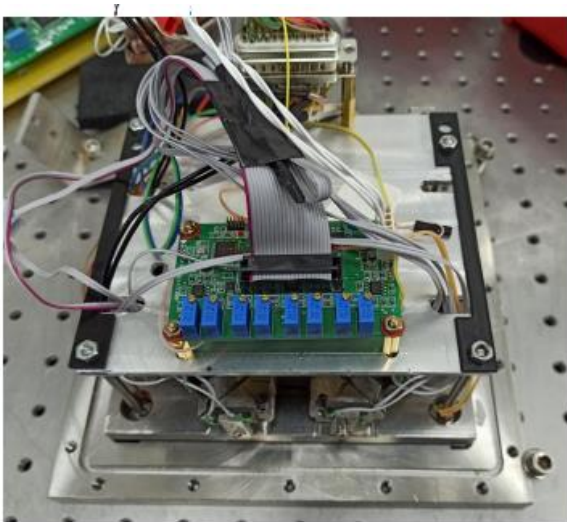


Стабилизация мощности излучения лазерного источника для Малогабаритного Прецизионного лазерного инклинометра с помощью АЦП и ЦАП. Часть II

М.В.Ляблин, Ю.В.Клемешов

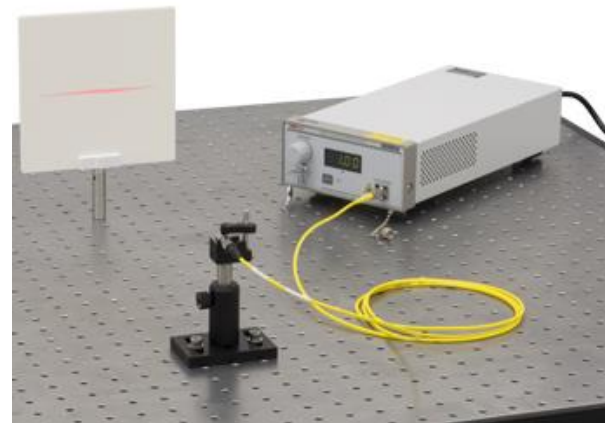
Стабилизация мощности лазерного излучения в МПЛИ



Малогобаритный Прецизионный
Лазерный Инклинометр

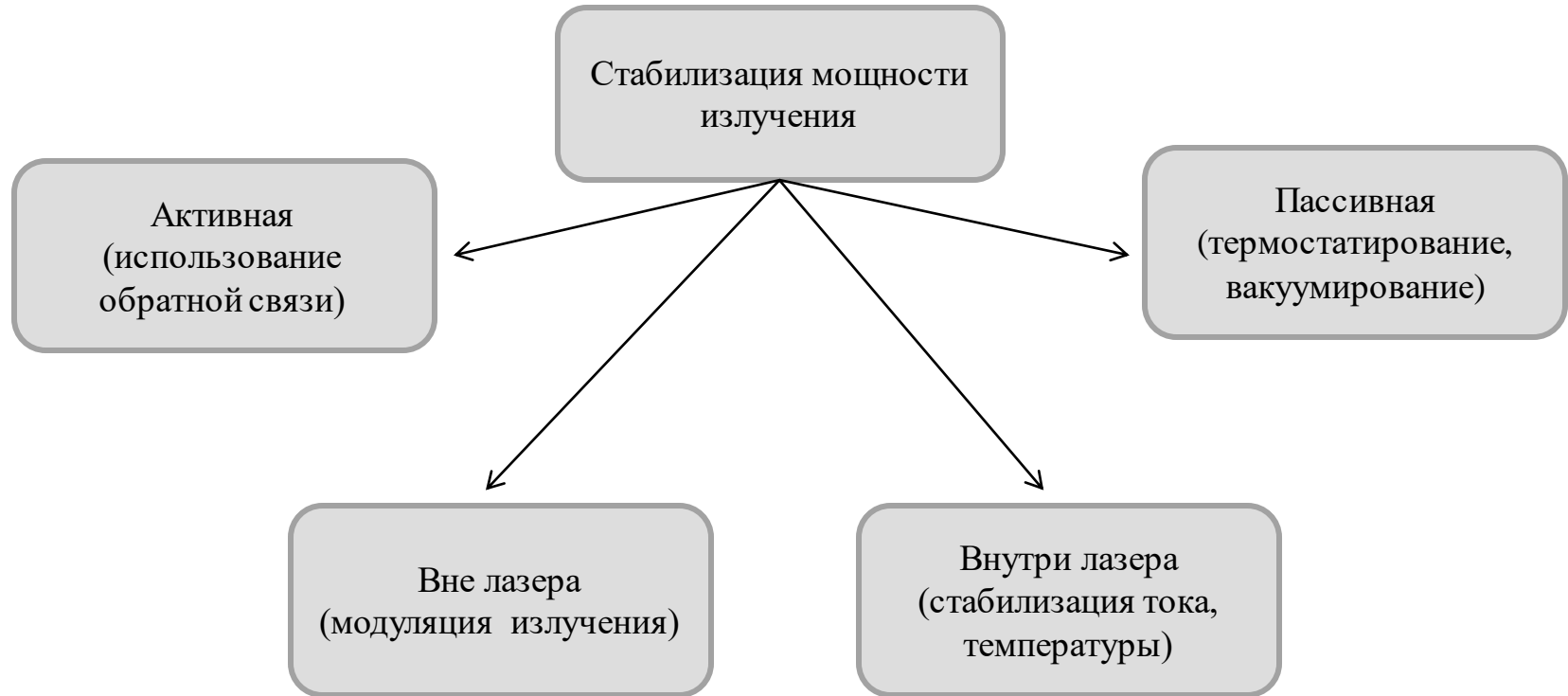
Основная задача состоит в том, чтобы обеспечить долговременную (в течении нескольких месяцев) стабильность мощности излучения лазерного источника Thorlabs S1FC635.

