

СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРЕЦИЗИОННОМ ЛАЗЕРНОМ ИНКЛИНОМЕТРЕ

М. В. Ляблин¹, Ю. В. Клемешов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Экспериментально существенна стабилизация мощности лазерного излучения в низкочастотной до 10^{-5} Гц области спектра. Достигнуто улучшение стабильности мощности полупроводникового лазерного источника с оптоволоконным выходом более чем в 10 раз.

Проведен анализ необходимой стабильности мощности лазерного излучения для применения его в прецизионном лазерном инклинометре с целью регистрации наклонов земной поверхности в низкочастотном диапазоне.

Stabilization of the laser power in the low-frequency range up to 10^{-5} Hz is experimentally significant. The power stability of the semiconductor laser source with fiber-optic output is improved by more than a factor of 10.

The analysis of the necessary stability of the laser power for its use in a Precision Laser Inclinator to register slopes of the Earth's surface in the low-frequency range is carried out.

PACS: 06.60.Sx; 42.62.–b; 42.62.Eh

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионный лазерный инклинометр (ПЛИ) является инновационным измерительным инструментом для регистрации угловых наклонов земной поверхности. Его чувствительность $2,4 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} и частотный диапазон 10^{-6} –12,5 Гц достаточны для регистрации угловой составляющей известных микросейсмических явлений [1–5]. Фактически новый инклинометр позволяет решить ряд важных задач в науке и технике: долговременную визуализацию изменения ландшафта поверхности Земли, регистрацию прохождения поверхностных микросейсмических волн. Также он может использоваться как основной прибор для устранения влияния угловых наклонов поверхности Земли на стабильность работы коллаидеров, гравитационных антенн и др.

Подобные характеристики достижимы с использованием стабильных измерительных АЦП, включением терморезистивных элементов в конструкцию ПЛИ и, в том числе, стабильного по мощности одномодового лазерного источника.

¹E-mail: lyablin@jinr.ru

В статье исследуются величина необходимой стабильности мощности лазерного излучения, способы достижения долговременной стабилизации мощности лазерного излучения для применения в ПЛИ.

ОГРАНИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛИ ИЗ-ЗА НЕСТАБИЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА

В прецизионном лазерном инклинометре используется явление *горизонтализации поверхности жидкости*: поверхность жидкости самоустанавливается в положение, перпендикулярное вертикали силы тяжести, вне зависимости от углового положения кюветы с жидкостью.

На рис. 1 показана кювета с жидкостью, в которой положение поверхности жидкости не изменяется при наклоне на угол θ основания, на котором расположена кювета. Лазер и позиционно-чувствительный (квадрантный) фотоприемник также находятся на этом основании и испытывают наклон θ относительно первоначального положения. Отраженный от поверхности жидкости лазерный луч наклоняется относительно квадрантного фотоприемника на угол, равный удвоенному углу наклона основания 2θ . Таким образом, пятно отраженного от поверхности жидкости лазерного луча смещается на квадрантном фотоприемнике. Это изменяет сигналы на фотоприемниках ПЛИ.

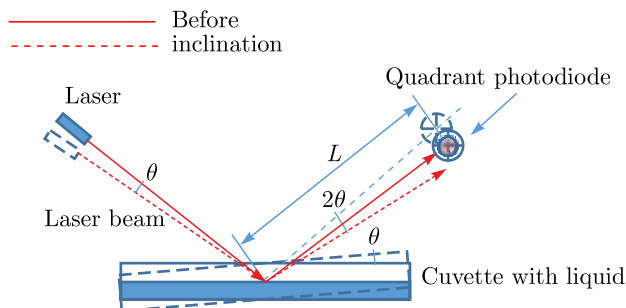


Рис. 1. Принцип работы прецизионного лазерного инклинометра

В малогабаритном ПЛИ используется одномодовый лазерный луч и для регистрации углового смещения лазерного луча применяется позиционно-чувствительное фотоприемное устройство (ПЧФУ) — делительная пластинка (ДП).

Определим величину предельно допустимого линейного (с точностью 1 %) смещения одномодового лазерного луча на ПЧФУ ДП. По полученным данным оценим диапазон регистрации угловых наклонов земной поверхности при помощи ПЛИ и, соответственно, диапазон изменения сигналов с фотоприемников после ПЧФУ ДП и необходимую величину стабильности мощности лазерного излучения в ПЛИ.

Делительная пластинка представляет собой оптическую пластинку с напыленной полоской металла. Линия контакта оптической пластинки и полоски металла — прямая на рис. 2.

На рис. 3 показана ПЧФУ ДП с пятном лазерного луча на ней.

Сфокусированный лазерный луч делительной пластинкой делится на два ортогональных направления. Первая половина луча отражается металлической полоской

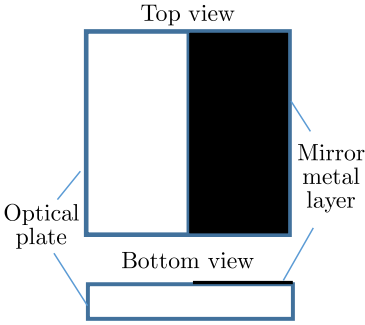


Рис. 2. Внешний вид делительной пластинки

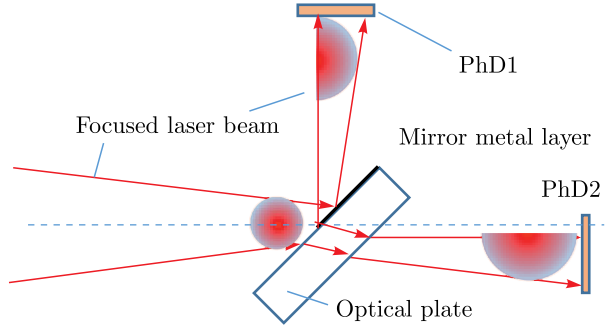


Рис. 3. Положения одномодового лазерного луча ПЧФУ ДП

металла на оптической пластинке и направляется на фотоприемник PhD1, вторая половина проходит через оптическую пластинку и направляется на фотоприемник PhD2. На фотоприемниках PhD1 и PhD2 формируются сигналы U_1 , U_2 . При смещении лазерного луча на делительной пластинке происходит изменение мощности в двух лазерных лучах и, соответственно, сигналов с фотоприемников U_1 , U_2 .

Относительная разность сигналов равна

$$K = \frac{\Delta U}{U} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}.$$

В приложении определена зависимость безразмерного сигнала K от смещения одномодового лазерного луча α на делительной пластинке:

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

где $D = 2r$ — диаметр одномодового лазерного луча; $w = 300$ мкм — предел интегрирования при диаметре лазерного луча D не более 100 мкм.

На рис. 4 показана зависимость (1) K от смещения α в связи с диаметром лазерного луча.

Определим нелинейность β как разность сигнала $K = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$ и его линейной аппроксимации функции K в точке $[0:0]$ в зависимости от смещения α пятна лазерного луча. На рис. 5 показана величина нелинейности сигнала в зависимости от смещения α пятна лазерного луча на делительной пластинке для различных диаметров D лазерного луча.

Из данных, представленных на рис. 5, определим диапазон A смещений одномодового лазерного луча на делительной пластинке с нелинейностью $\beta = 0,01$ в зависимости от диаметра лазерного луча D .

На рис. 6 наблюдается линейная зависимость диапазона смещения A лазерного луча от его диаметра D с нелинейностью $\beta = 0,01$:

$$A = MD = 0,34D.$$

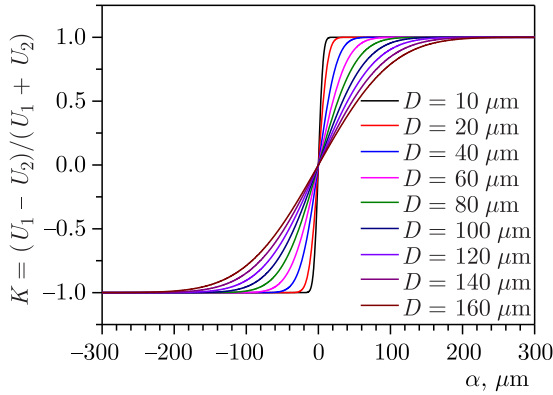


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Зависимость сигнала с ПЧФУ ДП от смещения α пятна лазерного луча для различных диаметров $D = 2r$ лазерного луча

