

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПЯТНА ОДНОМОДОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАСТИНОК

Ю. А. Будагов^а, В. В. Глаголев^а,

М. В. Ляблин^а, Е. В. Пищальникова^а, А. М. Кузькин^а,

Г. В. Трубников^а, Б. Ди Джироламо^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б ЦЕРН, Женева, Швейцария

Экспериментально исследован новый позиционно-чувствительный метод делительных пластинок при регистрации смещения одномодового лазерного луча.

Показано, что чувствительность метода при регистрации лазерного луча диаметром 8,8 мкм достигает величины $0,18 \text{ мкм}^{-1}$. Зона возможных линейных смещений, ограниченная нелинейностью 1%, — 2,4 мкм. Достижимая точность измерений, ограниченная шумами АЦП, составила $\pm 0,03 \text{ нм}$.

Метод делительных пластинок реализуется с помощью прецизионного лазерного инклинометра с уменьшенными габаритными размерами $20 \times 20 \times 20 \text{ см}$ и весом до 10 кг.

A new position-sensitive method of dividing plates has been experimentally investigated for detecting the displacement of a single-mode laser beam.

Measurements show that with this method it is possible to attain sensitivities down to $0.18 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$ for a laser beam spot diameter of $8.8 \text{ }\mu\text{m}$ displaced over $2.4\text{-}\mu\text{m}$ diameter zone, defined as the area where measurement nonlinearities are within 1%. The achievable measurement accuracy is limited by ADC noise and corresponds to $\pm 0.03 \text{ nm}$.

Application of the dividing plate method for position-sensitive measurements allows building a compact version of the Precision Laser Inclinator, the Compact PLI, with reduced overall dimensions of $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ and weight of approximately 10 kg.

PACS: 42.62.–b; 29.90.+g

ВВЕДЕНИЕ

В современном физическом эксперименте часто в качестве неразрушающего контроля используется лазерный луч. Лазерный луч, обладая свойством прямолинейного распространения малого силового воздействия на чувствительные элементы физических установок, переносит световую мощность, достаточную для детектирования его положения позиционно-чувствительным фотоприемным устройством (ПЧФУ). Эти свойства позволяют применять его как эффективный инструмент неразрушающего контроля.

Например, в прецизионном лазерном инклинометре ОИЯИ (ПЛИ) [1–5] используется отражение лазерного луча от горизонтальной поверхности жидкости. При наклоне поверхности Земли лазерный луч изменяет угловое положение, которое регистрируется ПЧФУ. В атомно-силовом микроскопе [6–8] лазерный луч, отражаясь от зеркальной площадки колеблющегося кантилевера¹, изменяет свое угловое положение, которое также регистрируется ПЧФУ. При этом лазерный луч практически не взаимодействует силовым образом ни с поверхностью жидкости в ПЛИ, ни с кантилевером.

Фактически ПЧФУ измеряет положение центра пятна лазерного луча. Для эффективного применения лазерного луча в физическом эксперименте, как правило, используется симметричное распределение мощности в пятне лазерного луча. В частности, наиболее эффективно применяется одномодовый лазерный луч. Это связано с возможностью фокусировать его в минимально возможный диаметр и, соответственно, получить максимальную чувствительность в определении положения его центра. Для измерения смещения одномодового лазерного луча и, как следствие, изменения контролируемой физической величины в эксперименте используются различные методы фотометрического позиционно-чувствительного контроля положения пятна лазерного луча.

В зависимости от задачи применяются методы, основанные на использовании квадрантного фотоприемника [9, 10], позиционно-чувствительного фотодиода (Lateral PSD) [11, 12], CCD-матрицы [13, 14] и ПЧФУ на основе делительных пластинок (ДП) [15, 16].

Измерение положения центра пятна одномодового лазерного луча при помощи ПЧФУ является ключевой методикой при использовании лазерного луча в качестве детектирующего элемента в физическом эксперименте.

В статье исследуется один из самых чувствительных методов регистрации положения одномодового лазерного луча ПЧФУ на основе ДП и предлагается его использование в ПЛИ.

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ПЯТНА ОДНОМОДОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Достаточно часто в физическом эксперименте требуется измерить угловой наклон чувствительного элемента или его перемещение, которые возникают в результате действия того или иного физического эффекта. Используемый нами в ПЛИ (рис. 1) отраженный лазерный луч наклоняется на двойной угол γ относительно первичного наклона. Перемещение пятна лазерного луча вследствие его наклона или параллельного смещения регистрируется при помощи ПЧФУ.

В качестве примера рассмотрим наклон лазерного луча в ПЛИ ОИЯИ.

На платформе, связанной с поверхностью Земли, расположены лазер, кювета с жидкостью и ПЧФУ. При наклоне на угол γ поверхности Земли отраженный от

¹Кантилёвер (англ. cantilever — кронштейн, консоль) — устоявшееся название наиболее распространенной в сканирующей атомно-силовой микроскопии конструкции микромеханического зонда.

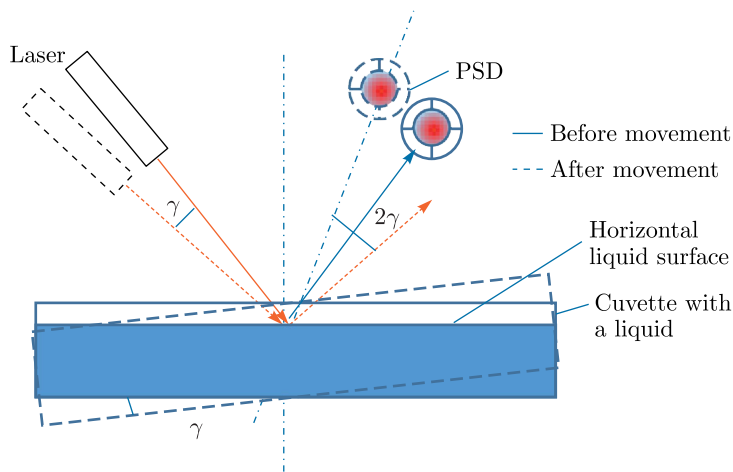


Рис. 1. Принцип работы прецизионного лазерного инклинометра ОИЯИ

горизонтальной поверхности жидкости лазерный луч изменяет свое положение на удвоенный угол наклона поверхности Земли относительно ПЧФУ. Это смещает пятно лазерного луча на ПЧФУ. Величина сигнала с ПЧФУ при смещении пятна лазерного луча пропорциональна первичному наклону γ .

Для измерения смещения пятна лазерного луча используются четыре различных метода ПЧФУ.

ПЧФУ на основе квадрантного фотоприемника. Рис. 2 иллюстрирует смещение пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике.

Смещение пятна изменяет засветки на фотоприемниках (1, 2, 3, 4) квадранта, и, следовательно, изменяются сигналы с них.

Этот метод удобен для измерения смещения пятна лазерного луча, поскольку элементы квадрантного фотоприемника изготовлены весьма точно [17]. Точность расположения диэлектрических линий, разделяющих фотоприемники при диаметре квадрантного фотоприемника $D = 1$ см, лучше $0,1$ мкм. Это позволяет использовать его в качестве стабильного репера при измерении смещения пятна лазерного луча. К недостаткам ПЧФУ на основе квадрантного фотоприемника следует отнести:

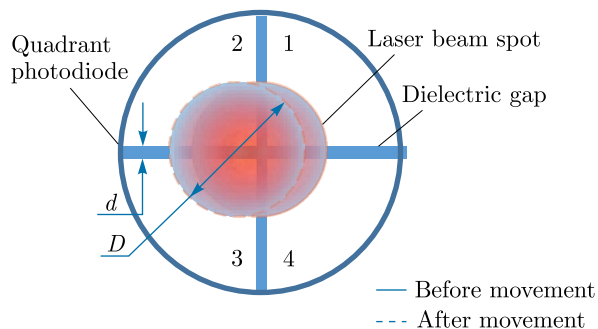


Рис. 2. Смещение пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике

— невозможность фокусировки лазерного луча в область с размерами менее $3d$, где d — размер диэлектрического промежутка. В этом случае диэлектрический промежуток отражает существенную часть мощности лазерного луча;

— наличие зон переменной позиционной чувствительности фотоприемников с размерами этих зон ≈ 10 мкм. Иными словами, при смещении пятна на квадрантном фотоприемнике возникает позиционный шум [18, 19].

Метод позиционно-чувствительного датчика (ПЧД). Этот метод основан на регистрации токового сигнала, пропорционального расстоянию между точкой засветки и электродом [20]. На рис. 3 показана принципиальная схема ПЧД.

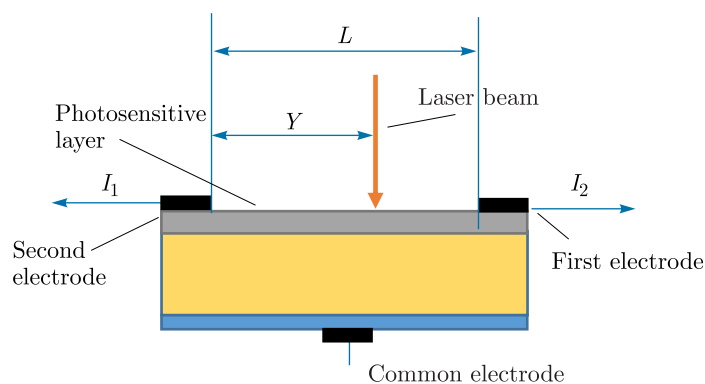


Рис. 3. Принципиальная схема ПЧД

Сфокусированный лазерный луч падает на светочувствительную площадку ПЧД. Ток I_1 , возникающий в первом электроде, пропорционален расстоянию Y между первым электродом и центром пятна лазерного луча. Соответственно, на втором электроде формируется сигнал I_2 , пропорциональный расстоянию $L-Y$ между вторым электродом и центром пятна лазерного луча, где L — расстояние между электродами ПЧД. При условии пропорциональности «токовый сигнал — расстояние между электродами» можно определить положение центра пятна лазерного луча.

