высокоточного 3D-контроля геометрических параметров изделий. Такой контроль в основном реализуется координатными измерительными машинами (КИМ), одним из основных элементов которых являются контактные (ощупывающие, тактильные) измерительные головки (в дальнейшем — ИГ). Несмотря на применение оптических систем для бесконтактного 3D-контроля размеров изделий, развитие ИГ по-прежнему является актуальной задачей¹ [1–7].

Традиционно контактные ИГ совершенствовались в части схем формирования и преобразования оптических или электрических сигналов, создаваемых при касании с деталью измерительного наконечника, установленного на штоке (рис. 1). Измерительный наконечник рассматривался как механическое передаточное звено, но уже в гибридной ИГ [7] измерительный наконечник, реализованный на основе высокопрочных и прозрачных корундов, является элементом оптической системы. Потенциал таких усовершенствований еще не полностью раскрыт.

Современные разработки высокоточной измерительной техники открывают новые возможности совершенствования ИГ. К настоящему времени достигнут прогресс в разных направлениях волоконной техники: в схематехнике и функциональных возможностях волоконных датчиков, в способах измерения удлинений оптических волокон при микроизгибах [8, 9], в круговом сканировании светом с помощью миниатюрных пьезоволоконных сканеров [10–14] и т. д. Кроме того, разрешающая способность лазерных интерферометров приблизилась к субмикрометрическим значениям [15–18], позволяя реализовать высокоточные волоконные интерферометрические датчики (ВИД) смещений. Все это создает задел для разработки новых ИГ.

Вопросы совершенствования ИГ на основе использования современных высокоточных лазерных и волоконно-оптических измерительных устройств в полной мере не были представлены в открытой печати и данная статья направлена на восполнение этого пробела.

ИГ с жестким измерительным штоком и встроенными в него волоконными датчиками измерений микроизгибов

В данном разделе рассмотрены особенности ИГ со встроенными в измерительный шток датчиками с волоконными брэгговскими решетками (ВБР) или ВИД. Проведена оценка порога чувствительности таких ИГ.

Конструкция и принцип действия контактной ИГ с жестким измерительным штоком и встроенными в него волоконными датчиками измерений микроизгибов

В данных ИГ вдоль измерительного штока установлены оптические волокна, выполняющие функцию элементов, чувствительных к микроизгибам, подобно тензорезисторам. Касание, прижатие измерительного наконечника с деталью приводит к его микросмещениям $\Delta l_{\text{см}}$ и микроизгибу измерительного штока (рис. 2а) и деформациям в виде удлинений соответствующих оптических волокон $\Delta l_{\text{ов}}$ с возможностью последующих измерений и формирования выходных сигналов.

Далее рассмотрены особенности измерений удлинений $\Delta l_{\text{ов}}$ от микроизгибов путем контроля сдвига центральной (резонансной) длины волны ВБР $\lambda_{\text{в}}$, а также напрямую при контроле длины измерительного канала интерферометра, включающего оптическое волокно.

На рис. 2б,в показаны варианты расположения волокон в виде четырех плеч (чувствительных участков, выделены разными цветами), формируя в поперечном сечении крестообразную структуру.

Каждое измерительное плечо состоит из двух «незамкнутых витков» волокон, уложенных «змейкой» в одной плоскости, чувствительных к изгибам

¹ Знакомьтесь: Blum. Обзор измерительных систем компании «Блюм». URL: <https://www.incore.ru/articles/osnastka-i-komplektuyushchie-/znakomtes-blum-obzor-izmeritelnykh-sistem-kompanii-blyum-/> (дата обращения: 09.04.2026).



Рис. 1. Измерение размеров деталей с помощью контактной ИГ [1]

Fig. 1. Measuring the dimensions of parts using a contact measuring head [1]

в одной плоскости. Внутренне свободное пространство измерительного штока залито компаундом, фиксирующим волокна.

В соответствии с такой конструкцией минимальный внешний диаметр измерительного штока $d_{шт1}$ будет определяться толщиной стенки $l_{ст}$, количеством витков волокон в плече n_v и толщиной волокна, с учетом его защитно-упрочняющего покрытия $d_{зуп}$:

$$d_{шт1} = 2l_{ст} + 2n_v d_{зуп}. \quad (1)$$

Можно использовать два витка с четырьмя участками волокна оптического одномодового радиационно стойкого с нелегированной сердцевинной, с материалом защитно-упрочняющего покрытия из меди SMSC125Cu (99,997 %) и алюминия SMSC125Al (99,999 %), имеющего внешний диаметр $d_{зуп} = 160$ мкм [12]. Тогда при толщине стенки $l_{ст} = 0,2$ мм минимальный внешний диаметр измерительного штока составит $d_{шт1} = 1,85$ мм, а измерительного наконечника — $d_{ин} = 2$ мм.

Контроль микроизгибов

измерительного штока датчиками с ВБР

В данных ИГ центральная (резонансная) длина волны ВБР $\lambda_{ов}$ зависит от эффективного показателя преломления сердцевинны световода и периода модуляции показателя преломления, которые, в свою очередь, зависят от внешней деформации волокна $\Delta l_{ов}$. Зависимость смещения центральной длины волны отражения $\Delta \lambda_{ов}$ от внешней деформации волокна $\Delta l_{ов}$ определяется выражением [7]:

$$\Delta \lambda_{ов} = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dl} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dl} \right) \Delta l_{ов}, \quad (2)$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления сердцевинны волокна для центральной длины волны; Λ — период брэгговской решётки.

Для измерений используется спектроанализатор, определяющий сдвиг длин волн $\Delta \lambda$. В настоящее время для стандартного одномодового оптического волокна при длине волны отражения ВБР ≈ 1550 нм расчётная чувствительность к деформации составляет 1,2 пм [8].