На современном этапе модернизации проекта лазерного инклинометра осуществлен переход на оптоволоконный лазер с резонатором Фабри-Перо - Thorlabs S1FC635. Недостаток данного типа лазеров – ухудшение стабильности мощности излучения при воздействии внешних факторов на оптоволокно (механическое воздействие, температурный дрейф и т.д.).



Лазер Thorlabs S1FC635

Способы стабилизации лазерной мощности



Способы стабилизации лазерной мощности

- с помощью акусто-оптического модулятора (AOM)

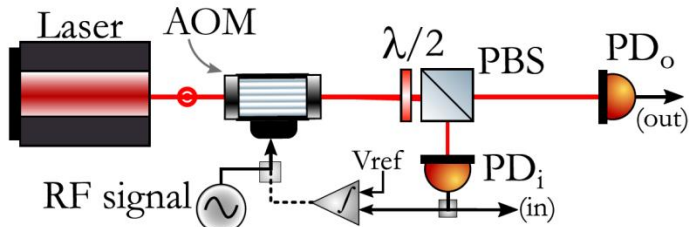


Схема стабилизации лазерной мощности с использованием AOM

В схеме стабилизации лазерный луч проходит через акусто-оптический модулятор (AOM), полуволновую пластину ($\lambda/2$) и поляризационный светоделительный куб (PBS).

После деления один луч является выходным (используемым) регистрируется фотодиодом PD_o , а второй луч регистрируется фотодиодом PD_i , сигнал с которого вычитается из опорного напряжения (V_{ref}). Полученный сигнал ошибки проходит через пропорционально-интегральный регулятор, выход которого подключен к аттенюатору с аналоговым управляющим входом. Изменение сигнала на этом входе контролирует уровень амплитуды модулирующего радиосигнала для AOM (RF signal, частотой 80 МГц), который поступает на основной вход аттенюатора.

Способы стабилизации лазерной мощности

- с помощью электро-оптического модулятора (ЭОМ)

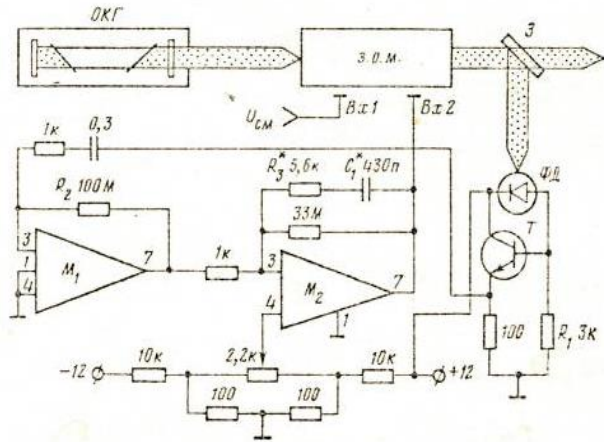


Схема стабилизации лазерной мощности с использованием ЭОМ

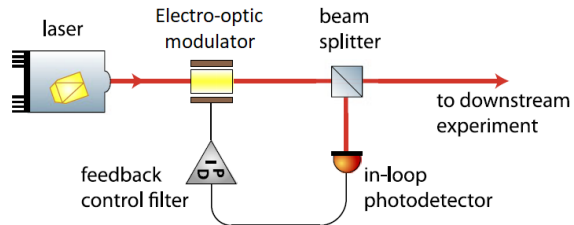
Лазерный луч из оптического квантового генератора (ОКГ) или лазера проходит через электрооптический модулятор (ЭОМ). На один из входов ЭОМ подается рабочее напряжение смещения в диапазоне $0 \dots 200\text{В}$ (U_{cm}), которое определяет коэффициент пропускания (средний уровень интенсивности излучения на выходе ЭОМ).