Этот метод решает задачу регистрации больших смещений лазерного луча при относительно небольшом пространственном разрешении.

Для пятна лазерного луча с диаметром, который сравним с размерами неоднородности фоточувствительного слоя, при использовании ПЧД возникают дополнительные погрешности, что исключает его высокоточное применение. Точность регистрации положения пятна сфокусированного лазерного луча в ПЧД ограничена из-за позиционного шума фотоприемника [4].

Метод ССД-матрицы. Этот метод основан на регистрации пятна лазерного луча фотоприемниками ССД-матрицы и применим при условии регистрации достаточно большого по диаметру лазерного луча ($D > 5a$, где a — размер одного пикселя) (рис. 4).

В нашей работе [21] определены точности измерения положения центра лазерного луча при условии, когда диаметр лазерного пятна значительно больше размеров одного пикселя ССД-матрицы.

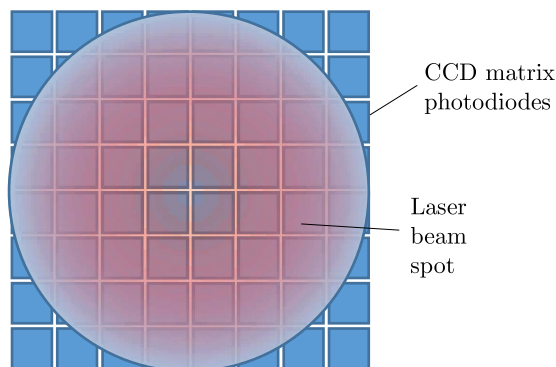


Рис. 4. Расположение пятна лазерного луча на CCD-матрице

Точность изготовления элементов CCD-матрицы ($\pm 0,01$ мкм) ограничивает точность измерения положения центра пятна лазерного луча. Это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на использование CCD-матрицы при прецизионной (лучше 10 нм) регистрации смещения пятна лазерного луча.

Метод делительных пластинок (ДП). Для более точного измерения смещения пятна лазерного луча в 1987 г. [16] был разработан уникальный позиционно-чувствительный метод ДП. Метод основан на перекрывании лазерного луча специальным зеркалом — делительной пластинкой [21].

Делительная пластинка — это плоскопараллельная (ПП) оптическая пластинка с нанесенной методом напыления металлической пленкой. Сторона контакта металлической пленки и ПП-пластинки прямолинейна (рис. 5).

Если расположить пятно лазерного луча на прямой линии, разделяющей металлический слой и оптическую пластинку, то мы получим два луча: один из них пройдет через ДП со стороны прозрачного стекла, а второй отразится от металлического слоя (рис. 6).

Таким образом, ДП разделит лазерный луч на два луча. При поперечном смещении первичного лазерного луча увеличится мощность одного луча и, соответственно, уменьшится мощность второго луча. При измерении фотодиодами PhD_1 и PhD_2 мощ-

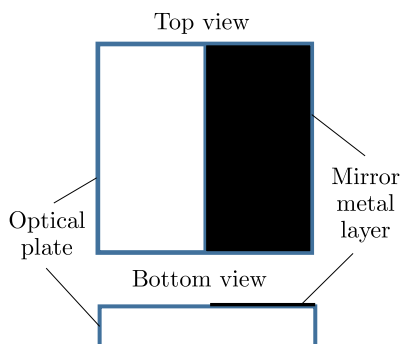


Рис. 5. Расположение металлического отражающего слоя на плоскопараллельной оптической пластинке

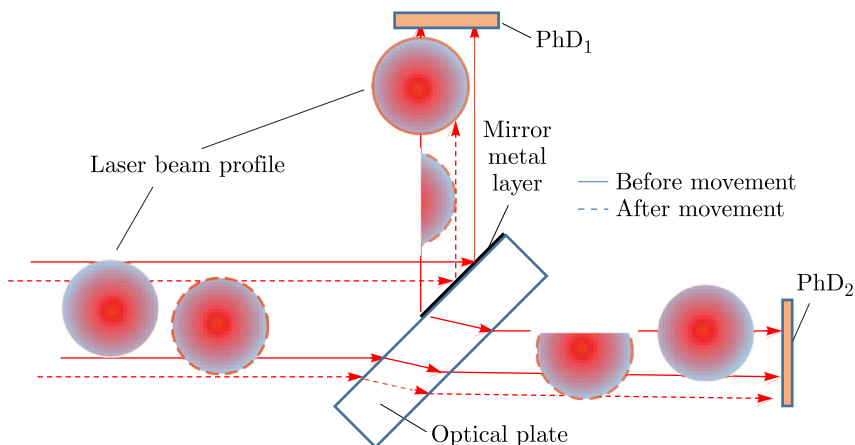


Рис. 6. Деление лазерных лучей ДП

ностей лазерных лучей и последующем вычитании сигналов с фотоприемников мы получим сигнал, пропорциональный удвоенному смещению лазерного луча.

Достоинство этого метода — в полном отсутствии позиционно-чувствительного эффекта. Деление на ДП происходит в фокусе лазерного луча на ее поверхности, которая имеет неоднородности значительно меньше длины волны света. Следовательно, влияние неоднородности поверхности ДП на результирующий сигнал смещения значительно уменьшается (рис. 7).

При использовании лазерного луча, сфокусированного на линию деления ДП, фотоприемники PhD_1 и PhD_2 регистрируют расфокусированные лазерные лучи с размерами значительно больше, чем неоднородности фоточувствительного слоя (влияние неоднородностей фоточувствительного слоя усредняется). Это уменьшает влияние позиционно-чувствительного эффекта фотоприемников на сигнал смещения пятна лазерного луча.

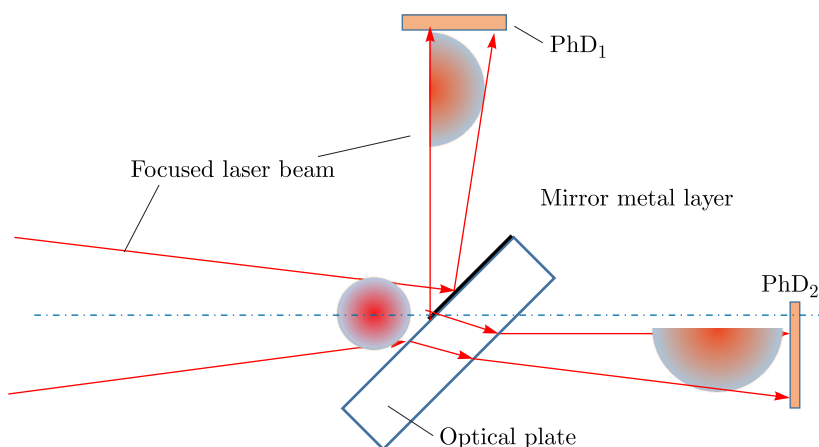


Рис. 7. Деление сфокусированного лазерного луча ДП

Таким образом, метод ДП свободен от присущих другим методам позиционных шумов и может быть использован в ПЛИ.

Рассмотрим зависимость сигнала с ПЧФУ в методе ДП от смещения одномодового лазерного луча.

Определение сигналов с ПЧФУ в методе ДП при смещении одномодового лазерного луча. Определим сигнал с фотоприемников в методе ДП.

В приложении 1 получена зависимость безразмерного сигнала K с фотоприемников от поперечного смещения α одномодового лазерного луча в случае ДП:

$$K = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right)}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — мощности лазерного излучения, падающего на фотоприемники R_{H1} и R_{H2} ; $U_1 - U_2$ — разность сигналов с фотоприемников; r — радиус одномодового лазерного луча; α — расстояние между центром лазерного луча и линией деления ДП; w — пределы интегрирования (w выбрано значительно больше диаметра лазерного луча и в численных расчетах принималось равным 300 мкм).

Определим зависимость безразмерного сигнала $K = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$ от смещения α и диаметра лазерного луча $D = 2r$.

На рис. 8 дана зависимость безразмерного сигнала K с фотоприемников от диаметра D лазерного луча и от его смещения α относительно линии деления на ДП.

Определим нелинейность β как разность сигнала $K = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$ и линейной аппроксимации функции K в точке $[0;0]$ в зависимости от смещения α пятна лазерного луча. На рис. 9 представлены эти разности, ограниченные выбранной нами величиной нелинейности $\beta = 0,01$.

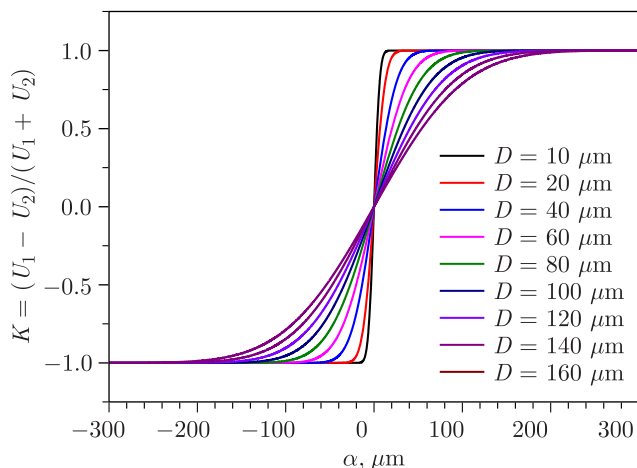


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Безразмерный сигнал K с фотоприемников в зависимости от диаметра D одномодового лазерного луча и его поперечного смещения α

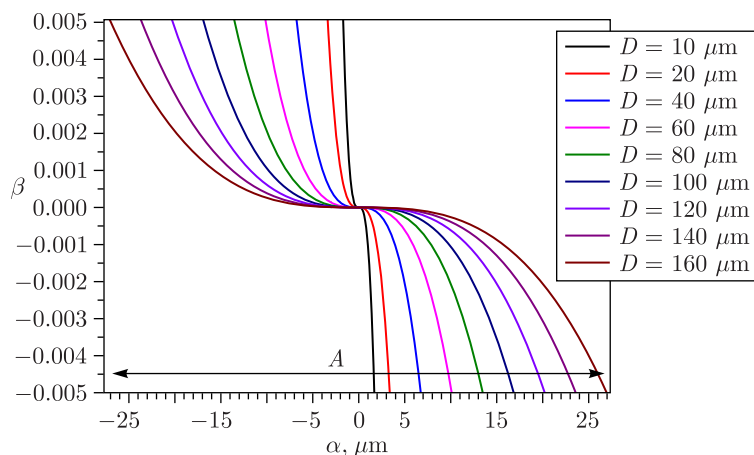


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Зависимость нелинейности β безразмерного сигнала K с фотоприемников от смещения α

Из рис. 9 видно, что зона смещений A лазерного луча с нелинейностью $\beta = 1\%$ уменьшается линейно с диаметром D лазерного луча.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментально исследованы ПЧФУ на основе ДП. Рассмотрим методику проведения экспериментов с ДП.