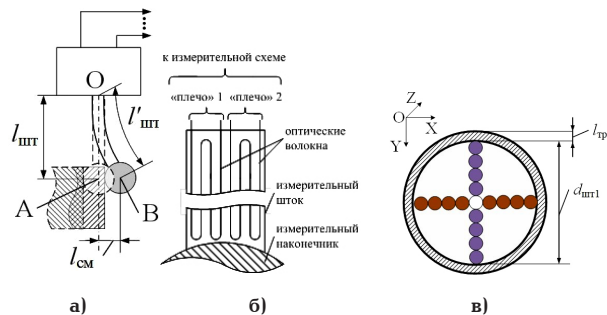


Рис. 2. Изгиб штока измерительной головки при касании с деталью (а) и ее эквивалентная схема (б); крестообразное расположение оптических волокон в измерительном штоке (в)

Fig. 2. Bending of the measuring head rod in contact with the part (a) and its equivalent circuit (б); the cross-shaped location of optical fibers in the measuring rod (в)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Контроль микроизгибов измерительного штока с ВИД

В основе ВИД лежит применение высокоточных лазерных интерферометров, в оптическом измерительном канале которого введено оптическое волокно, выполняющее функции чувствительного элемента или доставки оптического² излучения к объекту контроля и назад. Удлинения оптического волокна $\Delta l_{ов}$ приводят к фазовому сдвигу световых волн, определяемых для четырех плеч оптического волокна $\Delta l_{ов}$ выражением:

$$\Delta \varphi = 8\pi \frac{\Delta l_{ов}}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ — длина света.

Примерно к 2010 г. разрешающая способность лазерных интерферометров уже достигла субмикрометрических значений [10, 11], позволяя допустить достижение к настоящему времени порога чувствительности ВИД $\Delta l_{вид} = 0,4$ пм, используемое далее в расчетах.

Определение оценки порога чувствительности

Определить оценку порога чувствительности двух ИГ можно упрощенно, принимая геометрическую схему (рис. 2а), согласно которой треугольник ОАВ является прямоугольным, и из-за малых смещений $\Delta l_{см}$ гипотенузу [ОВ] можно соотнести изогнутому штоку $l'_{шт}$, записывая выражения:

— для абсолютного удлинения штока $\Delta l_{шт}$:

$$\Delta l_{шт} \approx l'_{шт} - l_{шт} = \sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2} - l_{шт}; \quad (4)$$

— для относительного удлинения штока δ_1 :

$$\delta_1 \approx \frac{\Delta l_{шт}}{l_{шт}} = \frac{\sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2} - l_{шт}}{l_{шт}} = \frac{\sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2}}{l_{шт}} - 1, \quad (5)$$

где $l_{шт}$ — начальная длина штока, перед касанием с деталью.

При использовании четырех плеч оптических волокон для абсолютных удлинений штока $\Delta l_{шт}$

² Оптическое волокно. URL: https://disk.pnppk.ru/d/s/12oVTccQihxFARcqiTCxON2OEFkmAUz/6G0r_0lruzbcLieCzaYEKjvuAcp6b3f2-8LsAv_EnLQw (дата обращения: 09.04.2026).

можно применить упрощенную формулу (для значения «с запасом»):

$$\Delta l_{шт} \approx 4\Delta l_{ов}. \quad (6)$$

Тогда с учетом этой формулы из выражения (4) можно получить уравнение для оценки порога чувствительности ИГ, например, вдоль одной оси X $\Delta l_{шт1x}$, соответствующей смещению $\Delta l_{см}$: $\Delta l_{см} = \Delta l_{шт1x}$, зависящей от порога чувствительности волоконных датчиков в штоке,

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1x} &\approx \sqrt{(\Delta l_{шт} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2} = \\ &= \sqrt{(4\Delta l_{ов} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Суммарный порог чувствительности ИГ будет зависеть от порогов чувствительности по двум осям, а выражение для его расчета, при условии равенства двух составляющих $\Delta l_{шт1x} = \Delta l_{шт1y}$ независимых друг от друга и распределенных по нормальному закону, принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1} &\approx \sqrt{\Delta l_{шт1x}^2 + \Delta l_{шт1y}^2} = \\ &= \Delta l_{шт1x} \sqrt{2} \approx 1,4 \cdot \Delta l_{шт1x}, \end{aligned} \quad (8)$$

меняя также и выражение (7)

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1} &\approx 1,4 \sqrt{(4\Delta l_{ов} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2} = \\ &= 1,4 \cdot l_{шт} \sqrt{\left(\frac{4\Delta l_{ов}}{l_{шт}} + 1\right)^2 - 1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ долговечности оптических волокон при их удлинении

Вопрос долговечности оптических волокон при небольших удлинениях на уровне упругих деформаций рассматривался ранее в [13]. Было показано, что при оценке долговечности следует учесть, что прочность бездефектного кварцевого волокна выше прочности стальной проволоки такого же диаметра, однако любой контакт поверхности волокна с твердым предметом или даже частицей пыли, находящейся в воздухе, приводит к появлению на поверхности стекла микротрещин, которые при приложении растягивающей нагрузки начинают быстро расти. В результате разрывная прочность кварцевых волокон оказывается намного ниже теоретического предела прочности кварцевого стекла.

Согласно [13], время до разрушения t_p от нагрузки σ_s имеет экспоненциальную зависимость

$$t_p = t_o \cdot \exp\left(\frac{U_0}{R \cdot T'} \left(1 - \frac{\sigma_s}{S_{ю}}\right)\right), \quad (10)$$

где t_o — величина, приблизительно равная периоду тепловых колебаний атомов (~10–13 сек); U_0 — энергия ненагруженной Si-O-связи (~110 ккал/моль); R — газовая постоянная; T' — температура; $S_{ю}$ — прочность в отсутствии термофлуктуационного роста дефектов.