С выхода ЭОМ после делительного зеркала (З), часть луча подается на фотодиод (ФД). Сигнал с ФД усиливается на транзисторе (Т). Далее усиленный сигнал идет на дифференциатор на ОУ (М1), который используется для подавления низкочастотных колебаний мощности.

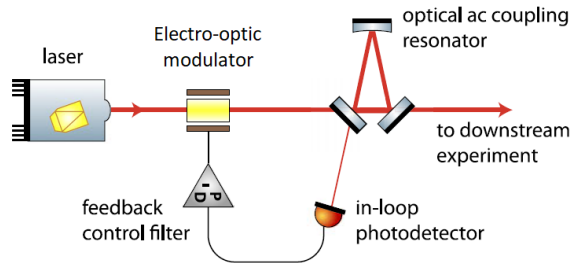
Интегратор на ОУ М2 подавляет колебания мощности в области высоких частот. Выходной сигнал с интегратора подается на второй вход ЭОМ (сигнал с размахом $\pm 10\text{В}$), обеспечивая коррекцию интенсивности излучения на ЭОМ.

Способы стабилизации лазерной мощности

- с применением оптического резонатора



a Traditional power stabilization



b Power stabilization with optical ac coupling

Схемы стабилизации лазерной мощности до и при замене делительного куба на оптический резонатор

В обычных схемах стабилизации есть источники шума, которые трудно поддаются уменьшению («дробовой» шум фотоприемника, шумы электронных компонентов). Однако их можно частично исключить, если заменить светоделительный куб (beam splitter) на оптический резонатор (optical ac coupling resonator) с узкой полосой пропускания (например, в схеме стабилизации на основе оптического модулятора).

Резонатор состоит из трех зеркал. Одна часть входного луча сразу отражается от одного зеркала, а вторая часть проходит внутрь резонатора. Внутри него подавляется несущая составляющая модулированного излучения. В результате фотоприемник (in-loop-photodetector) регистрирует излучение, содержащее часть исходного луча и часть отраженного луча в резонаторе. В спектре сигнала с фотоприемника будет подавлена несущая/постоянная составляющая, что позволяет более точно детектировать переменную составляющую (колебания мощности излучения).

Способы стабилизации лазерной мощности

- с помощью «тепловой» линзы

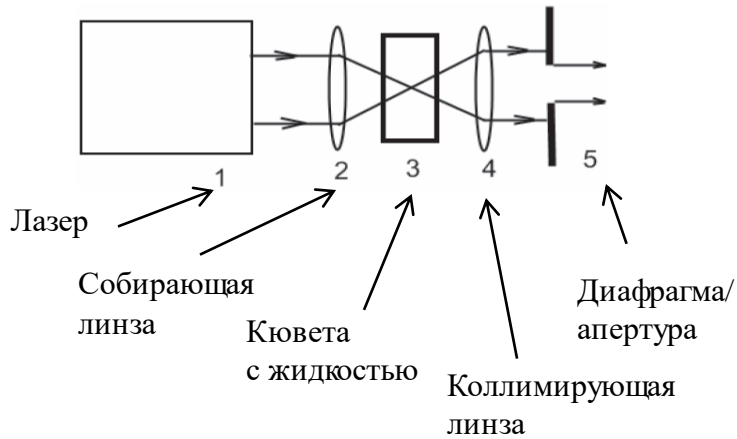


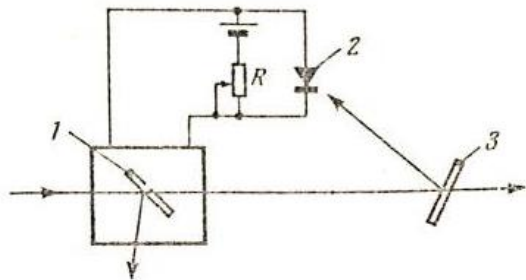
Схема стабилизации лазерной мощности на основе «термооптического» эффекта

«Термооптический» принцип стабилизации – стабилизация лазерной мощности на основе эффекта «тепловой» рассеивающей линзы - явления самодефокусировки лазерного пучка, проходящего через среду с отрицательным показателем преломления.

Лазерный луч 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, а так как «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 постоянства интенсивности на оси пучка. Последующая линза (4), расположенная после кюветы, коллимирует пучок, а с помощью диафрагмы (5) выделяется центральная часть пучка.