Изготовление ДП. Для создания ДП в качестве трафарета использовалось лезвие безопасной бритвы фирмы Gillette. На рис. 10 показана схема напыления слоя золота на оптическую пластинку.

Напыление золота (Au) методом магнетронного распыления проводилось на установке вакуумного напыления Kogvus HEX (ЛЯР ОИЯИ). Шесть стекол помещались на столик установки, который вращался со скоростью 10 об./мин. Распыление проводилось в вакууме (10^{-4} мбар). Для создания плазмы использовался инертный газ гелий со скоростью потока 20 мл/ч. Напряжение на распылителе составило 450 В при токе 55 А. Итоговая толщина слоя золота на каждой пластинке составила $\approx 0,13$ мкм.

Измерение сигнала смещения одномодового лазерного луча от гелий-неонового лазера методом ДП. Для апробации методики измерения смещения ДП проведен эксперимент с использованием гелий-неонового лазера. Основная цель эксперимента — определение зоны линейных смещений для одномодового лазерного луча и точности измерения положения центра лазерного луча.

На рис. 11 показана схема эксперимента.

В эксперименте использовался гелий-неоновый лазер (Thorlabs) [22] с диаметром D выходного луча, равным 0,48 мм. Луч подавался на ДП так, чтобы часть луча отражалась на фотоприемник PhD_1 , а вторая часть проходила бы через пластинку и попадала на PhD_2 . Пьезоэлектрическим позиционером ДП перемещалась поперек луча с шагом 10 мкм, и измерялись сигналы U_1 и U_2 с PhD_1 и PhD_2 . Измерения проводились путем непрерывной с временным интервалом 0,1 с подачи сигналов на

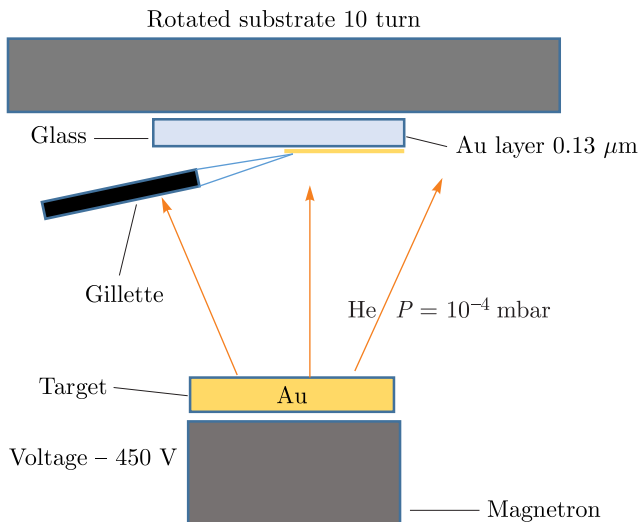


Рис. 10. Схема напыления слоя золота на оптическую пластинку

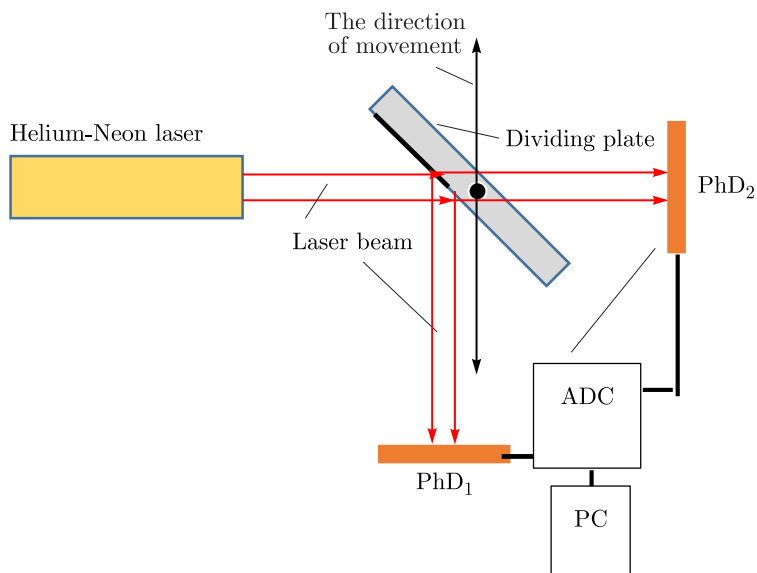
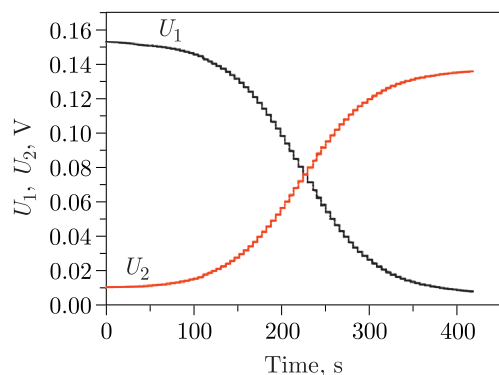
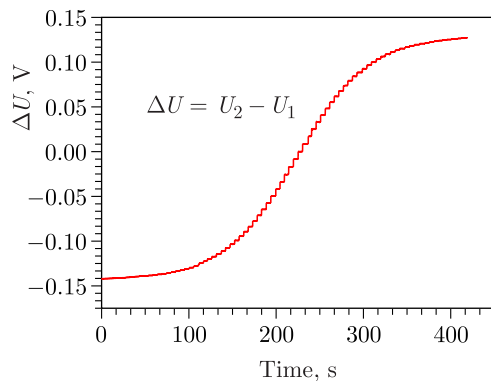
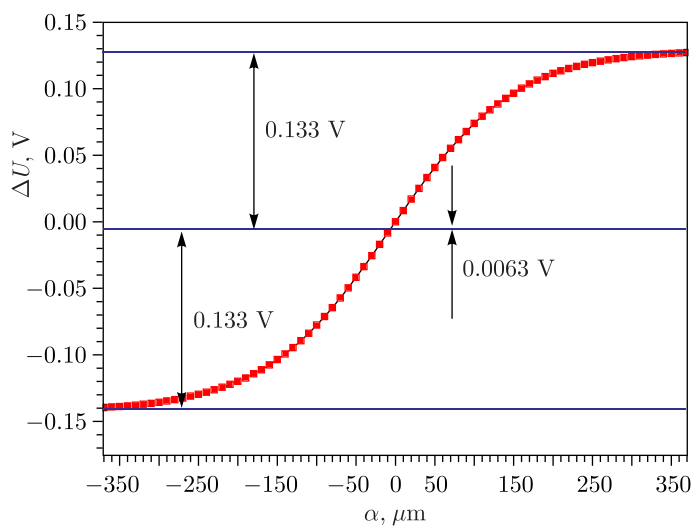


Рис. 11. Схема эксперимента по регистрации сигналов с ПЧФУ на основе ДП с использованием гелий-неонового лазера

24-битный АЦП (DT-9824), а затем регистрировались в компьютере. На рис. 12 показана запись измеренных сигналов U_1 и U_2 . Разность сигналов с PhD_1 и PhD_2 определяет сигнал смещения $\Delta U = U_2 - U_1$ (рис. 13).

Учитывая, что шаг смещения ДП 10 мкм, пересчитаем данные графика рис. 13 в зависимости ΔU от смещения α ДП (рис. 14).

Рис. 12. Измеренные сигналы U_1 и U_2 с ПЧФУ с ДПРис. 13. Сигнал смещения ΔU Рис. 14. Зависимость сигнала ΔU от смещения α ДП

Как видно из рис. 14, симметричное расположение сигнала смещено от уровня $\Delta U = 0$ на величину $0,0063$ В. Это обусловлено дополнительными отражениями от оптической пластинки, а также не 100%-м отражением от металлической (Au) отражающей части пластинки. Как видно, это смещение находится в линейной части графика рис. 14 и не влияет на точность измерения методом ДП.

Из данных на рис. 15 определим по методике приложения 2 диаметр D гелий-неонового лазерного луча, установленного на линии деления ДП. Из рисунка видно: диаметр лазерного луча D на линии деления ДП равен (470 ± 4) мкм, что соответствует паспортным значениям.

Теперь пересчитаем данные графика рис. 14 в зависимости относительного сигнала $K = (\Delta U)/(U_1 + U_2)$ от смещения α (рис. 15).