При этом время жизни оптического волокна $t_{ов}$ при статической нагрузке σ_s , равной разрывной прочности, в $(n_{ов} + 1)$ раз короче, чем при динамической σ_d (при $\sigma_s = \sigma_d$). Параметр статической усталости n как наклон графика статической усталости в логарифмических координатах записывается в виде

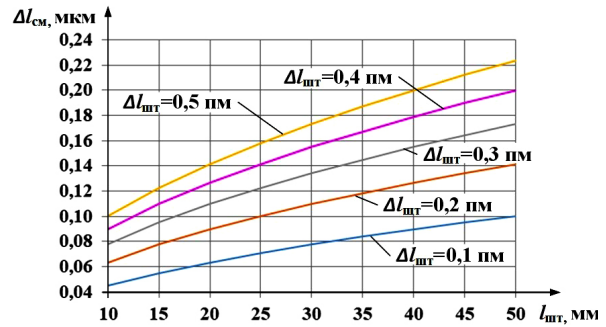


Рис. 3. Графики зависимостей порога чувствительности ИГ $\Delta l_{см}$ от длины штока $l_{шт}$ для разных значений порога чувствительности волоконных датчиков $\Delta l_{ов}$ при условии использования четырех плеч оптических волокон

Fig. 3. Graphs of the dependence of the sensitivity threshold of the measuring head $\Delta l_{см}$ on the length of the measuring rod $l_{шт}$ for different values of the sensitivity threshold of fiber sensors $\Delta l_{ов}$ under the condition of using four arms of optical fibers

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

$$n_{ов} = -\frac{d \ln(t_p)}{d \ln(\sigma_s)} = \frac{U_0}{RT'} \cdot \frac{\sigma_s}{S_{ю}}. \quad (11)$$

В интересном с практической точки зрения интервале от 1 секунды до 30 лет он успевает снизить всего лишь со 155 до 135, подтверждая возможность длительной работы оптических волокон при удлинении на уровне упругих деформаций.

Анализ ИГ с жестким штоком

С помощью полученного ранее уравнения (6) были рассчитаны значения порога чувствительности ИГ $\Delta l_{шт}$ для длин штока $l_{шт}$ от 10 до 50 мм с шагом 5 мм при использовании четырех плеч оптических волокон и разных значений порога чувствительности волоконных датчиков $\Delta l_{ов}$ в диапазоне от 0,1 до 0,5 нм с шагом 0,1 нм. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 3.

При использовании в ИГ датчика на основе ВБР с порогом чувствительности $\Delta l_{вбр} = 1,6$ нм минимальные удлинения четырех плеч оптических волокон составят $\Delta l_{ов} = 0,4$ нм, что при длине штока 30 и 50 мм приведет к одноосевому порогу чувствительности ИГ $< 0,16$ и $0,2$ мкм соответственно. Для двух осей суммарный порог чувствительности ИГ $\approx 0,22$ и $0,28$ мкм соответственно.

Для ИГ с ВИД достигим порог чувствительности $\Delta l_{вид} = 0,4$ нм, обуславливая минимальные удлинения четырех плеч оптических волокон $\Delta l_{ов} = 0,1$ нм, что при длине штока 30 и 50 мм приведет к одноосевому порогу чувствительности ИГ $< 0,08$ и $0,1$ мкм соответственно. Для двух осей суммарный порог чувствительности ИГ $\approx 0,11$ и $0,14$ мкм соответственно. Таким образом, при использовании ВИД достигим более низкий порог чувствительности, а лазерные интерферометры уже достаточно отработаны, позволяя изготавливать их в интегральном оптическом исполнении.

Недостатком рассматриваемых конструкций ИГ является то, что они «слепы» и не могут визуализировать окружающее пространство вокруг измерительного наконечника, не позволяя определить приближение к детали. Однако они относительно просты и позволяют получить неплохие характеристики.

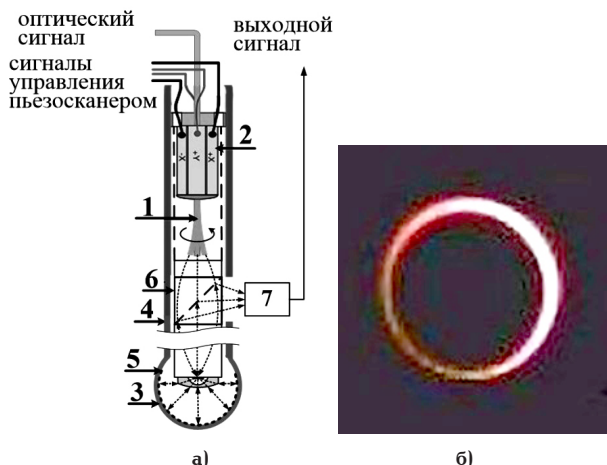


Рис. 4. ИГ на основе пьезоволоконного сканера:
а) схема: 1 — подвижное волокно, 2 — пьезопровод, 3 — измерительный наконечник, 4 — подвижный измерительный шток, 5 — внутреннее отражающее покрытие, 6 — оптическая система, 7 — видеокамера;
б) фото траектории движения лазерного луча в виде фигуры Лиссажу [10]

Fig. 4. Measuring head based on a piezo-fiber scanner:
a) diagram: 1 — movable fiber, 2 — piezo actuator, 3 — measuring tip, 4 — movable measuring rod, 5 — internal reflective coating, 6 — optical system, 7 — video camera;
b) photo of the trajectory of the laser beam in the form of a Lissajous figure [10]

Особенности ИГ

с подвижным измерительным штоком

В разделе обсуждаются физико-технические особенности ИГ, реализованные на основе оптоволоконного пьезосканера и двух вариантов трехкоординатных ВИД, в том числе с возможностью визуализации.