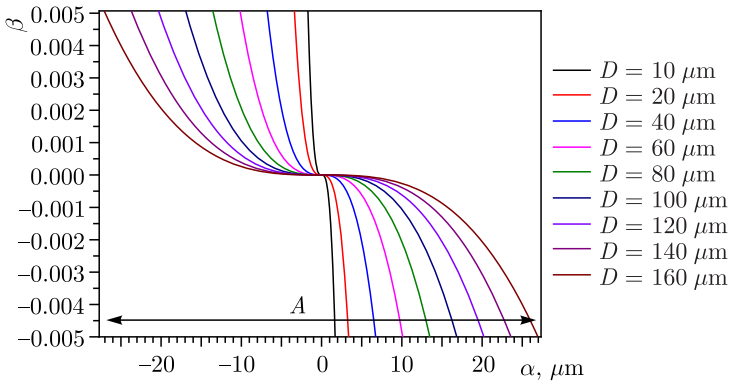


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Зависимость нелинейности β безразмерного сигнала K с фотоприемников от смещения α

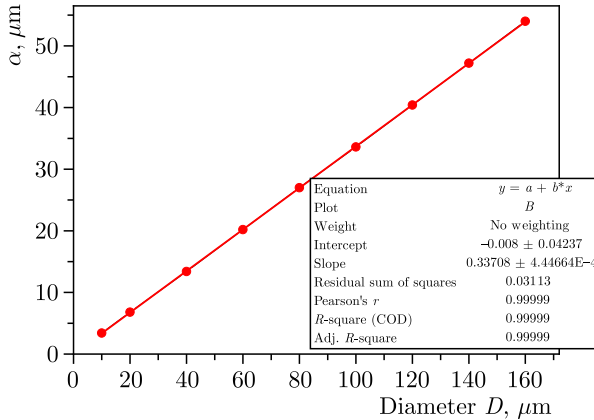


Рис. 6. Диапазон смещений A лазерного луча с нелинейностью $\beta = 0,01$ в зависимости от диаметра D пятна лазерного луча

В зоне с нелинейностью $\beta = 0,01$ определим величину максимального изменения мощности на фотоприемниках после ПЧФУ ДП.

Поскольку

$$\frac{A}{D} = \left(\frac{\Delta U}{U} \right)_{\max} = \left(\frac{\Delta P}{P} \right)_{\max} = M, \quad (2)$$

получим

$$\Delta P_{\max} = 0,34P. \quad (3)$$

При смещении пятна лазерного луча на ПЧФУ ДП происходит разномасштабное распределение мощности лазерного луча на фотоприемниках. Изменение мощности лазерного излучения, падающего на фотоприемники после ПЧФУ ДП, может достигать 34 % в зоне линейных смещений лазерного луча. Это обстоятельство приводит к прямому проникновению шума нестабильности мощности в регистрируемый разностный сигнал $U_1 - U_2$ и, соответственно, к уменьшению отношения сигнала к шуму.

Определим степень влияния шума нестабильности мощности на чувствительность ПЛИ.

ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЛИ

Для простоты рассмотрения используем дуантный фотоприемник с диэлектрическим промежутком между фотоприемниками как аналог ПЧФУ ДП (рис. 7).

Определим мощность лазерного луча в виде суммы постоянной P_0 и переменной δP составляющих мощности P :

$$P = P_0 + \delta P. \quad (4)$$

Сигнал с дуантного фотоприемника равен разности сигналов U_1, U_2 с фотоприемников 1 и 2:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \Delta U_0 + \delta U_n = \Delta U_0 \left(1 + \frac{\delta U_n}{\Delta U_0} \right), \quad (5)$$

где ΔU_0 — постоянная составляющая сигнала; δU_n — переменная составляющая сигнала.

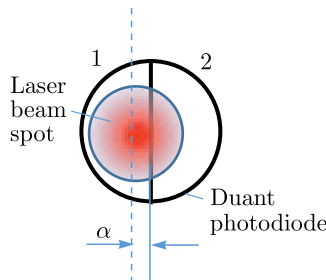


Рис. 7. Смещение пятна лазерного луча на дуантном фотоприемнике

Поскольку мощность лазера пропорциональна сигналам с фотоприемника, запишем

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta P_0 + \delta P_n. \tag{6}$$

Ток I в фотоприемнике пропорционален мощности лазерного излучения, падающего на него:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\eta e}{h\nu} P, \tag{7}$$

где η — квантовая эффективность фотоприемника; e — заряд электрона; h — постоянная Планка; ν — частота фотона; U — напряжение на фотодиоде; R — параллельное сопротивление на фотодиоде.

Получим

$$\frac{\delta U_n}{\Delta U_0} = \frac{\delta P_n}{\Delta P_0}. \tag{8}$$

Используя линейную зависимость между общей мощностью P и разностью мощности ΔP (3), падающих на фотоприемники, можем записать

$$\frac{\delta U_n}{\Delta U_0} = \frac{\delta P}{P_0}. \tag{9}$$

Поскольку угол наклона инклинометра $\Delta\varphi$ пропорционален сигналу ΔU_0 , получим

$$\frac{\delta U_n}{\Delta U_0} = \frac{\delta\varphi_n}{\Delta\varphi}, \tag{10}$$

где $\Delta\varphi$ — максимальный линейно измеряемый угол; $\delta\varphi_n$ — шум измеряемого угла.

Из (10) получим соотношение, связывающее шум $\delta\varphi_n$ измеряемого наклона $\Delta\varphi$ поверхности Земли с нестабильностью мощности лазерного излучения $\delta P/P_0$:

$$\delta\varphi_n = \Delta\varphi \frac{\delta P}{P_0}. \tag{11}$$

Определим максимальный угол наклона $\Delta\varphi$, который регистрируется ПЛИ с нелинейностью $\beta = 0,01$.

На рис. 8 показан процесс фокусировки коллимированного лазерного луча в ПЛИ.

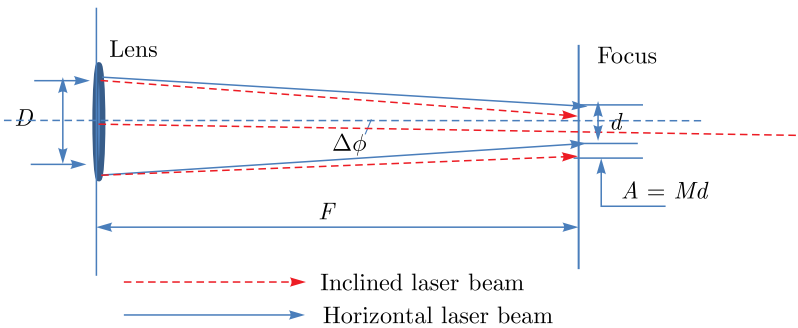


Рис. 8. Угловое смещение сфокусированного лазерного луча

Диаметр сфокусированного лазерного луча определяется из соотношения [6]

$$d = \frac{4 \lambda F}{\pi D}, \quad (12)$$

где D — диаметр коллимированного лазерного луча перед линзой; λ — длина волны лазерного излучения; F — фокусное расстояние линзы.

Учитывая соотношение $\Delta\varphi = A/F$ (см. рис. 8), получим

$$\Delta\varphi = \frac{Md}{F}. \quad (13)$$

Соответственно из (12) имеем

$$\Delta\varphi = M \frac{4 \lambda}{\pi D}. \quad (14)$$

Для $M = 0,34$, $\lambda = 0,63$ мкм, $D = 3,4$ мм с максимальной нелинейностью $\beta = 0,01$ получим диапазон углового смещения $\Delta\varphi = 80$ мкрад.

По формуле (11), при нестабильности мощности лазерного излучения $\delta P/P_0 = 10^{-5}$ и максимальном угле наклона поверхности Земли $\Delta\varphi = 80$ мкрад, величина углового шума $\delta\varphi_n$ равна $8 \cdot 10^{-11}$ рад.

При регистрации обычных микросейсмиков (микросейсмический пик или промышленные шумы) в частотном диапазоне 10^{-3} – 10 Гц микросейсмический сигнал редко превышает величину 1 мкрад, поэтому диапазон измерений $\Delta\varphi$ можно сузить до 1 мкрад. Соответственно, предельная точность измерения таких углов наклона равна $\delta\varphi_n = 10^{-11}$ рад.

Вместе с тем если нам нужно измерить угловые колебания, вызванные микросейсмическим пиком ($\Delta\varphi = 1$ мкрад) с относительной точностью $\delta\varphi_n = 10^{-8}$ рад, то из формулы (11) можно определить достаточную для таких измерений относительную нестабильность лазерного источника $\delta P/P_0 = 10^{-3}$.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПРЕЦИЗИОННОМ ЛАЗЕРНОМ ИНКЛИНОМЕТРЕ

Лазерный луч, помимо нестабильности мощности лазерного излучения, имеет еще хаотичное угловое движение в пределах нескольких микро радиан [5]. Эта особенность лазерного луча связана с температурной нестабильностью лазерного резонатора. Активная среда лазера имеет теплообмен с окружающей средой. Этот процесс вносит температурный шум, который деформирует резонатор лазера, что приводит к хаотичному угловому блужданию лазерного луча.