Способы стабилизации лазерной мощности

- с помощью делительных пластин



1,3 – Делительные пластины

2 – Фотодиод

Схема стабилизации
лазерной мощности с помощью
делительных пластин

Система стабилизации основана на зависимости коэффициента отражения стеклянной пластинки от угла падения излучения.

Часть излучения (~10%) ответвляется неподвижной делительной пластинкой (3) на фотодиод (2), сигнал с которого сравнивается с опорным сигналом. Полученный разностный токовый сигнал подается на стрелочный микроамперметр (0...100мкА).

На его рамке закреплена ответвляющая пластинка (1), которая поворачивается вокруг оси, перпендикулярной пучку и проходящей через его центр так, что мощность излучения на выходе остается постоянной в определенных пределах.

Способы стабилизации лазерной мощности

- внутренняя стабилизация

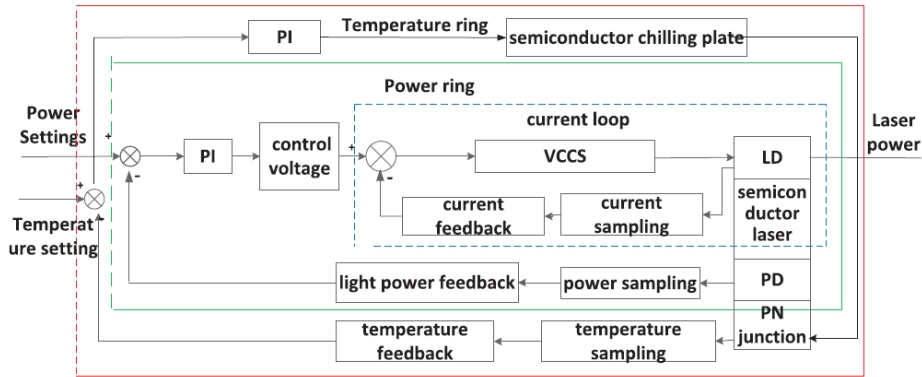


Схема трехконтурной системы стабилизации тока, мощности излучения и температуры лазерного диода

Первый контур (current loop) содержит источник тока для лазерного диода (LD), построенный на регуляторе напряжения (VCCS). Ток, протекающий через лазерный диод, преобразуется в напряжение (current sampling) и используется как сигнал обратной связи для источника тока.

Во втором контуре (power ring) фотодиод (PD) преобразует оптический сигнал, отраженный от резонатора лазерного диода в электрический сигнал. После преобразования фототока в напряжение (power sampling), полученный сигнал усиливается, оцифровывается и сравнивается с заданным значением. Полученная ошибка поступает на пропорционально-интегральный регулятор (PI), который корректирует напряжение уставки первого контура. Третий контур (temperature ring) включает датчик температуры, измеряющий температуру PN-перехода лазерного диода, и пропорционально-интегральный регулятор, управляющий термоэлектрическим элементом (semiconductor chilling plate), благодаря которому поддерживается постоянная температура PN-перехода.