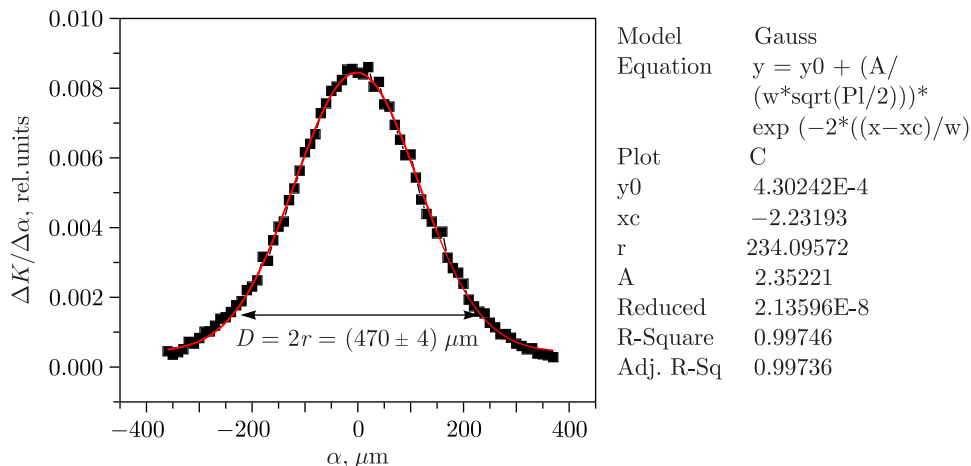


Рис. 15. Определение диаметра $D = 2r$ гелий-неонового лазерного луча

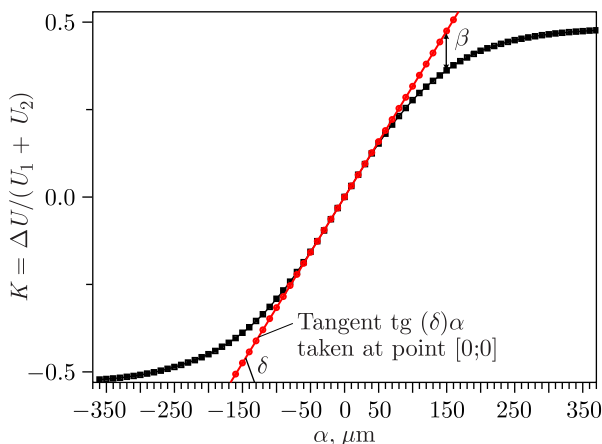


Рис. 16. Определение зоны линейной зависимости сигнала K от смещения α ДП

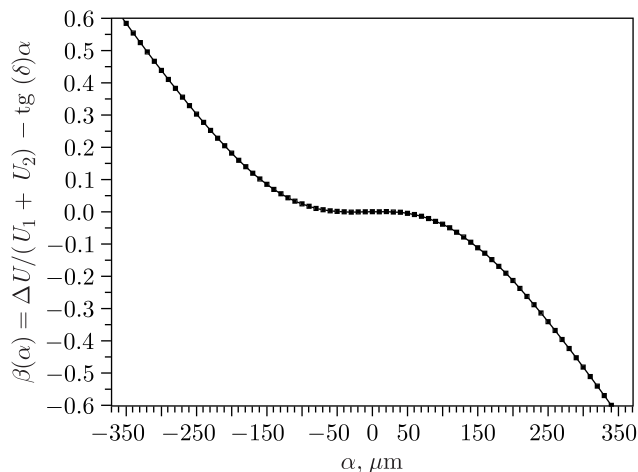
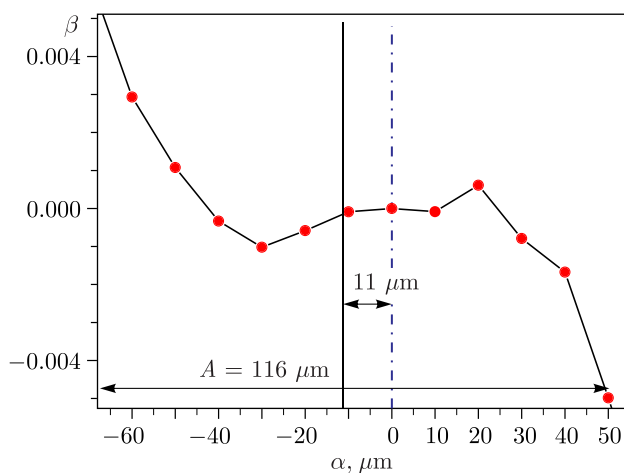
Теперь мы можем определить расстояние β между касательной в точке $[0;0]$ и экспериментальным графиком на рис. 16.

Вычисляя разницу между значением $K = (\Delta U)/(U_1 + U_2)$ и значением касательной $\text{tg}(\delta)\alpha$ в точке $\alpha = 0$, введем величину нелинейности β сигнала в зависимости от смещения α ДП (рис. 17):

$$\beta(\alpha) = \frac{\Delta U}{U_1 + U_2} - \text{tg}(\delta)\alpha. \quad (2)$$

Определим чувствительность T метода ДП как отношение изменения безразмерного сигнала ΔK к смещению $\Delta\alpha$ в районе точки $[0;0]$:

$$T = \text{tg}(\delta) = \frac{\Delta K}{\Delta\alpha}. \quad (3)$$

Рис. 17. Зависимость нелинейности сигнала β от смещения α ДПРис. 18. Зона смещений A пятна лазерного луча, соответствующая линейным изменениям сигнала K с нелинейностью $\beta = 1\%$, в методе ДП

Определим зону линейных смещений A пятна лазерного луча (ограничена нелинейностью $\beta = 0,01$) для данных, представленных на рис. 18.

Как видно из графика рис. 18, зона A линейных смещений для одномодового гелий-неонового лазерного луча диаметром 470 мкм в методе ДП составляет 116 мкм. Несимметричности сигналов с фотоприемников (ранее показаны на рис. 14), связанные с дополнительными отражениями, незначительны (11 мкм) и находятся в области линейной зависимости сигнала K от смещения α ДП.

Мы измерили смещение пластинки 10 раз и вычислили для каждого β_i ($i = 1-75$, где 75 — количество точек измерения смещения пластинки) среднее значение $\beta_{\text{среднее}}$ и величину среднеквадратичного отклонения σ .

На рис. 19 показаны результаты вычислений $\beta_{\text{среднее}}(\alpha)$ с погрешностями $\sigma(\alpha)$ для нелинейности $|\beta| \leq 0,01$ в зависимости от смещения α . Видно, что минимальная

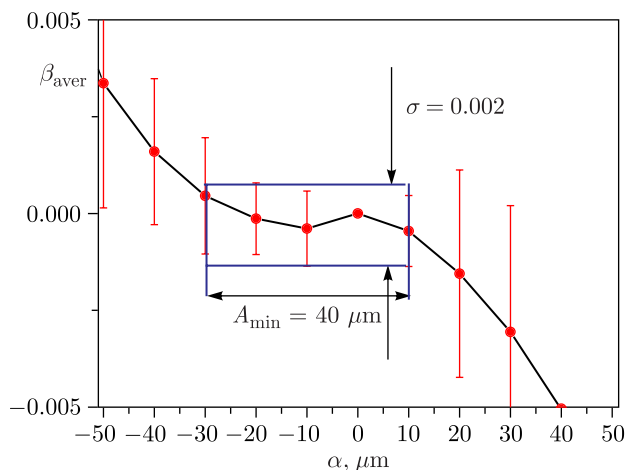


Рис. 19. Определение среднеквадратичной величины σ минимальной нелинейности и диапазона смещений A_{\min} в методе ДП

нелинейность метода позволяет измерять смещения до $A_{\min} = 40$ мкм с среднеквадратичной величиной $\sigma = 0,002$.

Определим чувствительность T метода ДП для случая гелий-неонового лазера (3). Для экспериментальной зависимости сигнала K от α (рис. 16), полученной для несфокусированного пучка гелий-неонового лазера, экспериментальная чувствительность равна $T = 0,0084$ мкм⁻¹.

Таким образом, при смещении $\alpha = 1$ мкм одномодового лазерного пучка диаметром 470 мкм сигнал K изменится на 0,84%. Поскольку разрешение 24-битных АЦП достигает 10^{-5} , можно говорить о возможности измерения смещения на уровне 1,2 нм.

Итак, метод ДП позволил измерить смещение лазерного луча миллиметрового диаметра с нанометровой точностью.

Измерение сигнала смещения сфокусированного одномодового лазерного луча полупроводникового лазера с оптоволоконным выходом. В ПЛИ для увеличения чувствительности используется фокусировка лазерного луча.

Существует ограничение на минимальный диаметр D_f используемого пятна сфокусированного лазерного луча, связанное с наличием диэлектрического промежутка 30 мкм между фотоприемниками квадранта. Минимальный диаметр лазерного луча, который может быть использован в этом случае, $D_f \approx 100$ мкм [21]. Такое ограничение не дает возможность увеличить чувствительность ПЛИ и уменьшить его габаритные размеры. Ограничение на уменьшение диаметра лазерного луча убирается методом ДП.

Для определения отклика ПЧФУ в методе ДП проведен эксперимент с диаметром лазерного луча $D = 9$ мкм и найден диапазон смещений A пятна луча, в котором наблюдается допустимая нами нелинейность $\beta = 1\%$. На рис. 20 показана схема эксперимента.