ИГ при использовании

оптоволоконного пьезосканера

Рассмотрим возможности построения ИГ на основе оптоволоконного пьезосканера (рис. 4а), представленного в публикациях [10–14]. Его принцип действия основан на круговом вращении участка

излучающего волокна цилиндрическим двухкоординатным пьезопроводом и формировании выходящего луча света с контуром конуса (вид сбоку) и окружности, фигуры Лиссажу (фронтальный вид, рис. 4б). Если внутренняя поверхность покрыта отражающим покрытием, то оптический поток на выходе вращающегося световода отражается в обратном направлении, позволяя осуществлять измерения положения подвижного измерительного штока.

Минимальный радиус изгиба участка волокна r_b длиной l_b можно рассчитать, используя данные по изгибу подвижного отрезка световода [19], по формуле

$$r_{об} = \frac{l_{обл} \cdot 360^\circ}{2\pi\alpha_1} = \frac{l_{обл}}{\alpha_2}, \quad (12)$$

где α_1 и α_2 — углы отклонения конца волокна в градусах и радианах соответственно. Для экспериментального образца, бездефектно проработавшего непрерывно в течение 3377 часов, с параметрами $l_{обл} = 4,3$ мм и $\alpha_1 = 50^\circ$ [9], получаем $r_b = 4,9$ мм ≈ 5 мм. Полученные значения соответствуют допустимым значениям по динамической нагрузке пьезоволоконного сканера.

ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений

В одном из вариантов оптическая часть данной ИГ (рис. 5а,б) включает гибкий полый шток 1, выполненный в виде упругого элемента с установленным на его конце измерительного наконечника в виде высокопрочной сферической оболочки 2 с внутренним отражающим покрытием 3, неподвижный шток 4, трехкоординатный ВИД смещений, включающий три датчика ВИД_x, ВИД_y 6 и ВИД_z 7 для измерений смещений I_x , I_y и I_z вдоль осей ОХ, ОУ и ОZ соответственно. Эти три датчика оптически связаны с трехканальным лазерным интерферометром (на рис. 5 не показан), осуществляющим измерения смещений I_x , I_y и I_z .

На торцах волокон трех ВИД установлены концевые микролинзы [20, 21] или микрооптические системы для коллимации оптического потока.

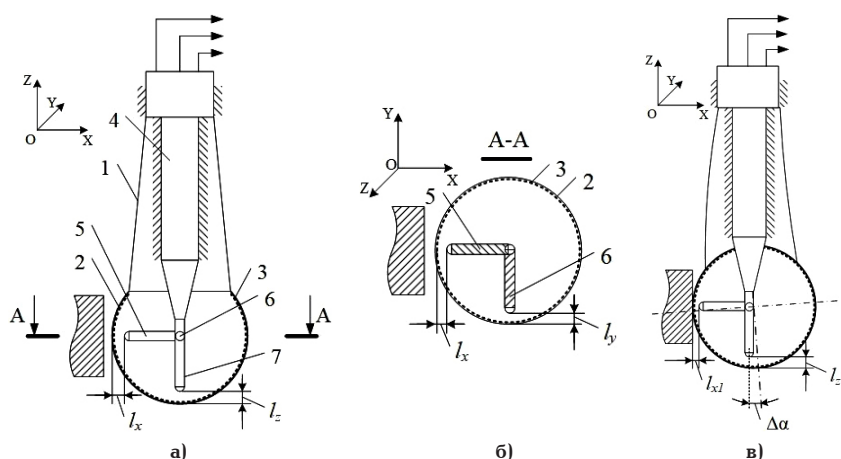


Рис. 5. Конструкция ИГ на основе волоконного интерферометрического датчика смещений: а) вид сбоку: 1 — подвижный шток, 2 — сферическая оболочка, 3 — отражающее покрытие, 4 — неподвижный шток, 5–7 — три датчика ВИД_x 5, ВИД_y 6 и ВИД_z 7; б) вид сверху; в) при отклонении измерительного наконечника в процессе касания с деталью

Fig. 5. Design of the measuring head based on a fiber interferometric displacement sensor:
a) side view: 1 — movable rod, 2 — spherical shell, 3 — reflective coating, 4 — fixed rod, 5–7 — three fiber interferometric sensors for ВИД_x 5, ВИД_y 6 and ВИД_z 7;

б) top view; в) when the measuring tip is deflected in the process of touching the part

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

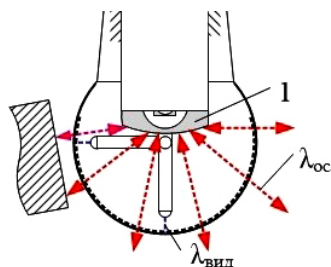


Рис. 6. Конструкция ИГ на основе волоконного интерферометрического датчика смещений при касании с деталью

Fig. 6. Design of the measuring head is based on a fiber interferometric displacement sensor in contact with the product
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

На внутреннюю сторону сферической оболочки нанесено отражающее покрытие 3, а формирующиеся зазоры между ним и волокнами в итоге являются частями измерительных каналов трехканального лазерного интерферометра.

Перед измерениями ИГ калибруется, определяя начальные значения зазоров вдоль осей ОХ, ОУ и ОZ. Далее в процессе измерений ИГ подводится к детали и при касании с ней подвижный наконечник отклоняется от своего начального положения. При регистрации искомого трехкоординатных смещений ΔI_x , ΔI_y и ΔI_z осуществляется факт касания измерительного наконечника с деталью, по значениям которых косвенно определяется координата касания и суммарное значение отклонения $\Delta I_{иг2}$:

$$\Delta I_{иг2} = \sqrt{\Delta I_{иг1 x}^2 + \Delta I_{иг1 y}^2 + \Delta I_{иг1 z}^2}. \quad (13)$$

ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений с возможностью визуализации

Конструкция и принцип действия данной ИГ во многом подобны предыдущему типу ИГ (рис. 6). Нововведение заключается в добавлении подсветки и видеокамеры с широкоугольной оптической системой Fisheye «Рыбий глаз» (в дальнейшем — оптическая система) 1 с возможностью расширения поля зрения почти до $180^\circ \times 180^\circ$.