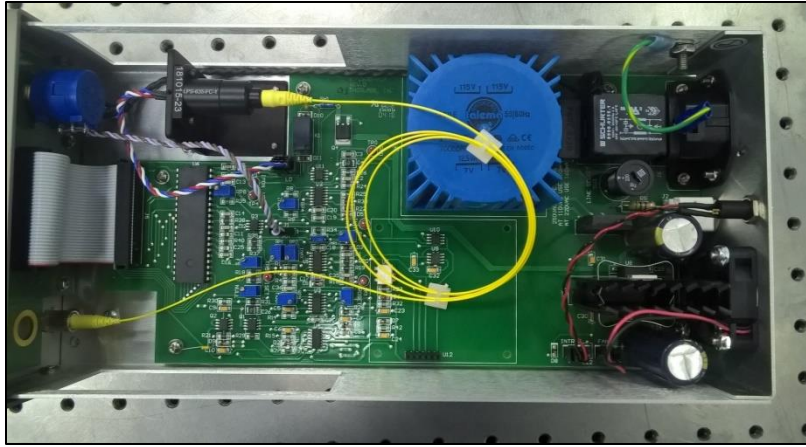
Анализ лазера Thorlabs S1FC635

Характеристики лазера Thorlabs S1FC635



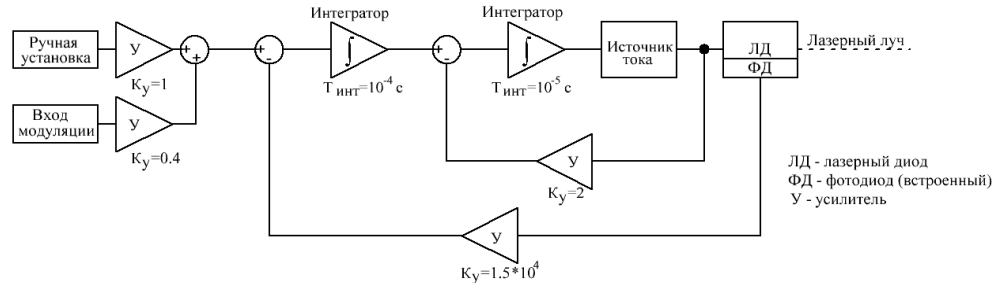
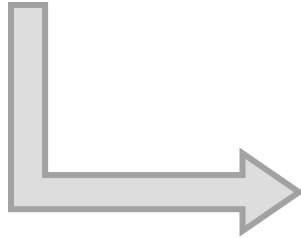
Длина волны излучения	мин. 630 нм
	тип. 635 нм
	макс. 640 нм
Полная выходная мощность	2.5 мВт
Стабильность мощности	15 мин.: ± 0.05 дБ; 24ч.: ± 0.1 дБ ($4.6 \cdot 10^{-2}$ в относит. показателе, после часа работы при температуре $25 \pm 10^\circ\text{C}$);
Тип оптоволокна	SM (одномодовое)
Класс лазера	3R
Разрешение уставки	0.01 мВт
Вход модуляции	0...5В, сопр-е 50 Ом
Полоса модуляции	5 кГц (при полной глубине модуляции)
	30 кГц (при малом сигнале)
Рабочая температура	$15^\circ\text{C} \dots 35^\circ\text{C}$

Анализ лазера Thorlabs S1FC635



Основные элементы лазера:

- лазерный диод HL6320G в корпусе LPS-635-F с коннектором FC/PC;
- плата драйвера для подачи стабилизированного тока на лазерный диод с оптоволоконным выходом;
- элементы индикации.



Упрощенная системная модель полупроводникового лазера S1FC635

Измерение мощности излучения

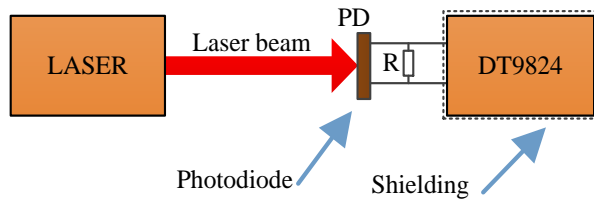
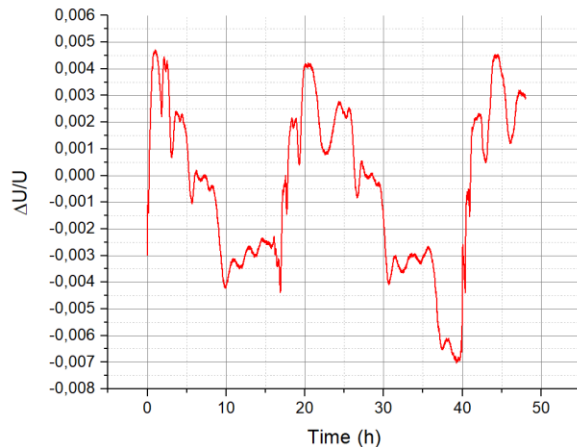


Схема эксперимента по измерению стабильности лазерной мощности



Сигнал с фотоприемника в относительном изменении

Для измерения экспериментальной стабильности мощности излучения использовался фотоприемник (Hamamatsu S12915-1010R), включенный в фотогальваническом режиме. Сигнал с фотоприемника записывался с помощью АЦП DT9824 при частоте выборки 1.17Гц. Измерения проводились в лабораторных условиях. АЦП DT9824 помещалось в металлический бокс для экранирования от электромагнитных помех.

На графике представлены данные в относительном изменении напряжения за 48 часов при отсутствии внешней стабилизации лазера. Относительный показатель стабильности мощности излучения составляет $\sim 1.15 \cdot 10^{-2}$ (peak-to-peak).

Метод стабилизации мощности с помощью АЦП и ЦАП

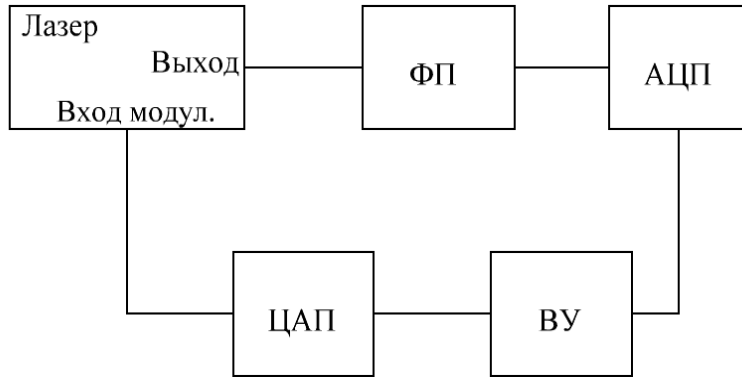


Схема стабилизации мощности с использованием АЦП и ЦАП

Сигнал лазера регистрируется фотоприемником (ФП), включенном в фотогальваническом режиме, и поступает на прецизионный и малошумящий АЦП.