Лазер с волоконным выходом при помощи коллиматора подает сколлимированный лазерный луч на линзу, которая фокусирует его на линию деления ДП. После коллиматора диаметр лазерного луча $D = 6,8$ мм, его фокусировка осуществляется

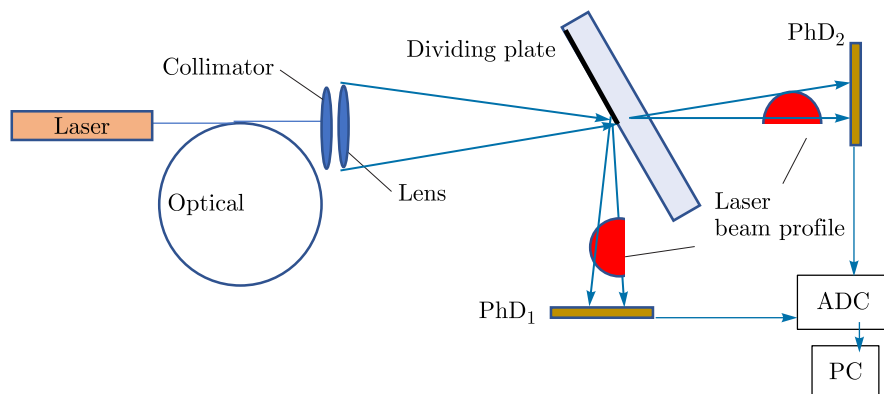


Рис. 20. Схема эксперимента с фокусировкой лазерного луча на ДП

оптической линзой с фокусом $F = 7,5$ см. Диаметр фокусного пятна определяется по формуле

$$D_f = \frac{4 F}{\pi D} \quad (4)$$

и равен 9 мкм.

После деления часть лазерного луча проходит через ДП и регистрируется фотоприемником PhD_2 , вторая часть лазерного луча, отраженная от металлического зеркала ДП, регистрируется фотоприемником PhD_1 . Сигналы с фотоприемников регистрируются АЦП и записываются в компьютере.

Во время эксперимента ДП смещается поперек лазерного луча с шагом 0,1 мкм при помощи пьезоэлектрического позиционера NEWPORT [23]. Схема измерений в эксперименте такая же, как и в предыдущем эксперименте с гелий-неоновым лазером.

На рис. 21 показаны измеренные безразмерные сигналы K с фотоприемников в зависимости от смещения α ДП.

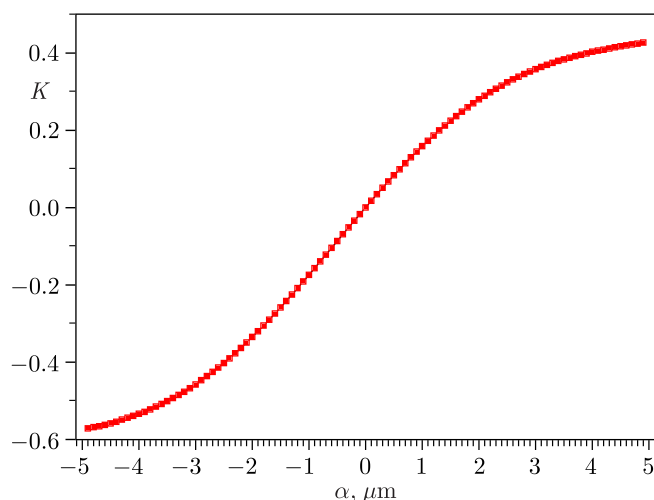


Рис. 21. Зависимость безразмерного сигнала K с фотоприемников от смещения α ДП

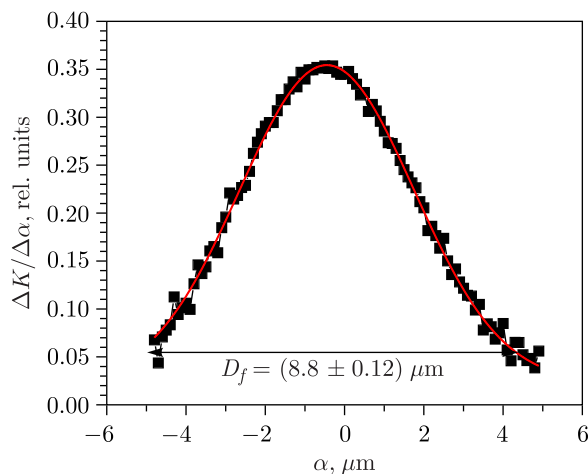


Рис. 22. Определение диаметра D_f сфокусированного одномодового лазерного луча

По методике приложения 2 определим диаметр D_f сфокусированного лазерного луча (рис. 22). Как видно из рис. 22, диаметр сфокусированного лазерного луча на линии деления ДП равен $D_f = (8,8 \pm 0,12)$ мкм.

Зависимость нелинейности β от смещения α ДП показана на рис. 23 (аналогичный график см. на рис. 17).

Оценим минимальную нелинейность β и соответствующий диапазон A смещений α ДП.

На рис. 24 показан участок графика, ограниченный изменением нелинейности $\beta = 1\%$. Видно, что диапазон A смещений α с нелинейностью $\beta = 1\%$ равен $A = 2,4$ мкм. Зона малой нелинейности ($\beta_{\min} \approx 0,18\%$) соответствует диапазону $A_{\min} = 1,8$ мкм.

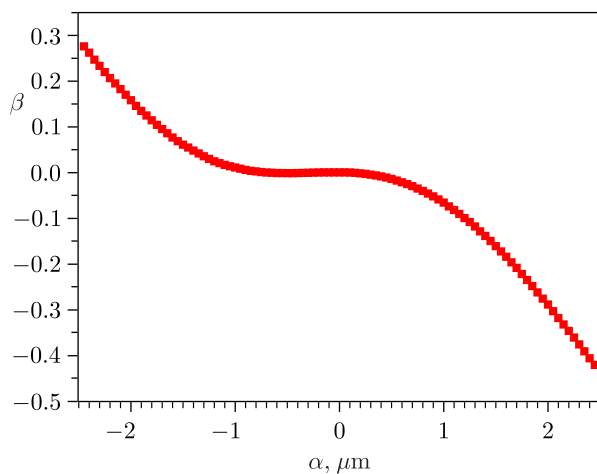


Рис. 23. Зависимость нелинейности β от смещения α ДП при диаметре фокусного пятна $D_f = 8,8$ мкм

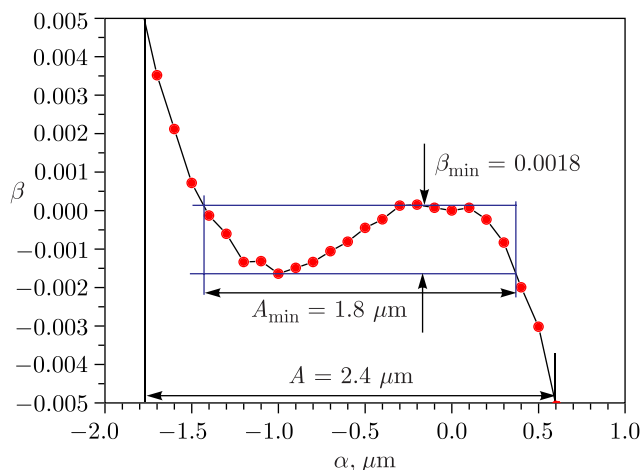


Рис. 24. Определение минимальной нелинейности β_{\min} в методе ДП для лазерного луча диаметром $D_f = 8,8$ мкм

По данным графика рис. 21 определим чувствительность T метода ДП при регистрации смещения α одномодового лазерного луча диаметром $D_f = 8,8$ мкм. Она составила $T = 0,173 \mu\text{m}^{-1}$. При относительном разрешении АЦП $\approx 10^{-5}$ шумы измерения смещения пятна диаметром 8,8 мкм сфокусированного одномодового лазерного луча составят $\pm 0,030$ нм.

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНИИ ДЕЛЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В МЕТОДЕ ДП

При изготовлении ДП в качестве затеняющего объекта используется безопасная бритва. На рис. 10 приведена схема изготовления ДП. На рис. 25 показано острие безопасной бритвы Wilkison Sword [24]. Непрямолинейность острия безопасной бритвы является фактором, ограничивающим чувствительность метода ДП.

Непрямолинейность острия лезвия η на длине 1 мкм нами понимается как максимальное отклонение острия лезвия от аппроксимирующей прямой линии и оценивается 0,1 мкм.

Изготовленная ДП повторяет контур лезвия. Определим величину шума на фотоприемниках при смещении лазерного луча в зависимости от непрямолинейности η .

При поперечном к линии деления смещении α лазерного луча шума не возникает, поскольку форма линии деления не изменяется (рис. 26). Шум возникает только при вертикальном смещении n лазерного луча относительно линии деления (рис. 27).

Смещение α пятна лазерного луча на ДП изменяет засветки на фотоприемниках. Величина сигнала при смещении α в поперечном направлении пропорциональна удвоенной площади S_0 . Как видно из рис. 26, S_0 зависит только от величины смещения α и, следовательно, в этом случае непрямолинейность не будет влиять на величину сигнала.

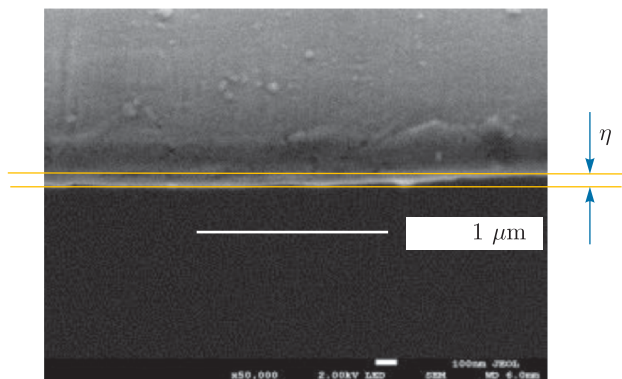


Рис. 25. Острие безопасной бритвы

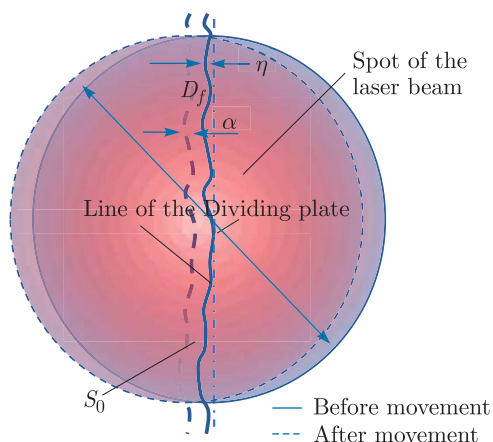


Рис. 26. Определение величины шума, связанного с непрямолинейностью η линии деления, при поперечном смещении α лазерного луча

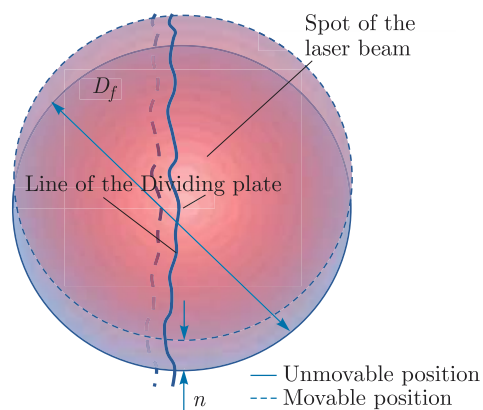


Рис. 27. Определение величины шума, связанного с непрямолинейностью линии деления, при вертикальном смещении n лазерного луча

При смещении в продольном направлении лазерного луча появляется сигнал изменения засветки фотоприемников. Это изменение связано с изменением величины отражения мощности одномодового лазерного излучения при его смещении на ДП.