Для уменьшения влияния деформации вакуумного объема при изменении температуры и давления окружающей среды и влияния этого фактора на чувствительность инклинометра в ПЛИ используется лазер с оптоволоконным выводом лазерного излучения. Базовая угловая нестабильность лазерного излучения в оптическом волокне частично трансформируется в нестабильность ее мощности на выходе из волокна [7].

Изменение положения оптического волокна влияет на величины угла наклона и мощности лазерного излучения после выхода лазерного луча из оптического волокна [8].

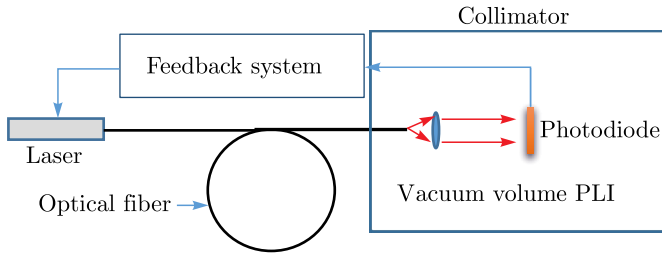


Рис. 9. Схема стабилизации мощности лазера с оптоволоконным выходом излучения

Таким образом, даже изначально стабилизированный по мощности лазерный луч становится нестабильным после прохождения оптического волокна. В этой ситуации необходимо стабилизировать мощность, используя ее измерение на выходе оптического волокна.

На рис. 9 показана схема стабилизации мощности в ПЛИ.

На выходе оптического волокна производится прецизионное измерение мощности лазерного излучения. При помощи фотоприемника регистрируется ее переменная составляющая, которая используется в цепи обратной связи для стабилизации лазерного источника.

В этой схеме мы стабилизируем мощность лазера, в том числе и от возникших в оптическом волокне сопутствующих шумов, что является принципиально важным фактором при использовании этой схемы в ПЛИ.

Рассмотрим способы стабилизации мощности лазерного излучения для применения их в малогабаритном проекционном лазерном инклинометре.

СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лазеры со стабильной мощностью необходимы в системах лазерной записи, атомных магнитометрах и часах, спектроскопии насыщенного поглощения, интерферометрии, детекторах гравитационных волн, при учете лазерных стандартов частоты. Прецизионный лазерный инклинометр, разработанный в ОИЯИ для регистрации угловых колебаний, также не является исключением. Для проведения прецизионных измерений требуется долговременная стабильность мощности излучения на относительном уровне $10^{-5} - 10^{-6}$.

Различают два типа методов стабилизации параметров лазерного излучения: пассивные и активные. К пассивным методам стабилизации относятся: применение резонаторов жесткой конструкции с повышенной температурной стабильностью, термостабилизация, вакуумирование, использование стабилизированных источников питания, применение активных элементов с переменным сечением. Активные методы стабилизации основаны на использовании сигнала обратной связи для управления параметрами лазера (например, использование сигнала фотоприемника для коррекции тока лазерного диода). Стабилизация мощности излучения может осуществляться как вне лазера (с помощью оптических модуляторов), так и внутри лазера — регулирование тока или магнитного поля в зависимости от типа активного элемента, изменение конструкции резонатора (перемещение пластин или отражателей) [11].

Оптические модуляторы предназначены для модуляции выходного светового луча. В зависимости от источника модуляции различают акустооптические (АОМ), электрооптические (ЭОМ), фотоэластичные (фотоупругие) модуляторы (ФЭМ). Интенсивное применение оптических модуляторов по стабилизации мощности началось после изобретения лазера, хотя эффект дифракции света на акустических волнах был предсказан Леоном Бриллюэном в 1922 г., а экспериментально данное явление с использованием эффекта «ультразвуковой решетки» было впервые подтверждено П. Дебаем и Ф. Сирсом в 1932 г.

Стандартное использование АОМ показано в работе [12], где представлено экспериментальное исследование по стабилизации мощности диодного лазера с внешним резонатором (ECDL-лазер). В схеме стабилизации (рис. 10, а) лазерный луч проходит через АОМ, полуволновую пластину и поляризационный светоделительный куб. После деления один луч является выходным (используемым), а второй луч регистрируется фотодиодом, сигнал с которого вычитается из опорного напряжения. Результирующий сигнал проходит через ПИ-регулятор, выход которого подключен к аттенюатору. Изменение сигнала на аттенюаторе контролирует уровень амплитуды модулирующего радиосигнала (частотой 80 МГц) для АОМ. Оптическая схема помещалась в термостабильный корпус (со стабильностью несколько десятков мК). Высокочастотные колебания мощности исследовались в диапазоне 1 Гц–1 МГц. Относительный шум интенсивности (RIN или RPN) (рис. 10, б), отражающий стабильность выходной мощности, в диапазоне частот 1–100 кГц был установлен на уровне $2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}^{-1/2}$ (–153 дБ/Гц). На частоте 100 Гц был достигнут показатель $4,46 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}^{-1/2}$ (–147 дБ/Гц) — он был уменьшен на 32 дБ (по сравнению со значением стабильности мощности без системы стабилизации — $1,78 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}^{-1/2}$). В диапазоне 1–100 Гц, где преобладает фликкер-шум, на частоте 1 Гц относительный шум интенсивности — на уровне $2 \cdot 10^{-13} \text{ Гц}^{-1/2}$ (–127 дБ/Гц). Низкочастотные колебания мощности охарактеризованы авторами работы с помощью дисперсии Аллана: при времени усреднения 100 с (0,01 Гц) ее относительный показатель находился на уровне $6 \cdot 10^{-7}$, при 10^4 с (10^{-4} Гц) — на уровне $2 \cdot 10^{-6}$. Эти результаты были достигнуты при исследовании зависимости АОМ от температуры и его последующей

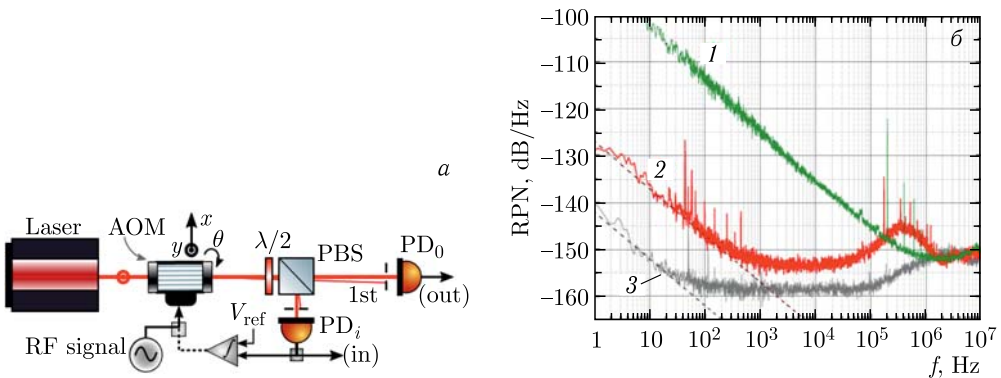


Рис. 10. а) Схема стабилизации с использованием АОМ; б) график относительной интенсивности шума — RIN (кривая RIN без стабилизации (1) и при стабилизации (2) на выходе фотодиода PD₀, 3 — кривая нормализованного шума источника опорного напряжения)

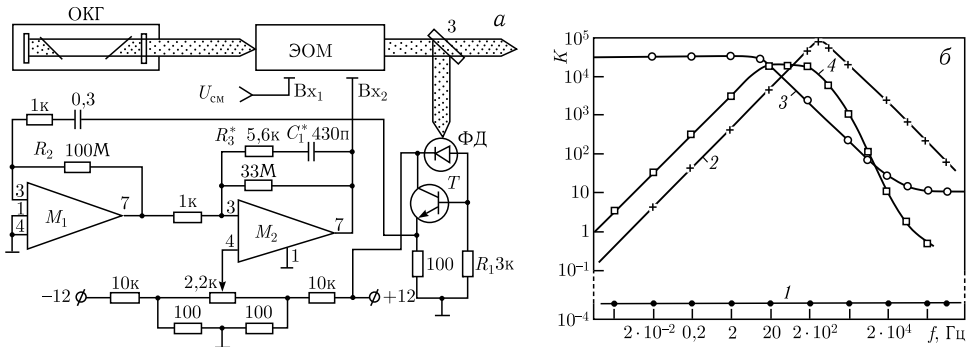


Рис. 11. а) Принципиальная схема блока стабилизации; б) АЧХ отдельных звеньев стабилизации (1–3) и разомкнутого кольца стабилизации (4)

термостабилизации на уровне 27,8 °С. Из недостатков: наблюдается ухудшение частотной характеристики показателя RIN в области 500 кГц — подъем спектральной кривой при стабилизации над исходной кривой (без стабилизации) на 5 дБ.