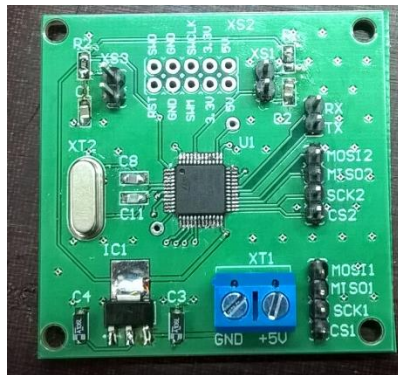
С АЦП данные передаются для обработки в вычислительное устройство (ВУ). Самый простой принцип обработки - если напряжение на входе АЦП снизилось, то на выходе ЦАП нужно его увеличить и наоборот.

ВУ формирует и передает данные прецизионному ЦАП. С выхода ЦАП напряжение подается на вход модуляции лазера.

Система стабилизации на основе АЦП и ЦАП



Плата АЦП и ЦАП



Плата контроллера

При разработке прототипа данной системы использовались малошумящие и прецизионные АЦП (ADS1255, 24 бит) и ЦАП (DAC8881, 16 бит) с соответствующими источниками опорного напряжения (REF5025). В качестве управляющих устройств использовались Raspberry Pi 3B / микроконтроллер из серии STM32F0.

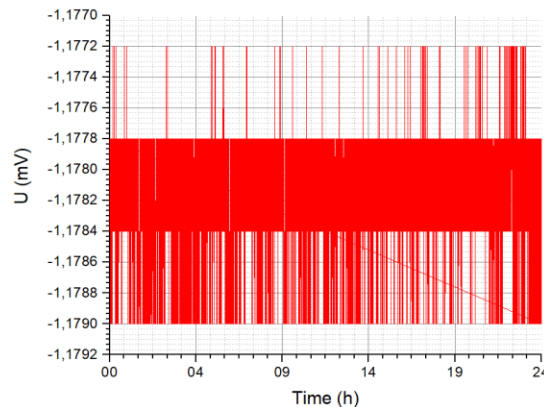
Для АЦП и ЦАП, а также микроконтроллера были разработаны соответствующие схемы и отдельные платы. При разводке платы для АЦП и ЦАП учитывались требования, которые предъявляются к прецизионным и малошумящим схемам. Плата содержит соответствующие разъемы для подключения внешнего питания (+5В), фотодиода и выходной разъем для подключения к лазеру.

Получаемые платой контроллера данные от АЦП дублируются на ПК для мониторинга работы стабилизации.

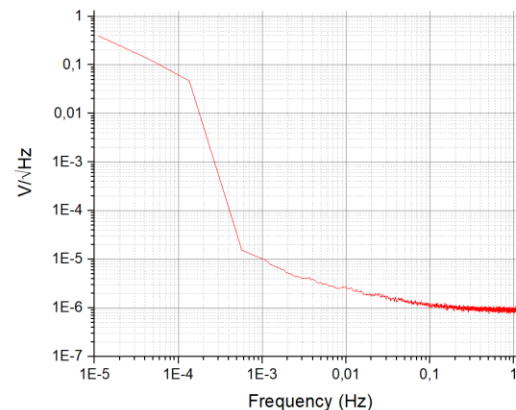
Характеристики АЦП ADS1255



Разрешение	24 бит/
Кол-во каналов	1 differential / 2 single-ended
Частота выборки	2.5SPS-30kSPS
Питание	4.75В-5.25 В (аналог.), 1.8В-3.6 В (цифр.), 0.5-2.5В (опор.)
Температурный дрейф нуля	$\pm 100\text{нВ}/^\circ\text{C}$ (при PGA=1) ; $\pm 4\text{нВ}/^\circ\text{C}$ (при PGA=64)
Температурный дрейф усиления	$\pm 0.8\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Ошибка смещения нуля	0.247мкВ (rms, PGA=1, 2.5SPS) 0.033мкВ(rms, PGA=64, 2.5SPS)
Ошибка усиления	$\pm 0.005\%$ (при PGA=1) ; $\pm 0.03\%$ (при PGA=64)
Интегральная нелинейность	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$ FSR (при PGA=1) ; $\pm 7 \cdot 10^{-4}$ FSR (при PGA=64)
Особенности	PGA(1...64), встроенный буфер, цифровой фильтр, дифференциальный вход опорного напряжения