Для совместной работы трехкоординатного ВИД смещений и оптической системы в ИГ применено спектральное разнесение их оптических потоков с реализацией дихроичного зеркала (отражателя) [17]. Для этого на внутреннюю поверхность измерительного наконечника вместо отражающего наносят специальное покрытие, реализующее оптический фильтр типа «Longpass» с коэффициентом пропускания k_{np} , подчиняющимся следующему условию:

$$\begin{cases} k_{\max}, & \text{при } \lambda \geq \lambda_{гр}; \\ k_{\min}, & \text{при } \lambda < \lambda_{гр}; \end{cases} \quad (14)$$

где $\lambda_{гр}$ — граничная длина волны, разделяющая диапазон длин волн оптических потоков на два поддиапазона: с высоким пропусканием и высоким пода-

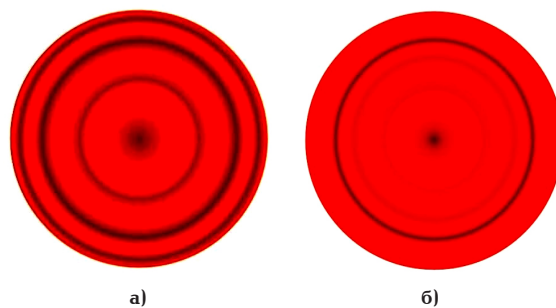


Рис. 7. Кольца Ньютона при монохроматическом красном освещении (а) и муаровое кольцо, полученное при двухдлинноволновом освещении (б)

Fig. 7. Newton's rings under monochromatic red illumination (a) and the Moire ring obtained under two-wavelength illumination (b)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

влением для оптической системы и ВИД смещений соответственно.

В настоящее время эта технология уже хорошо отработана и значение граничной длины волны $\lambda_{гр}$ может находиться вблизи границы видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, например, $0,71 - 0,8$ мкм, а значения $k_{\max}$ и $k_{\min}$ может быть более 90 % и менее 0,5 %³. Для такого варианта удобна рабочая длина волны трехкоординатного ВИД смещений $\lambda_{вид} = 0,63$ мкм, а оптической системы — $\lambda_{ос} = 1,5$ мкм. И тогда в первом случае дихроичное покрытие будет отражающим, а во втором — пропускающим.

В процессе работы излучение оптической системы освещает окружающее пространство измерительного наконечника. При близком приближении его к детали освещающий когерентный оптический поток отражается в обратном направлении и из-за формирующегося клиновидного воздушного зазора между деталью и измерительным наконечником на последнем создается изображение в виде кольцевой интерференционной картины с периодическими повторяющимися концентрическими темными и светлыми полосами, представляющими так называемые кольца Ньютона. Частичное попадание элементов ВИД в поле зрения оптической системы не будет критичным из-за их малости и возможности дополнительной алгоритмической обработки по реконструкции изображения.

Значения радиусов n темных колец Ньютона в отраженном свете r_{mn} зависят от длины волны света оптической системы $\lambda_{ос}$, радиуса измерительного наконечника $R_{ин}$, зазора I_3 , и определяются выражением:

$$r_{mn}^2 = nR_{ин}\lambda - 2R_{ин}I_3, \quad (15)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$ — порядки колец Ньютона.

Регистрация и измерение радиусов темных колец и их пространственного положения в пределах поля зрения оптической системы позволяет получить информацию о положении измерительного наконечника ИГ относительно детали, а именно минимальном зазоре I_3 (по перпендикуляру к детали) пространственном положении точки контакта (при его наличии) и их изменений в динамике.

Определим значения радиусов при касании измерительного наконечника с деталью $I_3 = 0$. Для длины волны $\lambda = 1,5$ мкм и радиуса наконечника $R_{ин} = 1,5$ мм значения радиусов первого $r_{т1}$ ($n = 1$) и второго $r_{т2}$ ($n = 2$) темных колец Ньютона (рис. 7а):

$$r_{т1} = \sqrt{R_{ин}\lambda} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 47,43 \text{ мкм};$$

$$r_{т2} = \sqrt{2R_{ин}\lambda} = \sqrt{R_{ин}\lambda} \cdot \sqrt{2} \approx 47,43 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \approx 66,88 \text{ мкм},$$

расстояние (шаг) между ними $r_{т21}$:

$$r_{т21} = r_{т2} - r_{т1} \approx 19,45 \text{ мкм}.$$

У современных матричных оптико-электронных приемников размер пикселя уже минимизирован до $0,4 - 0,56$ мкм^{4,5}.

Такие характеристики позволяют реализовать возможности встроенного малогабаритного микроскопа, позволяющего осуществлять видеоизмерительные операции с изображениями вышеуказанных расчетных размеров. Примером этого может быть портативный микроскоп для смартфона iMicro Q2 с увеличением до 800 раз, диаметром ≈ 10 мм, толщиной 3,2 мм, весом всего 0,5 гр⁶.

Внешнюю трехмерную полусферическую поверхность измерительного наконечника, освещаемую оптической системой, на плоскости можно представить в виде круга диаметром

$$d_{кр} = 2\pi R_{ин}. \quad (16)$$

Для $R_{ин} = 1,5$ мм получаем диаметр кругового поля обзора $d_{кр} = 9,42$ мм.