Численный расчет в приложении 4 показал:

— при диаметре лазерного луча $D_f = 10$ мкм, величине непрямолинейности $\eta = 0,1$ мкм и при продольном смещении лазерного луча $n = 0,1$ мкм изменение мощности отраженного луча от линии деления составит $\delta P = P 5,8 \cdot 10^{-7}$;

— относительная величина изменения сигнала $\delta P/P = 5,8 \cdot 10^{-7}$ значительно меньше величины ранее принятого разрешения АЦП $\approx 10^{-5}$. Таким образом, при использовании линии деления с параметром нелинейности $\eta = 0,1$ мкм шум, связанный с непрямолинейностью линии деления, незначителен.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевое достижение применения позиционно-чувствительного фотометрического метода ДП в ПЛИ заключается в возможности фокусировки лазерного излучения в малую область, близкую нескольким микронам. При этом сохраняется линейная позиционно-чувствительная регистрация сигналов в ПЧФУ. Опыт показывает: такая регистрация имеет место до диаметра лазерного луча 8,8 мкм (см. рис. 21).

Такая фокусировка при начальном диаметре лазерного луча $D_f = 6$ мм позволяет получить длину фокуса лазерного луча 7,5 см. Столь значительное уменьшение фокуса резко сокращает габариты установки, где используется ПЧФУ ДП. Применение ПЧФУ ДП в ПЛИ уменьшило габариты и вес устройства до $20 \times 20 \times 20$ см и 10 кг.

Эксперимент показал: при смещении пятна лазерного луча на 1 мкм удается достигнуть нелинейности 0,1% при расстоянии 0,1 м от точки отражения лазерного луча, расположенной на поверхности жидкости, до ПЧФУ; диапазон измерений углов наклона поверхности Земли составляет 10 мкрад с систематическими ошибками 10^{-8} рад, связанными с нелинейностью измерений.

Таким образом, ПЛИ может работать в широком диапазоне углов наклона с линейной регистрацией сигналов. *Подобное достижение позволит создать системы угловой сейсмоизоляции физических установок, которые смогут уменьшить влияние микросейсмов вплоть до 10^{-8} рад.*

Обычный уровень угловых наклонов земной поверхности, вызванный поверхностными волнами, составляет порядка 0,1–1 мкрад [1]. Таким образом, ожидаемое уменьшение влияния микросейсмов может достигнуть 30–100 раз.

Эксперименты с различными диаметрами лазерных лучей (рис. 14, 16, 21, 23), регистрируемые методом ДП, показали отсутствие эффектов, связанных с дифракцией на краю ДП. Мы полагаем, что в отраженном и пропущенном лазерных лучах (рис. 6) эффекты, связанные с дифракцией на краю, равны. При вычислении разностного сигнала с фотоприемников эти эффекты взаимно вычитаются. Обнаруженная особенность позволяет использовать метод ДП вплоть до достигнутого нами диаметра лазерного луча 8,8 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ДП показал себя как оригинальный новый способ прецизионного определения смещения лазерного луча.

Основное достоинство метода, обнаруженного нами, — способность работать с сфокусированным до нескольких микрон лазерным лучом.

Это открыло возможность использовать относительно небольшую длину фокусного расстояния и решило проблему малогабаритной компоновки оборудования в ПЛИ. Такая возможность позволяет получить дизайн ПЛИ с габаритным размером $20 \times 20 \times 20$ см и весом 10 кг.

В ПЧФУ при методе ДП значительно уменьшено влияние позиционных шумов фотоприемника при регистрации смещения лазерного луча: при экспериментальных измерениях смещения лазерного луча не обнаружены эффекты позиционной чувствительности фотоприемников. Более того, в ПЧФУ при методе ДП не наблюдается

влияния дифракционных эффектов на линейность сигнала при использовании фокусировки вплоть до диаметра лазерного луча 88 мкм.

Было показано отсутствие влияния непрямолинейности ($< 0,5$ мкм) линии деления на результаты измерения смещения лазерного луча.

Для одномодового гелий-неонового лазера с диаметром лазерного луча 470 мкм чувствительность метода составила $0,0084$ мкм⁻¹. Зона линейных смещений лазерного луча с допущенной нелинейностью 1% — 116 мкм.

Для одномодового лазера с волоконным выводом с диаметром фокуса 8,8 мкм чувствительность метода составила $0,17$ мкм⁻¹ и зона линейных смещений, ограниченная нелинейностью 1%, есть 2,4 мкм.

Показано, что в методе ДП достигнута нелинейность 0,2% при регистрации смещения лазерного луча.

Приложение 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ, ПАДАЮЩЕЙ НА ФОТОПРИЕМНИКИ, ОТ СМЕЩЕНИЯ ОДНОМОВОДОГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В МЕТОДЕ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ

При делении лазерного луча делительной пластинкой необходимо определить сигнал разности с двух фотоприемников, на которые направляются пропущенная и отраженная части лазерного луча. На рис. 28 показан профиль одномодового лазерного луча диаметром 200 мкм, разделенного на две части делительной пластинкой.

Определим относительную разность мощностей лазерных лучей, падающих на фотоприемники PhD₁ и PhD₂ (см. рис. 11).

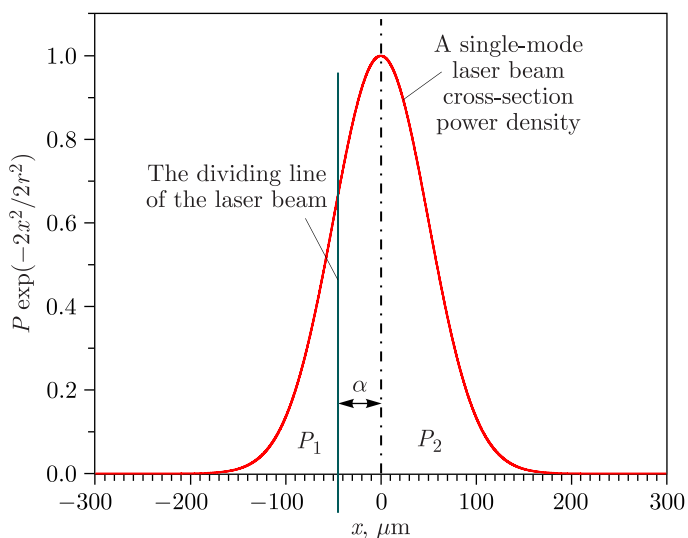


Рис. 28. Разделение одномодового лазерного луча диаметром 200 мкм делительной пластинкой

Определим мощность P_1 лазерного луча, пропущенную делительной пластинкой, и отраженную мощность P_2 , показанные на рис. 28:

$$P_1 = \frac{2P}{\pi r^2} P_y P_x = \frac{2P}{\pi r^2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2y^2}{r^2}\right) dy \right) \int_{-w}^a \exp\left(-2\frac{x^2}{r^2}\right) dx =$$

$$= P \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) \right\},$$

$$P_2 = \frac{2P}{\pi r^2} P_y P_x = \frac{2P}{\pi r^2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2y^2}{r^2}\right) dy \right) \int_{\alpha}^w \exp\left(-2\frac{x^2}{r^2}\right) dx =$$

$$= P \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) \right\},$$

$$P_1 - P_2 = P \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) + \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) \right\} = P \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right), \quad (5)$$

$$P_1 + P_2 = P \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) \right\} = P \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right),$$

$$\frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right)}.$$

Здесь P — мощность лазерного луча; α — расстояние между центром лазерного луча и линией деления делительной пластинки; r — радиус одномодового лазерного луча; $w = 300$ мкм в пределах интегрирования. Величина w выбрана для учета всей мощности одномодового лазерного луча.

Приложение 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Из зависимости безразмерного сигнала фотоприемников (см. рис. 8) от поперечного смещения α лазерного луча определим различия сигнала $\Delta K_{(n;n+1)}$ в соседних интервалах α_n и α_{n+1} (рис. 29).

Для этого мы вычтем значение сигнала, посчитанное по формуле приложения 1 (5) и соответствующее номеру n , из значения сигнала, соответствующего следующему номеру $n + 1$. На рис. 30 показана зависимость указанных различий сигналов от смещения α для одномодового лазерного луча диаметром $D_f = 60$ мкм.