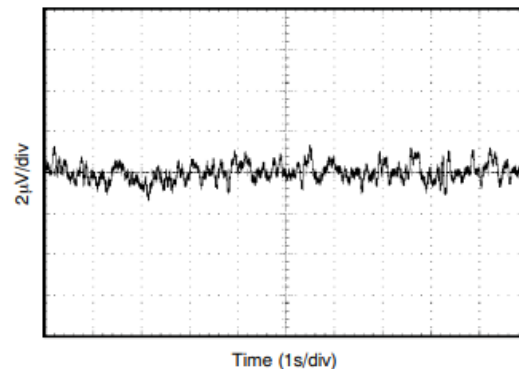
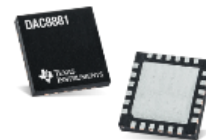
Суточные шумы
АЦП ADS1255 при
скорости выборки
2.5SPS



Спектральный
состав шумов
ADS1255

Характеристики ЦАП DAC8881

	ЦАП DAC8881	ЦАП DAC9881
Разрешение	16 бит	18 бит
Кол-во каналов	1 single-ended	
Питание	2.7В-5.5В(аналог.+цифр.) 1.25-5.5В(опорное)	2.7В-5.5В(аналог.+цифр.) 1.25-5.5В(опорное)
Низкочастотный шум / дрейф	2мкВ (peak-to-peak, 0.1...10Гц) 5ppm от полной шкалы (за 500 часов, $5.5 \cdot 10^{-7}$ Гц)	2мкВ (peak-to-peak, 0.1...10Гц) 0.1ppm от полной шкалы (за 500 часов, $5.5 \cdot 10^{-7}$ Гц)
Температурный дрейф нуля	$\pm 0.5 \dots 1 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ от полной шкалы	$\pm 0.25 \dots 0.8 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ от полной шкалы
Температурный дрейф усиления	$\pm 0.5 \dots \pm 1 \text{ppm}/^\circ\text{C}$	$\pm 0.25 \dots \pm 0.4 \text{ppm}/^\circ\text{C}$
Ошибка смещения нуля	$\pm 4 \dots \pm 8 \text{LSB}$	$\pm 16 \dots \pm 32 \text{LSB}$
Ошибка усиления	$\pm 4 \dots \pm 8 \text{LSB}$	$\pm 16 \dots \pm 32 \text{LSB}$
Дифференциальная нелинейность	$\pm 0.25 \dots \pm 1 \text{LSB}$	$\pm 0.75 \dots \pm 2 \text{LSB}$
Интегральная нелинейность	$\pm 0.5 \dots \pm 1 \text{LSB}$	$\pm 0.1 \dots \pm 2 \text{LSB}$
Особенности	Встроенный буфер, максимальный выходной ток 2.5мА, дифференциальный вход опорного напряжения с коррекцией	



Выходной низкочастотный шум ЦАП DAC8881(0.1-10Гц)

Система стабилизации на основе АЦП и ЦАП

Для управления процессом стабилизации, на микроконтроллере был реализован цифровой интегратор:

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

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

- 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 – уставка/постоянное смещение напряжения на выходе ЦАП (код ЦАП)

Алгоритм расчета интегрального коэффициента K_i : 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 .

Измерение мощности излучения при стабилизированном лазере

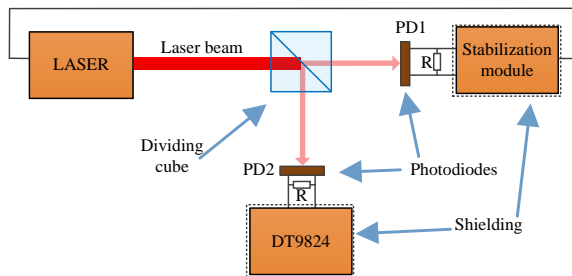
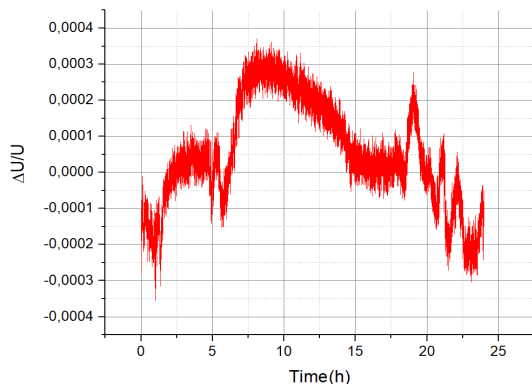