Рассмотрим алгоритмы расчетов двух групп параметров, связанных с зазором и пространственным положением точки касания, которые могут быть базовыми при обработке данных, полученных при визуализации колец Ньютона.

Значения зазора I_3 в момент времени t_1 можно определить на основе формулы (15), измеряя радиусы нескольких темных колец Ньютона $r_{т1}(t_1)$, $r_{т2}(t_1) \dots r_{тn}(t_1)$:

$$\begin{cases} I_{31}(t_1) = \frac{R_{ин}\lambda - r_{т1}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \frac{\lambda}{2} - \frac{1}{2R_{ин}} r_{т1}^2(t_1); \\ I_{32}(t_1) = \frac{2R_{ин}\lambda - r_{т2}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \lambda - \frac{1}{2R_{ин}} r_{т2}^2(t_1); \\ I_{3n}(t_1) = \frac{nR_{ин}\lambda - r_{тn}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \frac{n\lambda}{2} - \frac{1}{2R_{ин}} r_{тn}^2(t_1). \end{cases} \quad (17)$$

Усреднением нескольких полученных значений $I_{31}(t_1)$, $I_{32}(t_1) \dots I_{3n}(t_1)$ уменьшается случайная составляющая измерений зазора:

$$\overline{I_3(t_1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{3i}(t_1). \quad (18)$$

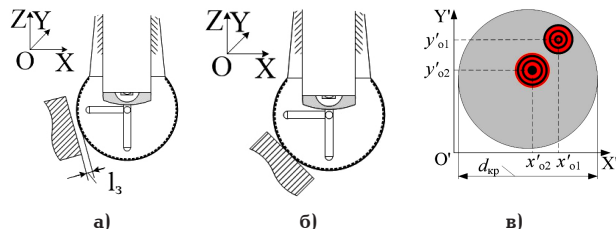


Рис. 8. Взаимное расположение ИГ относительно детали: а) при бесконтактном «ощупывании» детали с зазором I_3 ; б) при касании детали; в) изображения колец Ньютона при «бесконтактном «ощупывании» и касании с деталью

Fig. 8. Relative position of the measuring head relative to the part: а) during non-contact "groping" of the part with a gap I_3 ; б) when touching the part; в) images of Newton's rings during "non-contact" groping and touching with the part

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Аналогично определяются значения радиусов нескольких темных колец Ньютона в момент времени t_2 : $r_{т1}(t_2)$, $r_{т2}(t_2) \dots r_{тn}(t_2)$, вычисляются значения зазора $I_{31}(t_2)$, $I_{32}(t_2) \dots I_{3n}(t_2)$, рассчитывая среднее арифметическое значение нового зазора в момент времени t_2 : $\overline{I_3(t_2)}$. С учетом полученных данных для измерительного наконечника определяются значения следующих параметров:

– смещений (для бесконтактного грубого ощупывания) $\Delta I_{ин}$:

$$\Delta I_{ин} = \overline{I_3(t_2)} - \overline{I_3(t_1)}; \quad (19)$$

– скорости сближения (удаления) с деталью $v_{ин}$:

$$v_{ин} = \frac{\Delta I_{ин}}{\Delta t} = \frac{\overline{I_3(t_2)} - \overline{I_3(t_1)}}{\Delta t}. \quad (20)$$

Вторая группа параметров связана с пространственным положением точки касания, которое можно определить также на основе уравнения (15) при условии $I_3 = 0$. В основе этих расчетов лежит алгоритм «привязки» полусферической системы координат измерительного наконечника к локальной прямоугольной (декартовой) системе координат $X'O'Y'$ оптико-электронных приемников. Полусферическая система может быть спроецирована на плоскость с сохранением угловых характеристик (например, через полярное преобразование). Так, для нескольких изображений колец Ньютона в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$ синтезируются аппроксимирующие функции окружностей. Они позволяют рассчитать группу искоемых значений с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} (x - x_{от1})^2 + (y - y_{от1})^2 = r_{т1}^2 = R_{ин}\lambda; \\ (x - x_{от2})^2 + (y - y_{от2})^2 = r_{т2}^2 = 2R_{ин}\lambda; \\ \dots \\ (x - x_{отn})^2 + (y - y_{отn})^2 = r_{тn}^2 = nR_{ин}\lambda, \end{cases} \quad (21)$$

⁴ Достигнут ли предел мобильной фотографии: микропиксели на грани физических законов. URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/dostignut-li-predel-mobilnoy-fotografii-mikropikseli-na-grani-fizicheskikh-zakonov.html> (дата обращения: 07.04.2026).

⁵ Жертва маркетинга: OmniVision сделала самую маленькую матрицу на 200 Мп для смартфонов. URL: <https://wylsa.com/zherstva-marketinga-omnivision-sdelala-samuyu-malenkuyu-matriczu-na-200-mp-dlya-smartfonov/> (дата обращения: 07.04.2026).

⁶ iMicro Q2 — портативный микроскоп для смартфона с увеличением до 800 раз. URL: <https://club.dns-shop.ru/digest/39884-imicro-q2-portativnyi-mikroskop-dlya-smartfona-s-uvelicheniem-do-800-raz/> (дата обращения: 07.04.2026).

где $x_{от1}, x_{от2} \dots x_{отn}$ и $y_{от1}, y_{от2} \dots y_{отn}$ — расчетные значения координат центров колец Ньютона по осям в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$.

Для полученного массива данных координат осуществляется усреднение, подобно вышеописанному, по формуле (18), и обратным преобразованием осуществляется переход к полусферической системе координат измерительного наконечника с соответствующим расчетом точки касания.