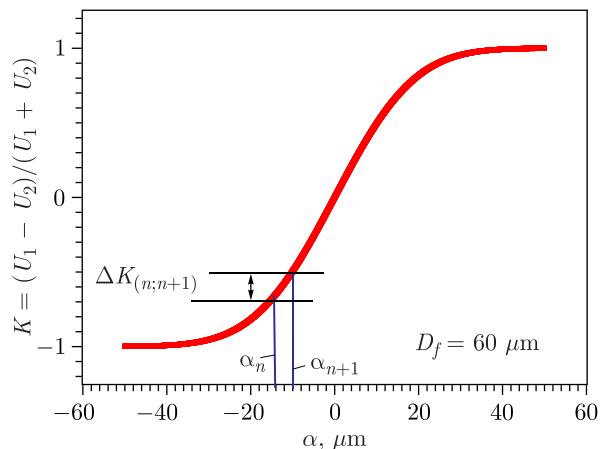


Рис. 29. Определение различия сигнала $\Delta K_{(n;n+1)}$ в соседних значениях α_n и α_{n+1}

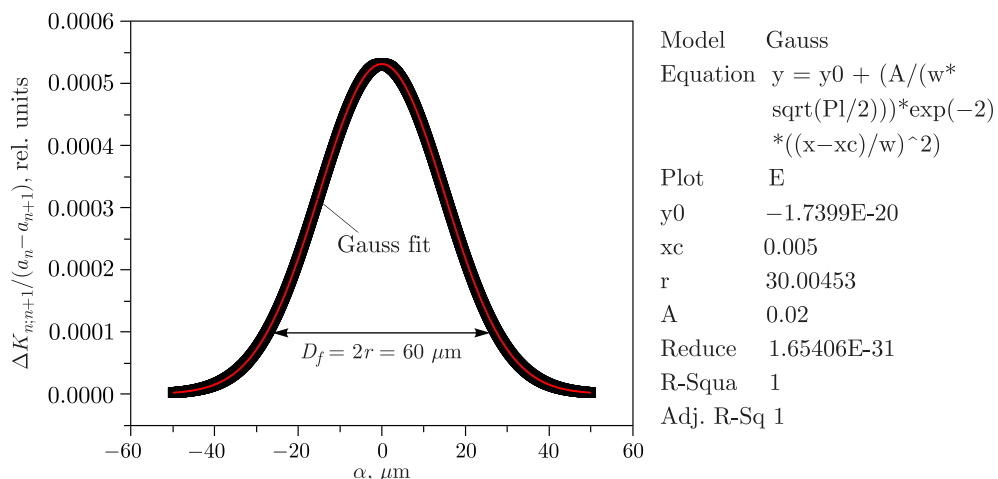


Рис. 30. Зависимость различия сигнала $\Delta K_{n;n+1}/(\alpha_n - \alpha_{n+1})$ от смещения α

Полученные данные аппроксимируются распределением Гаусса, как и ожидалось, из дифференцирования сигмоды с шириной $D_f = 60$ мкм и соответствуют начальным условиям (см. рис. 28).

Таким образом, используя эту методику, можно по *экспериментальным данным* зависимости безразмерного сигнала K с фотоприемников делительной пластинки от смещения α определить диаметр D_f пятна лазерного луча.

Приложение 3

ЗАВИСИМОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ ОТ ДИАМЕТРА СФОКУСИРОВАННОГО ПЯТНА ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Используя определение чувствительности метода делительных пластинок как отношение изменения безразмерного сигнала ΔK к смещению $\Delta \alpha$ в районе точки $[0;0]$,

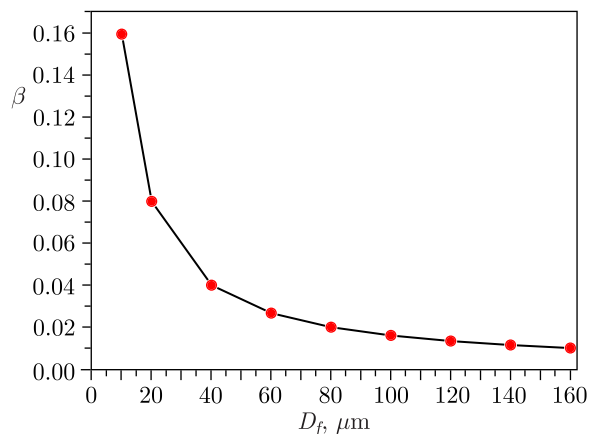


Рис. 31. Зависимость расчетной чувствительности T метода делительной пластинки от диаметра D_f лазерного луча

по формуле (3) определим расчетное значение чувствительности T для различных диаметров лазерного луча на основании графика рис. 8. На рис. 31 показана расчетная чувствительность T метода делительной пластинки в зависимости от диаметра D_f лазерного луча.

Приложение 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШУМОВ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ЛИНИИ ДЕЛЕНИЯ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СМЕЩЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Как видно из рис. 25, линия деления делительной пластинки отклоняется от прямолинейности на 0,1 мкм на длине 1 мкм. При продольном смещении (рис. 32) одномодового лазерного луча вдоль линии деления непрямолинейность линии деления скажется на сигнале K с ПЧФУ в методе делительной пластинки. Это связано с изменением условий отражения одномодового лазерного луча при его смещении.

Оценим величину изменения сигнала K при продольном смещении лазерного луча.

На рис. 32 показано расположение пятна одномодового лазерного луча на делительной пластинке с не прямой линией деления.

Делительная полоса представляет собой зону неоднородного покрытия металла шириной η . Для расчетов определим делительную полоску шириной η и длиной $L_0 = 2D_f$, в которой находится линия деления.

Разбив полоску на квадраты $\eta \times \eta$, мы получим $N = (2D_f)/\eta$ квадратов. Каждый квадрат частично напылен металлом. На рис. 33 показан участок делительной полоски делительной пластинки с напыленным металлом шириной 0,1 мкм. Определим при помощи случайных чисел последовательность от 0 до 0,1 мкм в количестве N , которая характеризует степень покрытия металлом квадратов полоски.

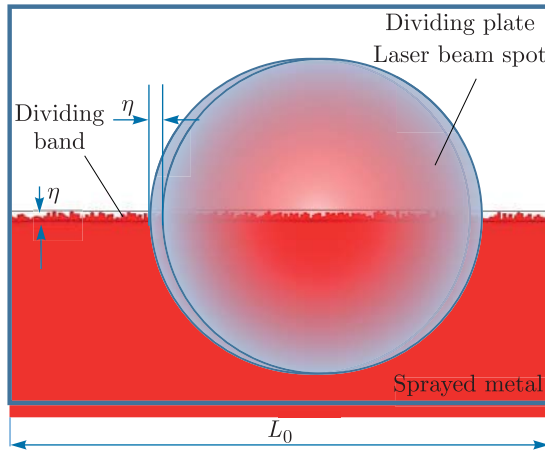


Рис. 32. Расположение пятна лазерного луча на делительной пластинке

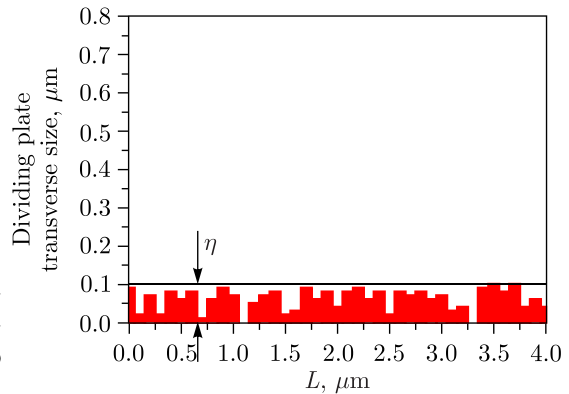


Рис. 33. Участок линии деления делительной пластинки с покрытием металла, которое изменяется случайно от 0 до η ($\eta = 0,1$ мкм) на длине L

При использовании лазерного источника с прямоугольным распределением мощности отражение лазерного излучения от квадратов делительной полоски будет пропорционально площади частичного напыления металлом в каждом квадрате.

На рис. 34 показано изменение отраженной мощности лазерного излучения с прямоугольным распределением мощности от делительной полоски.

При использовании лазерного луча с гауссовым распределением мощности в его сечении величина отраженной мощности в квадратах делительной полоски будет зависеть от их положения в сечении одномодового луча и от величины покрытия металлом в квадратах.

По формуле (5) определим отношение K мощности $P_1 - P_2$, падающей на полоску $\eta \cdot 2D_f$, ко всей мощности P лазерного луча:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\mu\sqrt{2}}{r}\right)}{\operatorname{erf}(2\sqrt{2})}. \quad (6)$$

Из формулы (6) определим относительную мощность, отраженную от покрытой металлом делительной полоски. На рис. 35 показано отражение мощности одномодового

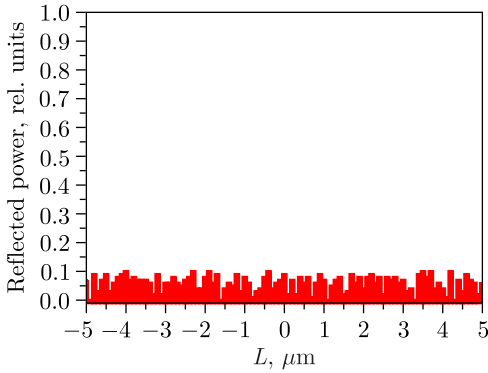


Рис. 34. Изменение отраженной мощности лазерного излучения с прямоугольным распределением мощности от делительной полоски

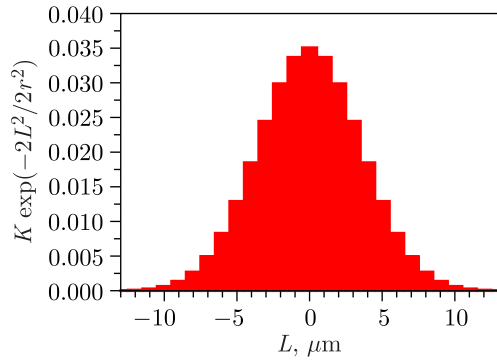


Рис. 35. Отражение одномодового лазерного луча диаметром $D_f = 10$ мкм от делительной полоски длиной 20 мкм и шириной 1 мкм с разбиением на квадраты 1×1 мкм

лазерного луча диаметром $D_f = 10$ мкм от делительной полоски, покрытой металлом, при условии что отраженная относительная суммарная мощность равна K . Делительная полоска длиной $L_0 = 20$ мкм (см. рис. 32) и шириной $\eta = 1$ мкм разбита на квадраты 1×1 мкм.