Первые исследования по стабилизации мощности с использованием электрооптических модуляторов (ЭОМ) можно встретить в научных работах 1970-х и 1980-х гг. Применение ЭОМ требует использования поляризационных элементов. Так, в работе [13] описана электронная схема системы стабилизации интенсивности лазерного излучения, собранной на основе ЭОМ МЛ-102А (рис. 11, а). Данный модулятор имеет два входа управления, что позволяет обойтись без высоковольтного усилителя. На один из входов подается напряжение смещения в диапазоне 0–220 В, которое определяет коэффициент пропускания (средний уровень интенсивности излучения на выходе ЭОМ). Другой вход ЭОМ соединен с выходом интегрирующего усилителя на ОУ. Часть излучения с выхода ЭОМ (с помощью делительного зеркала) подается на фотодетектор (падающая мощность ~ 220 мкВт), сигнал с которого идет на дифференцирующий усилитель на ОУ (подавляет флуктуации в области низких частот), и далее на интегрирующий усилитель, который подавляет флуктуации в области высоких частот и выполняет функцию звена коррекции АЧХ кольца стабилизации (см. рис. 11, б). Система стабилизации обеспечивает подавление флуктуаций интенсивности лазерного излучения в полосе частот $7 \cdot 10^{-4}$ – 10^5 Гц. Коэффициент подавления составляет $2 \cdot 10^4$ в полосе частот 10–300 Гц и спадает с крутизной 40 дБ/декада в высокочастотной и 20 дБ/декада в низкочастотной областях спектра. Система стабилизации испытана на серийном лазере ЛГ-75, имеющем широкий спектр флуктуаций интенсивности, и позволила уменьшить их уровень до 10^{-5} в полосе частот до 100 кГц.

Обычные схемы стабилизации, как правило, имеют источники шумов, трудно поддающихся уменьшению, — это квантовый дробовой шум, предельные шумы используемых электронных компонентов и т. д. Для преодоления ограничения, связанного с дробовым шумом, в традиционной оптической схеме стабилизации, в работе [16] было предложено заменить светоделитель на оптический резонатор с переменной (емкостной) связью (рис. 12), имеющий узкую полосу пропускания. Вообще метод измерения по переменной составляющей (переменному току) обычно применяется для точного измерения нестабильности при большом значении постоянной составляющей.

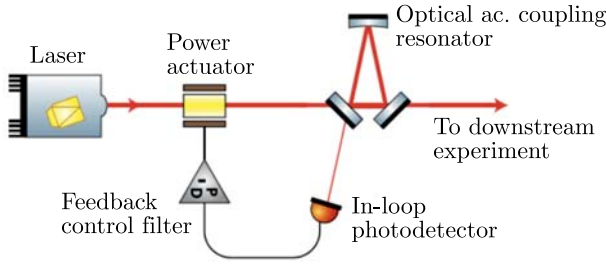


Рис. 12. Схема стабилизации с использованием оптического резонатора с переменной связью

Схематично вышеуказанный резонатор представляет собой треугольник, в вершинах которого находятся, соответственно, три зеркала. Одна часть входного луча сразу отражается от одного зеркала резонатора, а вторая часть проходит внутрь резонатора. Внутри него подавляется несущая составляющая модулированного излучения. В результате фотоприемник регистрирует излучение, содержащее часть исходного луча и часть отраженного луча в резонаторе. В спектре сигнала будет подавлена несущая составляющая, что позволяет более точно детектировать основные колебания мощности излучения.

Встречаются и неоригинальные методы стабилизации. Так, в работе [17] описан «термооптический» принцип стабилизации — стабилизация мощности излучения одномодового лазера на основе эффекта «тепловой» рассеивающей линзы. Он заключается в явлении самодефокусировки лазерного пучка, проходящего через среду с отрицательным показателем преломления. Лазерный пучок (1) (рис. 13, а) фокусируется линзой (2) в кювету (3) с жидкостью, частично поглощается, что приводит к выделению тепла и росту температуры жидкости. В результате показатель преломления жидкости изменяется ($\Delta n = \partial n / \partial T \cdot \Delta T$). Распределение интенсивности по сечению лазерного пучка неоднородно, поэтому изменение показателя преломления в разных точках будет различным. Поскольку «тепловая» линза является рассеивающей ($\partial n / \partial T < 0$), то расходимость пучка, проходящего через эту линзу, будет увеличена, поэтому увеличится и ширина распределения интенсивности (диаметр) пучка в дальней зоне. Определив диаметр пучка в перетяжке после линзы, можно добиться

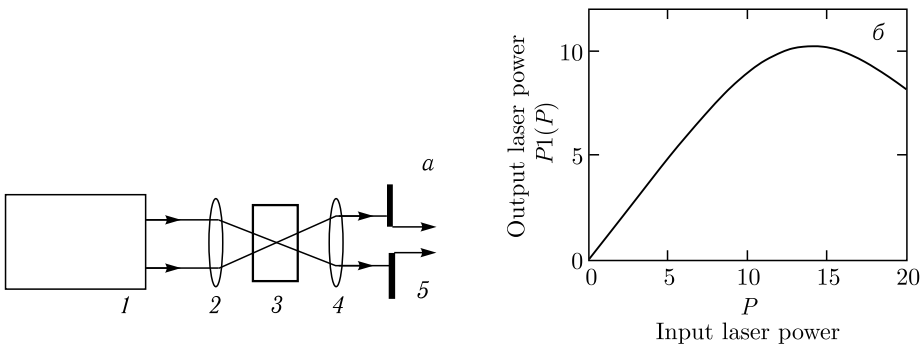


Рис. 13. а) Схема стабилизации на основе «тепловой» линзы; б) зависимость мощности излучения на выходе стабилизатора от мощности излучения лазера

постоянства интенсивности на оси пучка. Последующая линза (4), расположенная после кюветы, коллимирует пучок, а с помощью диафрагмы (5) выделяется центральная часть пучка. Увеличение размера диафрагмы ведет к увеличению выходной мощности и к снижению коэффициента стабилизации. В работе произведен математический расчет и выведена зависимость выходной (стабилизированной) мощности от входной (рис. 13, б), откуда следует, что при установленном уровне входной мощности 14 мВт и ее изменении на величину $\pm 1,5$ мВт выходная мощность меняется не более чем на 0,17 мВт, что означает повышение стабильности в 17 раз. Недостатками предложенного метода являются уменьшение излучаемой мощности и невысокое быстродействие (\sim мс). Достоинства — простота конструкции стабилизатора и отсутствие внешних управляющих устройств.

В работе [14] описано устройство, стабилизирующее мощность излучения для He-Ne-лазера с длиной волны 630 нм, который в обычном режиме имеет нестабильность в диапазоне 5–30 % (за 30 мин). Достигнута стабильность мощности $\pm 0,04$ % за 30 мин. Система стабилизации основана на зависимости коэффициента отражения

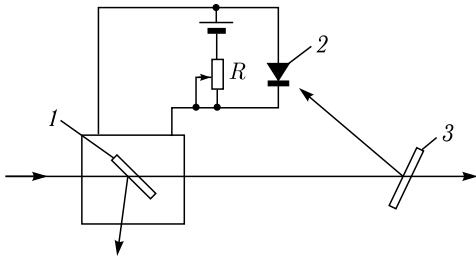


Рис. 14. Блок-схема устройства стабилизации

стеклянной пластинки от угла падения излучения. В системе стабилизации часть излучения (~ 10 %) ответвляется неподвижной делительной пластинкой на фотодиод, сигнал с которого, после сравнения его с опорным сигналом, подается на стрелочный микроамперметр (0–100 мкА) (рис. 14). На его рамке закреплена ответвляющая пластинка, которая поворачивается вокруг оси, перпендикулярной пучку и проходящей через его центр так, что мощность излучения на выходе остается постоянной в определенных пределах. При мощности излучения

15 мВт коэффициент стабилизации составил ~ 20 и может быть повышен, если микроамперметр подключить через усилитель постоянного тока. При применении маломощных лазеров (0,5–5 мВт) обязательно использование усилителя. Для более эффективной работы стабилизатора рекомендуется линейно поляризованное излучение.