Вышеописанные алгоритмы расчетов двух групп параметров позволяют получить результаты измерений для бесконтактного ощупывания (рис. 8а) и контактных измерений (рис. 8б). На рис. 8в показано изображение двух групп колец Ньютона при переходе от бесконтактного ощупывания к контактными измерениям с определением координат центров колец Ньютона по осям в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$.

Анализ ИГ с подвижным штоком

Визуализация колец Ньютона расширяет функциональные возможности ИГ, позволяя осуществлять бесконтактное ощупывание детали в режиме «грубого отсчета», определять вектор приближения измерительного наконечника к детали и определять размеры зоны контакта.

В соответствии с системой уравнений (17) расчетные значения зазоров I_3 пропорциональны значениям радиусов колец Ньютона во второй степени r_m^2 . При дифференцировании уравнения из этой системы изменения ΔI_3 пропорциональны удвоенному значению изменений: $\Delta r_t: 2\Delta r_t$. Так, погрешность определения ΔI_3 зависит от $2\Delta r_t$. С учетом этого минимальная погрешность определения зазоров при минимальном размере пикселя будет на уровне 0,8 мкм. Погрешность определения пространственного положения точки касания, зависящего от определения координат центров колец Ньютона, будет на уровне 0,4 мкм.

Суммарный порог чувствительности ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений зависит от порогов чувствительности по трем осям, а выражение для его расчета при условии равенства двух составляющих $\Delta I_{иг2\ x} = \Delta I_{иг2\ y} = \Delta I_{иг2\ z}$, независимыми друг от друга и распределенных по нормальному закону во многом подобно уравнению (13). С учетом этого при использовании ВИД суммарный порог чувствительности таких ИГ будет 0,69 пм.

При необходимости увеличения радиусов колец можно достичь, используя способ формирования муаровых колец, заключающийся в использовании двухдлинноволнового источника света. Использование в интерферометре излучения с двумя разными длинами волн λ_1 и λ_2 позволяет получить две различные интерференционные картины. В результате переналожения этих картин образуется изображение муаровых (комбинационных) полос с синтезированной длиной волны $\lambda_{муар}$, эквивалентных системе интерференционных полос, которые возникают, если интерферометр работал бы на длине волны этих муаровых полос.

$$\lambda_{муар} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (22)$$

Применение этого метода для колец Ньютона позволяет записать уравнение применительно для радиусов при использовании лазерного двухдлинноволнового источника света:

$$r_{муар} = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}, \quad (23)$$

где r_1 и r_2 — радиусы колец Ньютона, формирующихся для двух длин волн.

Тогда выражение для соотношений радиусов темных колец в отраженном свете можно записать в следующем виде:

$$\frac{r_{mn1}}{r_{mn2}} = k_m = \frac{\sqrt{nR_{ин}\lambda_1}}{\sqrt{nR_{ин}\lambda_2}} = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}. \quad (24)$$

На рис. 7 показаны примеры изображений колец Ньютона при монохроматическом красном освещении (рис. 7а) и муарового кольца, полученного при двухдлинноволновом красном освещении (рис. 7б). С учетом этого расчетные значения радиусов пятого $r_{т5}$ ($n = 5$), седьмого $r_{т7}$ и девятого $r_{т9}$ ($n = 2$) темных колец Ньютона при их реализации муаровыми кольцами составят $r_{т5} \approx 68,76$ мкм, $r_{т7} \approx 81,36$ мкм и $r_{т9} \approx 92,25$ мкм соответственно. Увеличение радиусов колец Ньютона можно считать более удобным для регистрации их опико-электронными приемниками.

Заключение

1. В статье рассмотрены физико-технические основы двух типов ИГ с жестким и подвижным измерительными штоками.

2. Обсуждены особенности двух вариантов первого типа ИГ с жестким креплением измерительного наконечника к измерительному штоку, реализованные на основе изгиба последнего, а именно датчиков с ВБР и ВИД. Показано, что ИГ с использованием ВИД имеет более низкий порог чувствительности.

3. Рассмотрены три варианта ИГ с подвижным измерительным штоком. Показано, что при использовании трехкоординатных ВИД порог чувствительности по трем осям будет иметь субпикометрические значения. Представлен вариант встраивания миниатюрной широкоугольной видеокамеры Fisheye («Рыбий глаз») и реализации возможности визуализации образующихся так называемых колец Ньютона, которые позволяют осуществлять бесконтактное «ощупывание» детали.

Список источников / References

1. Зубарев Ю. М., Косаревский С. В., Тырс В. Р. Измерение параметров резьбы с использованием координатно-измерительных машин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 7 (110). С. 22–25. EDN: QCPRGN.
2. Zubarev Yu. M., Kosarevskiy S. V., Tyrs V. R. Izmereniye parametrov rez'by s ispol'zovaniyem koordinatno-izmeritel'nykh mashin. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2013;7(110):22–25. EDN: QCPRGN. (In Russ.).
3. Ушаков М. В., Воробьев И. А., Никольский С. М. Оценка области использования КИМ // Мир измерений. 2022. № 2. С. 49–51. EDN: GHQJHA.
4. Ushakov M. V., Vorobev I. A., Nikolsky S. M. CMMS' application area assessment. *Measurements World*. 2022;2:49–51. EDN: GHQJHA. (In Russ.).
5. Захаревич Е. М., Лапшин В. В., Шавва М. А. [и др.]. Измерительная система для контроля асферических линз из германия на ультрапрецизионных станках серии УТМ-250 //