Каждый элемент делительной полоски частично покрыт металлом, его отражательная способность зависит от площади покрытия металлом. Определим при помощи случайных чисел от 0 до 1 степень покрытия металлом квадратов полоски. Такое приближение позволяет оценить эффект отражения лазерного луча от не прямой линии деления. Перемножив последовательность случайных чисел с величиной отражения мощности одномодового лазерного луча от полоски, покрытой металлом, получим отражение луча от не прямой линии деления. На рис. 36 показан вид отражения мощности одномодового лазерного луча от не прямой линии деления.

Сместим одномодовый лазерный луч на расстояние 1 мкм вдоль полоски деления, определим отражение смещенного лазерного луча (рис. 37).

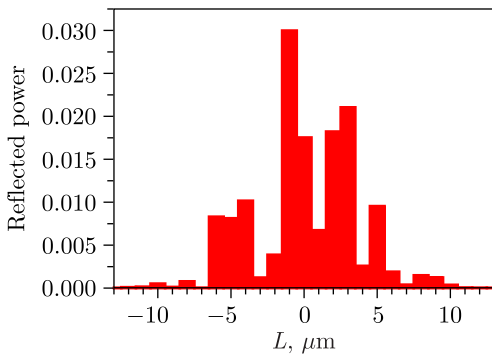


Рис. 36. Отраженная мощность одномодового лазерного луча от не прямой линии деления

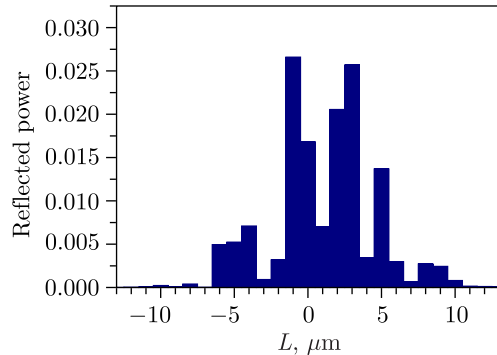


Рис. 37. Отраженная мощность смещенного на 1 мкм одномодового лазерного луча от не прямой линии деления

Введем отраженную суммарную мощность до сдвижки лазерного луча — K_1 и после — K_2 (см. рис. 36). Вычитая мощность K_1 из K_2 , получаем изменение относительной мощности $\Delta K = K_1 - K_2$ за счет непрямолинейности линии деления делительной пластинки.

Проведен расчет для двух случаев:

1. Для непрямолинейности $\eta = 1$ мкм и сдвижки лазерного луча на расстояние 1 мкм изменение относительной мощности составит $\Delta K = 1,3 \cdot 10^{-3}$.

2. Для непрямолинейности $\eta = 0,1$ мкм (соответствующей непрямолинейности бритвенного лезвия (см. рис. 25)) и сдвижки лазерного луча на расстояние 0,1 мкм изменение относительной мощности составит $\Delta K = 5,8 \cdot 10^{-7}$.

ГЛОССАРИЙ

γ — угол наклона земной поверхности.

1, 2, 3, 4 — фотоприемники в квадрантном фотоприемнике.

D — диаметр лазерного луча.

d — ширина диэлектрического промежутка в квадрантном фотоприемнике.

L — ширина позиционно-чувствительного датчика.

I_1, I_2 — токи с позиционно-чувствительного датчика.

Y — расстояние между первым электродом и центром пятна лазерного луча на позиционно-чувствительном датчике.

a — размер пикселя в CCD-матрице.

PhD₁, PhD₂ — фотоприемники в методе делительной пластинки.

P — мощность лазерного луча.

α — расстояние между центром лазерного луча и линией деления делительной пластинки.

r — радиус одномодового лазерного луча.

$w = 300$ мкм в пределах интегрирования.

P_1 — мощность лазерного луча, пропущенная делительной пластинкой.

P_2 — отраженная от делительной пластинки мощность лазерного луча.

ПЧФУ — позиционно-чувствительное фотоприемное устройство.

ДП — делительная пластинка.

U_1, U_2 — сигналы с фотоприемников PhD₁, PhD₂.

$K = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}$ — безразмерный сигнал.

β — нелинейность безразмерного сигнала K в методе делительной пластинки.

$\Delta U = U_2 - U_1$ — сигнал смещения.

δ — угол касательной к сигмоиде в точке с $\alpha = 0$.

ΔK — изменения безразмерного сигнала.

$\Delta \alpha$ — смещение лазерного луча в районе точки [0;0].

T — чувствительность метода делительных пластинок.

A — зона линейных смещений пятна лазерного луча на делительной пластинке.

D_f — диаметр сфокусированного лазерного луча.

F — длина фокуса линзы.

η — непрямолинейность острия лезвия.

S_0 — площадь, возникающая при смещении α лазерного луча на линии деления делительной пластинки.

n — смещение пятна лазерного луча на делительной пластинке в поперечном направлении.

Благодарности. Авторы благодарны В. А. Беднякову за неизменную поддержку работ по лазерной метрологии и Н. В. Аксенову за помощь в изготовлении делительных пластинок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Seletsky A., Trubnikov G., Di Girolamo B., Gayde J.-C., Mergelkuhl D. Professional Precision Laser Inclinator: The Noises Origin and Signal Processing // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 3. P. 264–276.
2. Azaryan N., Budagov J., Lyablin M., Pluzhnikov A., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D. The Compensation of the Noise Due to Angular Oscillations of the Laser Beam in the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 6. P. 930–938.
3. Azaryan N., Budagov J., Gayde J.-Ch., Di Girolamo B., Glagolev V., Lyablin M., Mergelkuhl D., Shirkov G. The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 1. P. 112–122.
4. Budagov J., Di Girolamo B., Lyablin M. The Compact Nanoradian Precision Laser Inclinator — An Innovative Instrument for the Angular Microseismic Isolation of the Interferometric Gravitational Antennas // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 7. P. 916–930.
5. Budagov J., Di Girolamo B., Lyablin M. The Method of Temperature Resistivity Creation of the Compact Precision Laser Inclinator // Ibid. P. 931–937.
6. Binnig G., Quate C. F., Gerber C. Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56, No. 9. P. 930.
7. Eaton P., West P. Atomic Force Microscopy. Oxford: Oxford Univ. Press, 2010.
8. Giessibl F. Atomic Resolution of the Silicon (111)-(7 × 7) Surface by Atomic Force Microscopy // Science. 1995. V. 267, No. 5194. P. 68–71.
9. Vera-Marquina A., Diaz Sanchez A., Miguel Rocha-Pérez J., Berman-Mendoza D., Padilla I. Quadrant Photodiode for Electronic Processing // Proc. of SPIE. 2009. V. 7419. P. 74190Z.
10. Hackmann Ch., Hanff H., Nord E., Wolf D. Development, Manufacturing and Characterization of a Modified Four Quadrant Position Sensitive Detector for Out-Door Applications and Its AC Coupled Readout Electronic. Elsevier Science, 2001. P. 1–6.
11. Solal M. The Origin of Duo-Lateral Position-Sensitive Detector Distortions // Nucl. Instr. Meth. A. Elsevier, 2007. V. 572. P. 1047–1055.
12. Amiao Shi Cui, Soh Y. C. Linearity Indices and Linearity Improvement of 2-D Tetralateral Position-Sensitive Detector. Electron Devices // IEEE Trans. 2010. V. 57, No. 9. P. 2310–2316.
13. Kramer J., Seitz P., Baltes H. Industrial CMOS Technology for the Integration of Optical Metrology Systems (Photo-ASICs) // Sensor and Actuators A. 1992. V. 34, No. 1. P. 21–30.
14. Burke B. E., Gregory J. A., Cooper M., Loomis A. H., Young D. J., Lind T. A., Doherty P., Daniels P., Landers D. J., Ciampi J., Johnson K. F., O'Brien P. W. CCD Imager Development for Astronomy // Lincoln Lab. J. 2007. V. 16, No. 2.

15. *Spear J.D., Russo R.E.* Low Noise Position Sensitive Detector for Optical Probe Beam Deflection Measurements // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. V. 67, No. 7.
16. *Michelet G.A., Trenton J.P.* Dispositif de Positionnement Automatique d'un Faisceau Laser. French patent FR 2 616 555-A1. 15 June 1987.
17. *Chandrakanta A., Devassy A.* The Non-Uniform Characteristics of a Photodiode // *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.* 2018. V. 4, Spec. Iss. 1. P. 25.
18. *Camos J., Corr A., Pons A.* Response Uniformity of Silicon Photodiodes // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. P. 24.
19. *Wang W., Busch-Vishniac I.* The Linearity and Sensitivity of Lateral Effect Position Sensitive Devices — An Improved Geometry // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1989. V. 36, No. 11. P. 2475–2480.
20. *Azaryan N.S., Budagov J.A., Lyablin M.V., Pluzhnikov A.A., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D.* Position-Sensitive Photoreceivers: Sensitivity and Detectable Range of Displacements of a Focused Single-Mode Laser Beam // *Phys. Part. Nucl. Lett.* V. 16, No. 4. P. 223.
21. *Gail M., Carollol D., Delb'o M., Lattanzil M.G., Massone G., Bertinetto F., Mana G., Cesare S.* Location Accuracy Limitations for CCD Cameras // *A&A.* 2001. V. 367. P. 362–370.
22. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HNLS008L-EC#ad-image-0>
23. <https://www.newport.com/p/AG-LS25>
24. <https://thruanelectronlens.wordpress.com/2012/10/16/under-the-microscope-razor-blades/>

Получено 8 апреля 2022 г.