Для стабилизации мощности излучения можно управлять внутренними параметрами лазера на основе внешнего регистрируемого излучения — стабилизировать ток разряда в газовом лазере или ток лазерного диода, стабилизировать по температуре активную среду и т. д. Классическое использование внутренней стабилизации представлено в работе [15]. Предложена система стабилизации мощности для полупроводникового лазерного диода (мощностью 1 Вт), предназначенная для использования в системах прецизионных измерений. В работе описана трехконтурная система отрицательной обратной связи (рис. 15). Первый (внутренний) контур системы стабилизации отвечает за стабилизацию тока, второй (внешний) контур — за стабилизацию мощности и третий (внешний) контур — за стабилизацию температуры PN-перехода. Первый контур имеет источник тока для лазерного диода, построенный на регуляторе напряжения. Во втором контуре фотодиод преобразует оптический сигнал, отраженный от резонатора лазерного диода в электрический сигнал. После преобразования фототока в напряжение полученный сигнал усиливается и поступает на вход мик-

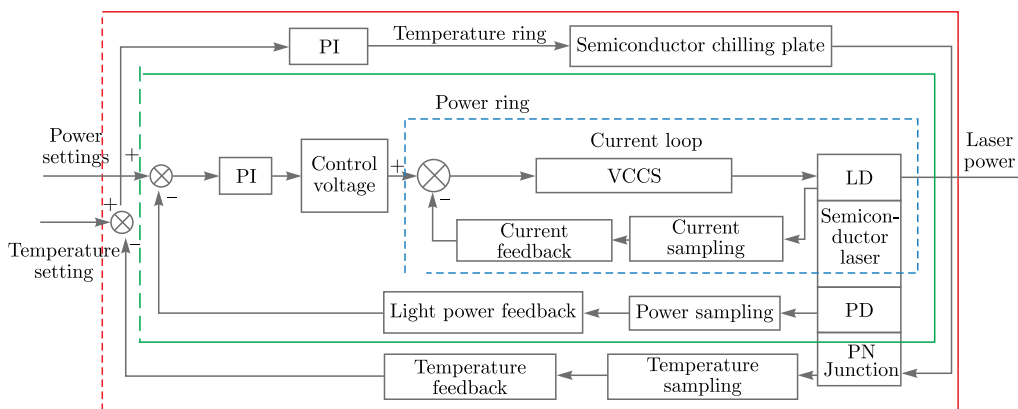


Рис. 15. Блок-схема системы стабилизации параметров лазерного диода

роконтроллера АЦП, где сравнивается с заданным значением. Полученное значение ошибки корректирует напряжение регулятора, который управляет током лазерного диода. Третий контур включает датчик температуры (с соответствующей схемой), ТЕС-элемент (соединенный с PN-переходом), вентилятор с питающим драйвером. При половинной мощности излучения (493 мВт) долговременная стабильность выходной мощности в течение 20–30 ч колебалась в пределах ± 6 мВт (в относительном значении $\pm 1,2\%$), а кратковременный показатель стабильности (за 6,5 ч) был установлен на уровне ± 3 мВт ($\pm 0,6\%$). Стабильность тока за 12 ч имела колебания ± 2 мА, а стабильность за 6 ч — $\pm 1,5$ мА. Особенностью разработанной системы является использование нейросетевого подхода для регулировки коэффициентов PI-регулятора. В целом подобная мультиконтурная система управления с отрицательной ОС имеет хорошую стабильность (особенно для высокоомощного лазерного диода) и возможность защиты от электромагнитных помех.

Анализ приведенных выше и других исследований по стабилизации мощности лазерного излучения показывает, что наиболее распространенным методом стабилизации мощности (а также и частоты) излучения является применение оптических модуляторов. Чаще всего применяются АО-модуляторы.

Достоинства АОМ — простота и надежность. Недостатками АОМ являются нелинейность передаточной функции; уменьшение глубины модуляции с ростом модуляционной частоты; узкая полоса модулирующих частот; смещение частоты модулированного излучения на величину акустической модулирующей частоты; низкая эффективность дифракции (требующая повышенной мощности модулирующего сигнала) [18]. Также недостатком большинства нелинейных кристаллов АОМ является малая оптическая прочность, что ограничивает их использование с мощными источниками излучения [19]. Достоинства ЭОМ — возможная малогабаритность и интегральность. Общими недостатками ЭОМ являются высокие управляющие напряжения; необходимость применения больших кристаллов для получения стопроцентной глубины модуляции; ограничения, накладываемые на расходимость и монохроматичность светового луча; сильная зависимость величины модуляционных эффектов от температур [20].

Что касается внутренней стабилизации, то здесь обычно применяются многоконтурные системы обратной связи для стабилизации не только мощности излучения, но и температуры, тока активного элемента. Подобные системы можно встретить в полупроводниковых лазерных источниках, выпускаемых промышленностью. В целом на практике возможно совместное сочетание способов внешней и внутренней стабилизации.

Для ПЛИ возможно разработать как оптическую схему стабилизации (с использованием АОМ, поляризаторов), так и электронную схему стабилизации параметров для применяемого лазерного блока или лазерного диода. При этом размеры и структура оптической схемы будут ограничены ввиду малогабаритности самого прибора. В целом для инклинометра более важна долговременная стабильность (в течение суток, нескольких недель), чем кратковременная. Это может потребовать дополнительного использования пассивных методов стабилизации (термостатирования, экранировки).

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА S1FC635

В настоящее время в ПЛИ осуществлен переход на лазер с резонатором Фабри–Перо — Thorlabs S1FC635. Преимущества данного типа лазеров — уменьшение зависимости длины волны излучения от тока накачки и температуры лазера, а также повышенная стабильность мощности излучения.

Для проверки соответствия заявленных производителем параметров стабильности был проведен двухсуточный мониторинг мощности лазерного излучения. Для этого был собран лабораторный стенд (рис. 16, 17), состоящий из лазера, кремниевое фотоприемника S12915-1010R и системы сбора данных DT9824 для регистрации сигнала с фотоприемника. Она представляет собой 4 изолированных АЦП. DT9824 была помещена в металлический бокс с целью дополнительной защиты от электромагнитных помех. Выходная мощность лазера была установлена на уровне 1,1 мВт. Фотоприемник был включен в фотогальваническом режиме (сопротивление нагрузки 370 Ом) и сверху покрывался темной тканью для сужения диапазона волн падающего света. Вся установка размещалась на оптическом столе.

На рис. 18 представлены данные — относительное изменение напряжения на фотоприемнике за 48 ч. Для удобства пересчета значений стабильности из милливольт в милливатты была выбрана относительная шкала — отношение разницы между текущим и средним абсолютными значениями в выборке данных к среднему абсолютному значению выборки данных. Из рис. 18 следует, что стабильность мощности составляет $\sim 1,15\%$ ($\sim 10^{-2}$ в относительном уровне).

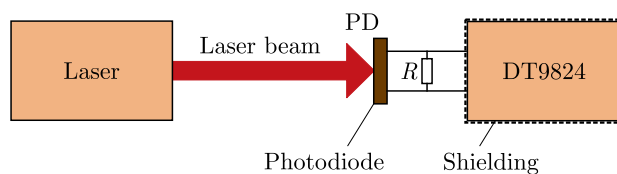


Рис. 16. Схема стенда для измерения стабильности мощности лазерного излучения

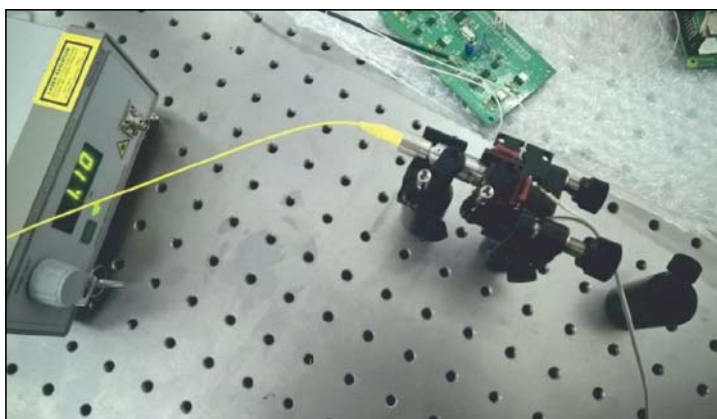


Рис. 17. Общий вид лабораторного стенда

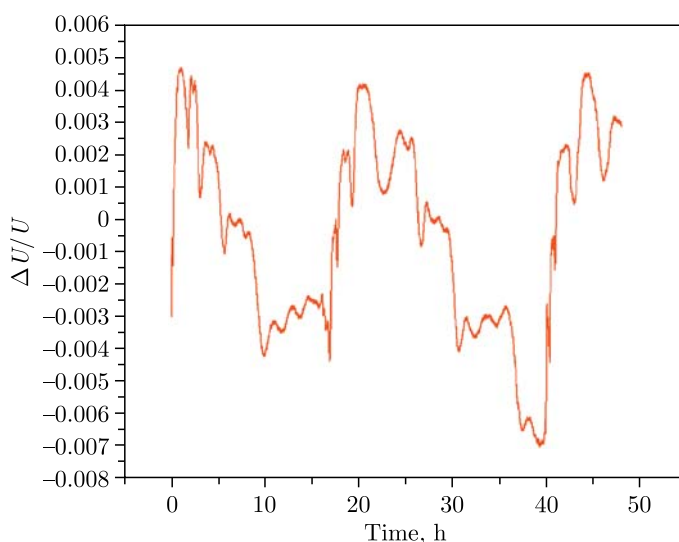


Рис. 18. Относительное изменение напряжения на фотоприемнике при нестабилизированном лазере

Такой уровень стабильности мощности излучения недостаточен для долговременных прецизионных измерений в ПЛИ, поэтому была поставлена задача повышения стабильности мощности излучения до относительного уровня 10^{-5} – 10^{-6} .