- Фотоника. 2025. Т. 19, № 2 С. 116–129. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.2.116.129>. EDN: MZZXKX.
- Zakharevich E. M., Lapshin V. V., Shavva M. A. [et al.]. Measuring system for inspection of the germanium a spherical lenses using the UTM-250 ultraprecision machines. *Photonics Russia*. 2025;19(2):116–129. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.2.116.129>. EDN: MZZXKX. (In Russ.).
4. Бурдак С. В., Захаревич Е. М., Лапшин В. В. [и др.]. Инновационные разработки в области российского ультрапрецизионного станкостроения // Фотоника. 2024. Т. 18, № 2. С. 116–121. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.116.120>. EDN: LTOTRO.
- Burdak S. V., Zakharevich E. M., Lapshin V. V. [et al.]. Innovative developments in the field of Russian ultra-precision machine tools. *Photonics Russia*. 2024;18(2):116–121. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.116.120>. EDN: LTOTRO. (In Russ.).
5. Гапшиш В.-А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. Москва: Машиностроение, 1988. 328 с. ISBN 5-217-00003-1.
- Gapshis V.-A. A., Kasparaytis A. Yu., Modestov M. B. [et al.]. Koordinatnyye izmeritel'nyye mashiny i ikh primeneniye. Moscow, 1988. 328 p. ISBN 5-217-00003-1. (In Russ.).
6. Емельянов П. Н., Педь С. Е. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 2 (45). С. 52–56. EDN: RQGJIF.
- Yemelyanov P. N., Ped S. E. Engineering of high precision coordinate measuring machine with CNC. *Vestnik MSTU "Stankin"*. 2018;2(45):52–56. EDN: RQGJIF. (In Russ.).
7. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 140–146. EDN: ZUQNKP.
- Leun E. V. Hybrid 3D measuring head for high-precision contact and non-contact coordinate measuring for complex shape details. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017;5(155):140–146. EDN: ZUQNKP. (In Russ.).
8. Куликов А. В. Волоконно-оптические акустические сенсоры на брегговских решетках: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 144 с.
- Kulikov A. V. Volokonno-opticheskiye akusticheskiye sensory na breggovskikh reshetkakh. Saint Petersburg, 2012. 144 p. (In Russ.).
9. Ефимов М. Е. Метод и аппаратура для регистрации акустической эмиссии и деформаций композитного графит-эпоксидного материала на основе анализа амплитудно-фазовых характеристик сигнала волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 140 с.
- Efimov M. E. Metod i apparatura dlya registratsii akusticheskoy emissii i deformatsiy kompozitnogo grafit-epoksidnogo materiala na osnove analiza amplitudno-fazovykh kharakteristik signala volokonno-opticheskogo interferometra Fabri-Pero. Saint Petersburg, 2018. 140 p. (In Russ.).
10. Самарин А. Лазерный микропроектор со спиральной разверткой // Компоненты и технологии. 2008. № 10 (87). С. 101–104. EDN: MTKAXF.
- Samarin A. Lazernyy mikroproyektor so spiral'noy razvertkoy. *Komponenty i Tekhnologii*. 2008;10(87):101–104. EDN: MTKAXF. (In Russ.).
11. Akhoundi F., Qin Y., Peyghambarian N. [et al.]. Compact fiber-based multi-photon endoscope working at 1700 nm. *Biomedical Optics Express*. 2018;9(5):2326–2335. <https://doi.org/10.1364/BOE.9.002326>.
12. Schowengerdt B., Johnston R., Melville C. [et al.]. 3D Displays using Scanning Laser Projection. *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2012;43:640–643. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05863.x>.
13. Wu Y., Leng Y., Xi J. [et al.]. Scanning all-fiber-optic endomicroscopy system for 3D nonlinear optical imaging of biological tissues. *Optics Express*. 2009;17(10):7907–7915. <https://doi.org/10.1364/OE.17.007907>.
14. Zhao Y., Nakamura H., Gordon R. J. Development of a versatile two-photon endoscope for biological imaging. *Biomedical Optics Express*. 2010;1(4):1159–1172. <https://doi.org/10.1364/BOE.1.001159>.
15. Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution. *Measurement Science and Technology*. 2009;20(8):084008. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/8/084008>.
16. Libbrecht K. G., Black E. D. A basic Michelson laser interferometer for the undergraduate teaching laboratory demonstrating picometer sensitivity. *American Journal of Physics*. 2015;83(5):409–417. <https://doi.org/10.1119/1.4901972>.
17. Isleif K.-S., Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact Multifringe Interferometry with Subpicometer Precision. *Physical Review Applied*. 2019;12(3):034025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.034025>.
18. Леун Е. В. К вопросу достижения субпикометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-110-118>. EDN: LLRTUP.
- Leun E. V. On the issue of achieving subpicometric resolution by acousto-optic two-channel laser displacement interferometer with two different frequency photodetectors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022;2(182):110–118. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-110-118>. EDN: LLRTUP. (In Russ.).
19. Семенов С. А. Прочность и долговечность волоконных световодов на основе кварцевого стекла: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2007. 233 с.
- Seменов S. L. Prochnost' i dolgovechnost' volokonnykh svetovodov na osnove kvartsevogo stekla. Moscow, 2007. 233 p. (In Russ.).
20. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2012. 128 с.
- Fokina M. I. Formirovaniya mikroopticheskikh poverkhnostey na osnove fotootverzhdeniya monomernykh kompozitsiy v blizhnem pole svetovoy volny. Saint Petersburg, 2012. 128 p. (In Russ.).
21. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1-2. С. 240–244. EDN: HUAZGV.
- Plekhanov A. I., Shelkovnikov V. V. Opticheskiye volokna s kontsevyimi fotopolimernymi mikrolinzami. *Rossiyskiye Nanotekhnologii*. 2006;1(1-2):240–244. EDN: HUAZGV. (In Russ.).

Информация об авторе:

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

e-mail: stankin1999@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 11.06.2026.

Information about the author:

LEUN Evgeniy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 6060-8056

AuthorID (RSCI): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

e-mail: stankin1999@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 13.05.2026; accepted for publication 11.06.2026.