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поскольку данный лазер имеет вход модуляции, был предложен метод стабилизации, основанный на использовании входа модуляции и отрицательной обратной связи. Общая блок-схема предлагаемого метода показана на рис. 19.

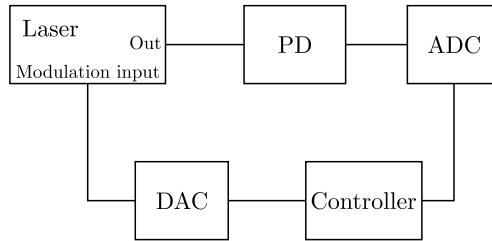


Рис. 19. Общая блок-схема стабилизации мощности лазерного луча

Луч лазера регистрируется фотоприемником (PD), включенным в фотогальваническом режиме. Далее сигнал с фотоприемника поступает на прецизионный и малозумящий АЦП (ADC). С АЦП данные передаются в вычислительное устройство (Controller) и обрабатываются программно. Фактически вычислительное устройство является цифровым регулятором. Простейший алгоритм регулятора — это если напряжение на входе АЦП снизилось, то на выходе ЦАП нужно его увеличить и наоборот. ВУ формирует и передает данные прецизионному ЦАП (DAC). С выхода ЦАП напряжение подается на вход модуляции лазера. При разработке прототипа данной системы были использованы АЦП ADS1255 и ЦАП DAC8881. В качестве управляющих устройств протестированы Raspberry Pi 3B+ и микроконтроллер из серии STM32F0.

Минимальный шаг напряжения, регистрируемый АЦП ADS1255, составляет $5\text{ В}/2^{23} = 5,96 \cdot 10^{-7}\text{ В} \approx 0,6\text{ мкВ}$. Размах шума ADS1255 при выборке данных 2.5SPS и $\text{PGA} = 1$ составляет 0,247 мкВ. Основные достоинства данного АЦП:

- настройка двух несимметричных или одного дифференциального канала;
- режим Open/Short Sensor Detection для подачи тока при подключении датчиков;
- встроенный малозумящий PGA-усилитель для измерения малых сигналов с коэффициентом 1–32;
- возможность системной калибровки для устранения ошибок смещения и усиления;
- включение входного буфера для увеличения импеданса (до 160 МОм);
- изменение скорости выборки;
- программируемый цифровой фильтр для оптимальности между разрешением и скоростью передачи данных.

Минимальный шаг напряжения (LSB), выдаваемый ЦАП DAC8881, равен $5\text{ В}/2^{16} \approx 76\text{ мкВ}$. При токовой нагрузке 1 мА LSB увеличивается до 80 мкВ и больше в зависимости от нагрузочного сопротивления и длины проводника. Размах выходного шума ЦАП составляет 2 мкВ. Главным достоинством данного ЦАП является наличие встроенного буфера.

Для подключения АЦП и ЦАП была разработана схема и спроектирована отдельная печатная плата (рис. 20). При проектировании платы учитывались требования, которые предъявляются к прецизионным и малозумящим схемам.

На плате были установлены посадочные места для разъема BNC (подключение платы к входу модуляции лазера по коаксиальному кабелю) и разъема подключения АЦП и ЦАП по интерфейсу SPI к вычислительному устройству. Для подачи опорного питания на АЦП и ЦАП использовались микросхемы серии REF50xx — малозумящие (3 мкВ — Peak-to-Peak) и прецизионные (с точностью 0,05 %) источники опор-



Рис. 20. Вид ПП модуля стабилизации сверху (без контроллера)

ного напряжения с низким температурным дрейфом $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Роль стабилизаторов питания выполняют микросхемы из серии AMS1117. В качестве временного источника питания платы был взят лабораторный источник KEITHLEY 2230G-30-1 [6].

В качестве цифрового регулятора был использован интегратор (И-регулятор), реализованный в цифровом виде. Его алгоритм был описан двумя выражениями:

$$\text{sum_error}(t_n) = \text{sum_error}(t_{n-1}) + (\text{level} - \text{ADC_data}(t_n)) K_i, \quad (15)$$

$$\text{code_DAC}(t_n) = \text{code_DAC_initial} + \text{sum_error}(t_n), \quad (16)$$

где ADC_data — текущий уровень напряжения на фотоприемнике (код АЦП); level — уставка/опорный уровень сигнала с фотоприемника (код АЦП) — определяется при включении системы; sum_error — текущая сумма всех ошибок (отклонений от заданного уровня напряжения с фотоприемника); t_n — n -й момент времени; K_i — интегральный коэффициент; code_DAC — текущее значение выходного напряжения ЦАП (код ЦАП); code_DAC_initial — постоянный уровень напряжения на выходе ЦАП (код ЦАП). Таким образом, через определенный временной шаг, в n -й момент времени регулятор считывает значение с АЦП и корректирует в соответствии с алгоритмом значение на ЦАП.

Для расчета интегрального коэффициента K_i использован следующий метод: на выходе ЦАП пошагово формируется линейно растущее напряжение, на каждом шаге АЦП регистрирует прирост напряжения с фотоприемника, и определяется отношение шага ЦАП к приросту сигнала на АЦП — коэффициент K_i . Получаемые отношения суммируются за 20 шагов, после чего рассчитывается среднее значение коэффициента K_i .

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА S1FC635 ПРИ ВНЕШНЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Для независимой проверки работоспособности системы был собран стенд, схема которого показана на рис. 21.

На выходе лазерного луча был установлен делительный куб $15 \times 15 \times 15 \text{ мм}$. Один из лучей регистрирует фотоприемник, подключенный к модулю стабилизации, а второй луч — фотоприемник, подключенный к одному из каналов системы сбора данных DT9824. Оба фотоприемника (S12915-1010R) были включены в фотогальваническом

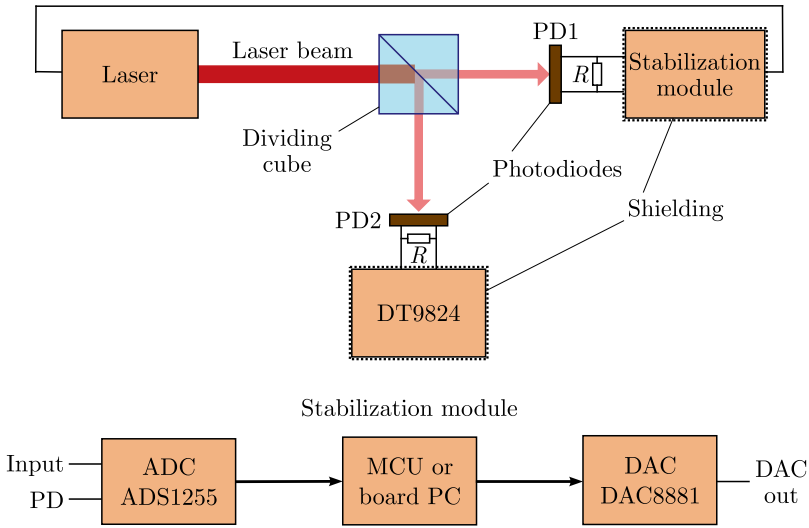


Рис. 21. Схема стенда для проверки системы стабилизации

режиме (с сопротивлениями по 370 Ом) и сверху покрывались темной тканью. Выход ЦАП подключался через коаксиальный кабель к BNC-разъему входа модуляции лазера. Выходная мощность лазера была установлена на уровне 1,1 мВт (с учетом делительного куба она уменьшается до 0,5 мВт).

Модуль стабилизации и система сбора данных DT9824 помещались в металлические боксы с целью защиты от электромагнитных помех. Весь стенд размещался на оптическом столе. Частота выборки DT9824 перед записью была настроена на 1,17 Гц. На рис. 22 представлены данные, зарегистрированные DT9824, в относительном изменении напряжения за 24 ч. Время начала записи — 13 ч 28 мин.

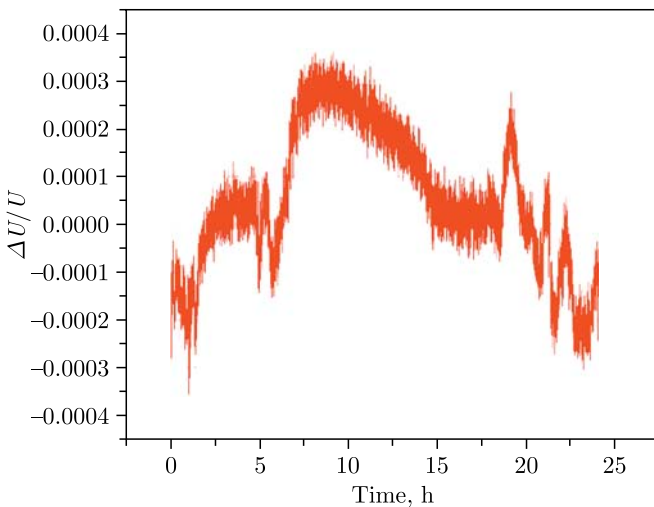


Рис. 22. Сигнал с фотоприемника при стабилизированном лазере

Из графика на рис. 22 следует, что относительная стабильность составляет 0,06 % ($6 \cdot 10^{-4}$). В переводе на милливатты это соответствует $3 \cdot 10^{-4}$ мВт. В целом на графике можно увидеть кратковременные участки (например, в ночное время за 4 ч стабильность мощности не превышала 10^{-4} в относительном уровне). Всплески, начинающиеся с 7 ч утра, могли быть связаны с индустриальными шумами. Если говорить о долговременной нестабильности, то она может быть связана с колебаниями температуры в самой лаборатории.

На рис. 23 для сравнения показаны графики относительного изменения напряжения на фотоприемнике при стабилизированном и нестабилизированном лазере, а на рис. 24 показаны результаты фурье-анализа по данным рис. 23. На рис. 23 синим цветом выделены 4-ч участки с наилучшей кратковременной стабильностью. Отдельно для данных участков также было произведено преобразование Фурье (рис. 25).

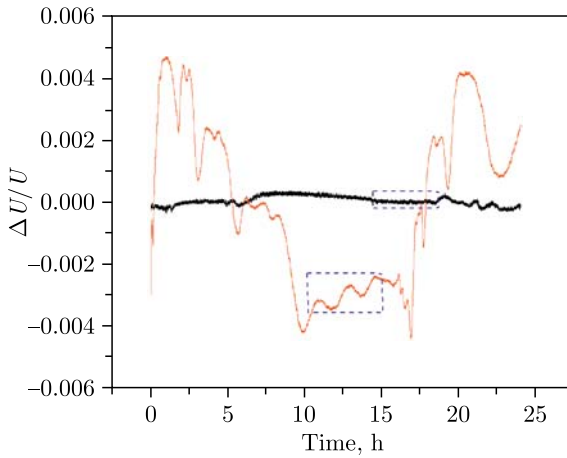


Рис. 23 (цветной в электронной версии). Относительное изменение сигнала фотоприемника при нестабилизированном и стабилизированном лазере

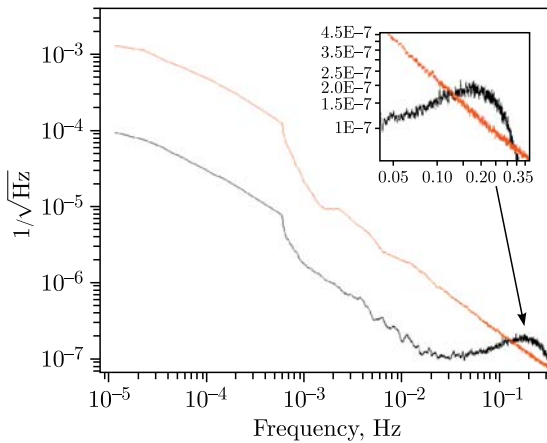


Рис. 24. Фурье-анализ по данным рис. 23

Как видно из графика на рис. 24, за сутки в диапазоне частот до 0,01 Гц удалось улучшить стабилизацию мощности примерно в 10 раз. В диапазоне от 0,12 до 0,32 Гц видно небольшое превышение кривой спектральной плотности при стабилизированном лазере над кривой при нестабилизированном лазере. Из графика на рис. 25 следует, что в диапазоне частот от 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-3}$ Гц удалось улучшить стабилизацию мощности примерно в 100 раз для кратковременных участков.

Система сбора данных DT9824 зависит от внешней температурной стабильности. Поэтому весь лабораторный стенд был перенесен в термоизолированную лабораторию (с суточной температурной стабильностью $0,1^\circ\text{C}$) и был протестирован там. Проведен двухсуточный мониторинг, результаты которого показаны на рис. 26.

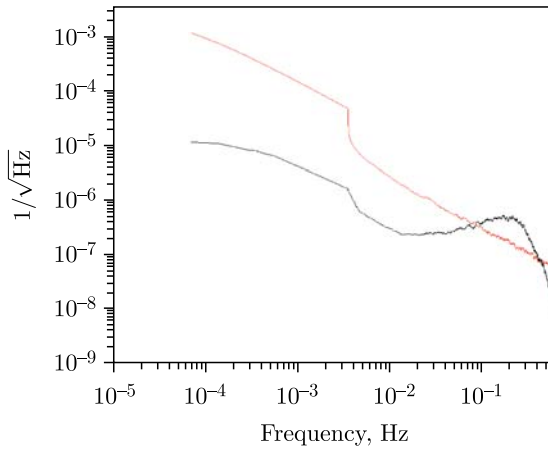


Рис. 25. Фурье-анализ по данным рис. 23 для кратковременных участков

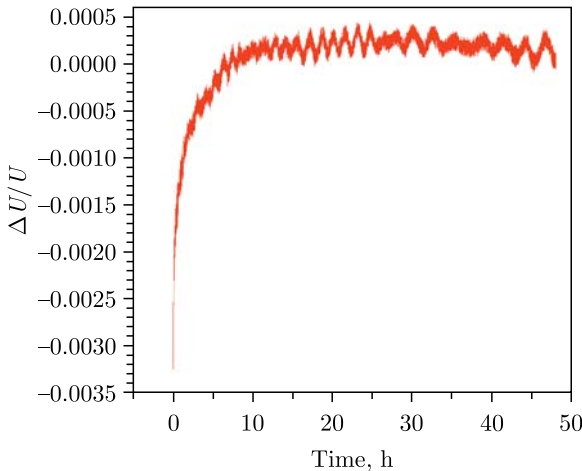


Рис. 26. Относительное изменение сигнала фотоприемника при стабилизированном лазере в термоизолированных условиях

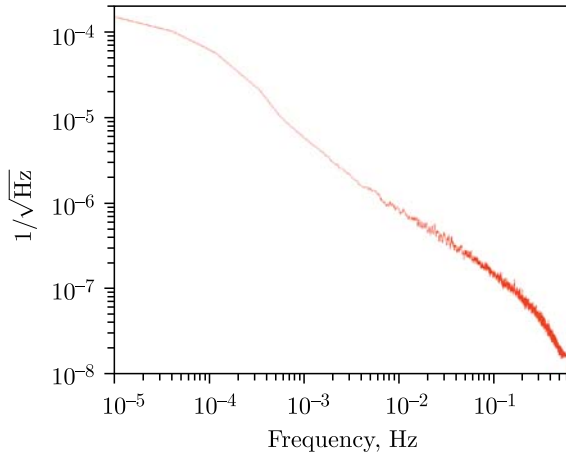


Рис. 27. Фурье-анализ по данным рис. 26

Из графика на рис. 27 видно, что на участке, начинающемся с 10-го часа, стабильность мощности составляет 0,045% ($4,5 \cdot 10^{-4}$). Также на графике видны колебания — с частотой $1,85 \cdot 10^{-4}$ и $1,175 \cdot 10^{-4}$ Гц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для лазерного инклинометра существует потребность в долговременной стабилизации мощности излучения в течение одного года ($\sim 3 \cdot 10^{-8}$ Гц). В целом диапазон измерения ПЛИ ограничен областью 10^{-8} –20 Гц, и в этом же диапазоне необходимо уменьшить амплитудный шум лазера.

Анализ полученных графиков показывает, что в целом удалось улучшить суточную относительную стабильность мощности лазерного излучения с 10^{-2} до $6 \cdot 10^{-4}$ за сутки. В термоизолированных условиях этот показатель был установлен на относительном уровне $4,5 \cdot 10^{-4}$ за сутки. Данный показатель стабильности достаточен для регистрации угловых колебаний с граничной частотой 10^{-3} – 10^{-4} Гц.

Для достижения большей чувствительности ПЛИ необходимо иметь стабильность мощности излучения на относительном уровне 10^{-5} – 10^{-6} . Такая чувствительность может сделать реальным эксперименты с ПЛИ по анализу влияния Солнца на деформацию земной коры. Стабилизация мощности излучения также важна для сети инклинометров, которая позволяет регистрировать изменение ландшафта поверхности в реальном времени. Долговременные измерения с использованием стабилизированных метрологических лазеров нужны в физических эталонах (веса, массы и т. п.).

Для улучшения полученных результатов можно предпринять следующие действия:

- применить другую элементную базу (например, увеличить разрядность управляющего ЦАП с 16 до 18 бит, что позволит подавать напряжение с меньшим шагом и тем самым точнее компенсировать отклонения показателя мощности);
- разработать систему термостабилизации лазерного источника;
- улучшить цифровую обработку сигнала, применить более оптимальный алгоритм цифрового регулирования.

Разработанная система стабилизации лазерного излучения является первичным прототипом. В будущем сама система будет состоять из двух модулей — АЦП-модуля с фотоприемником, расположенного внутри инклинометра, и ЦАП-модуля, соединенного со входом лазера. Обмен данными будет осуществляться соответственно с помощью двух микроконтроллеров. Такой подход позволит минимизировать аналоговые шумы в системе стабилизации.

Для инклинометра возможно разработать как оптическую схему стабилизации (с использованием АОМ, поляризаторов), так и электронную схему стабилизации параметров для применяемого лазерного блока или лазерного диода. При этом размеры и структура оптической схемы будут ограничены, учитывая малогабаритность самого прибора. Для достижения долговременной стабильности может потребоваться использование пассивных методов стабилизации, таких как термостатирование, экранировка.

Также необходимо исследовать другие методы стабилизации, представленные в данной статье, и их пригодность для использования в ПЛИ. Одним из возможных является метод, основанный на использовании опорного источника напряжения с достаточной долговременной стабильностью (например, модель 732С 10V от компании Fluke построена на квантовом эффекте Джозефсона и может обеспечивать уровень стабильности 1 ppm за год). Источник опорного напряжения можно использовать как:

а) основу для прецизионного источника питания лазера или лазерного диода с обратной компенсацией напряжения от внешнего фотоприемника — в этом случае необходима разработка питающей схемы — драйвера;

б) референс для сравнения с сигналом фотоприемника и получения разностного сигнала ошибки, который будет обрабатываться системой автоматического управления, построенной, например, на ПИД-регуляторе и т. п.

По нестабильности напряжения такого источника можно также отслеживать температурные колебания, что позволит программно компенсировать подаваемое напряжение на вход модуляции.

В будущем планируется комплексный подход к проблеме стабилизации мощности излучения — например, разработка систем стабилизации отдельно для низких и высоких частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определена необходимая стабильность мощности лазерного излучения для применения его в прецизионном лазерном инклинометре с целью регистрации наклонов земной поверхности в низкочастотном диапазоне.

Экспериментально проведен мониторинг стабильности мощности лазерного излучения в течение 1–2 сут для лазера с резонатором Фабри–Перо (Thorlabs S1FC635) и установлена стабильность мощности на относительном уровне $1,15 \cdot 10^{-2}$ (peak-to-peak).

Разработан модуль стабилизации мощности излучения на основе системы АЦП–ЦАП. Его использование позволило улучшить суточную стабильность мощности лазерного излучения до относительного уровня $6 \cdot 10^{-4}$ (peak-to-peak) за сутки. В частотной области за сутки до 0,01 Гц удалось улучшить стабилизацию мощности примерно в 10 раз, в диапазоне частот от 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-3}$ Гц удалось улучшить стабилизацию

мощности примерно в 100 раз для кратковременных участков. В термоизолированных условиях показатель стабильности установлен на относительном уровне $4,5 \cdot 10^{-4}$ за сутки.

Полученные результаты позволяют улучшить соотношение сигнал шум в сигналах инклинометра, что является важным при прогнозе землетрясений.

Приложение

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, разделенный на две части делительной пластинкой.

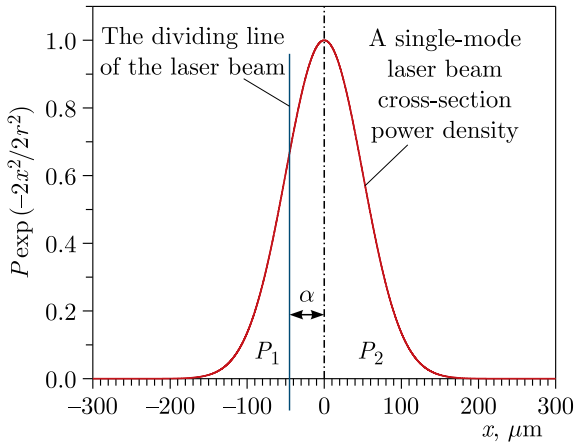


Рис. 28. Разделение одномодового лазерного луча диаметром 200 мкм делительной пластинкой

Определим относительную разность мощностей лазерных лучей, падающих на фотоприемники PhD1 и PhD2 (см. рис. 3). Мощность P_1 лазерного луча, пропущенная делительной пластинкой, и отраженная мощность P_2 показаны на рис.28 и записываются как

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{2P}{\pi r^2} P_y P_x = \frac{2P}{\pi r^2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2y^2}{r^2}\right) dy \right) \int_{-w}^a \exp\left(-2\frac{x^2}{r^2}\right) dx = \\
 &= P \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{w\sqrt{2}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right) \right\},
 \end{aligned}$$

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

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

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

$$= 2P \frac{1}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{r}\right), \quad (17)$$

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Azaryan N., Batusov V., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Trubnikov G., Shirkov G., Gayde J., Di Girolamo B., Mergelkuhl D., Nessi M.* The Precision Laser Inclinometer Long-Term Measurement in Thermo-Stabilized Conditions (First Experimental Data) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 4. P. 532–535.
2. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M., Shirkov G., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D.* The Calibration of the Precision Laser Inclinometer // *Ibid.* No. 7. P. 819–823.
3. *Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D., Schaumann M., Wenninger J., Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Shirkov G., Trubnikov G.* The Monitoring of the Effects of Earth Surface Inclination with the Precision Laser Inclinometer for High Luminosity Colliders // *Proc. of "RuPAC2016"*, St. Petersburg, Russia, 2016. P. 210–212.
4. *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 Inclinometer // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14, No. 1. P. 112–122.

5. *Azaryan N., Batusov V., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Trubnikov G., Shirkova G., Gayde J.-Ch., Di Girolamo B., Herty A., Mainaud Durand H., Mergelkuhl D.* Rude Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinator Instruments and the Classic Hydrostatic Level System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14, No. 3. P. 480–492.
6. *Michelet G. A., Trenton J. P.* Dispositif de Positionnement Automatique d'un Faisceau Laser. Fr. Patent FR 2 616 555-A1. 1987.
7. *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.
8. *Meschede D.* Optics, Light and Lasers. The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Second, Revised and Enlarged Ed. 2007.
9. *Gray J., Thomas P., Zhu X. D.* Laser Pointing Stability Measured by an Oblique-Incidence Optical Transmittance Difference Technique // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. V. 72, No. 9.
10. *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.
11. *Шандыбина Г. Д., Парфенов В. А.* Информационные лазерные технологии. СПб.: Ун-т ИТМО, 2008. 107 с.
12. *Tricot F., Phung D. H., Lours M., Guérandel S., de Clercq E.* Power Stabilization of a Diode Laser with an Acousto-Optic Modulator // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89, No. 11. P. 113112.
13. *Кирюников К. В., Шишаев А. В.* Широкополосная система стабилизации интенсивности лазерного излучения. М., 1983.
14. *Говор И. Н., Нестеренко В. М.* Стабилизатор мощности излучения оптического квантового генератора // *ПТЭ.* 1974. № 3.
15. *Huang H., Wang J., Ni H., Zhang J., Gao R., Guan L., Wang G.* A Novel Power Stability Drive System of Semiconductor Laser Diode for High-Precision Measurement // *Meas. Control.* 2019. V. 52, No. 5–6. P. 462–472.
16. *Kwee P., Willke B., Danzmann K.* New Concepts and Results in Laser Power Stabilization // *Appl. Phys. B.* 2011. V. 102. P. 515–522.
17. *Петропавловский В. М., Топоркова Л. В.* Способ стабилизации мощности излучения лазера // *Инфокоммуникационные технологии.* 2013. Т. 11, № 2. С. 65–68.
18. *Нойкин Ю. М.* Модуляция и демодуляция оптической несущей // *Метод. указания по дисциплине «Физические основы оптической связи».* Ч. VI. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2007. 20 с.
19. *Серебренников Л. Я., Краковский В. А., Чуманов М. В., Паргачев И. А., Шандаров С. М.* Акустооптические модуляторы лазерного излучения на нелинейно-оптических кристаллах РКТР // *Электрон. средства и системы управления: Материалы докл. междунард. науч.-практ. конф.* 2013. № 2. С. 137–140.
20. *Табарин В. А., Потоцкий А. Ю., Иванова Н. А.* Двухтактный фарадеевский модулятор лазерного излучения // *Вестн. ТюмГУ. Физико-матем. моделирование. Нефть, газ, энергетика.* 2015. Т. 1, № 2. С. 69–74.