Схема эксперимента для тестирования метода стабилизации



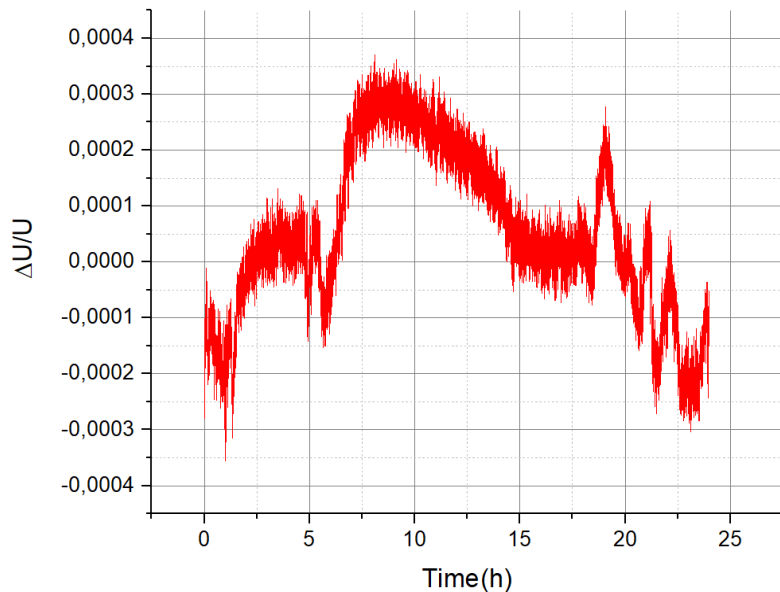
Сигнал с фотоприемника при стабилизированном лазере в относительном изменении

Для проверки работоспособности системы стабилизации был собран лабораторный стенд на оптическом столе.

На выходе лазерного луча был установлен делительный куб. Один из лучей регистрирует фотоприемник, подключенный к модулю стабилизации, а второй луч – фотоприемник, подключенный к одному из каналов АЦП DT9824. Оба фотоприемника (Hamamatsu S12915-1010R) были включены в фотогальваническом режиме и сверху закрывались темной тканью. Выход системы стабилизации подключался через коаксиальный кабель к BNC разъему входа модуляции лазера.

Выходная мощность лазера была установлена на уровне 1 мВт. Модуль стабилизации и АЦП DT9824 помещались в металлические боксы с целью защиты от электромагнитных помех.

Анализ результатов



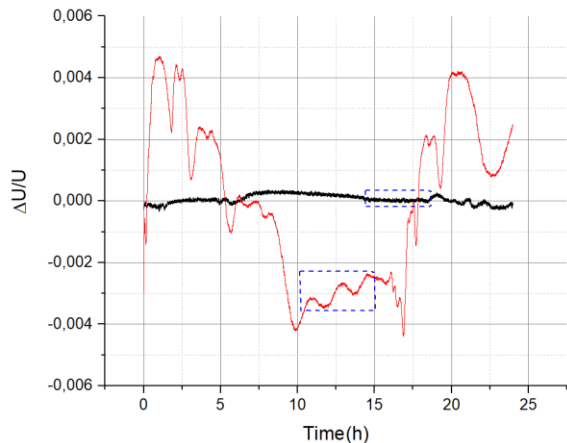
Сигнал с фотоприемника при стабилизированном лазере в относительном изменении

Из графика следует, что относительный показатель стабильности составляет $6 \cdot 10^{-4}$ (peak-to-peak). В переводе на мВт, при мощности излучения 0.5 мВт, стабильность составляет $3 \cdot 10^{-4}$ мВт.

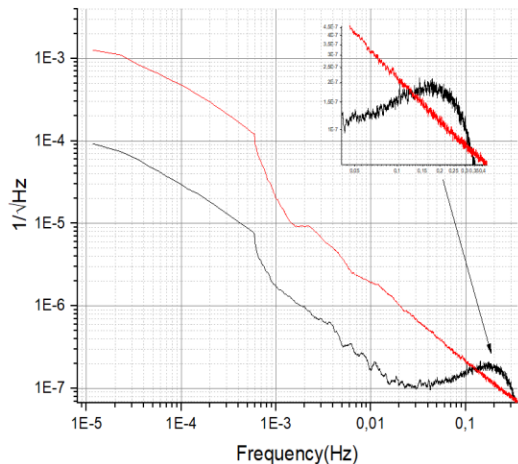
В целом на графике можно увидеть кратковременные участки (например, в ночное время (время начала записи - 13:28) за 4 часа стабильность мощности не превышала $0,75 \cdot 10^{-4}$ мВт). Всплески, начинающиеся с 7 часов утра, могли быть связаны с индустриальными шумами.

Если говорить о долговременной нестабильности, то она также может быть связана с колебаниями температуры в самой лаборатории.

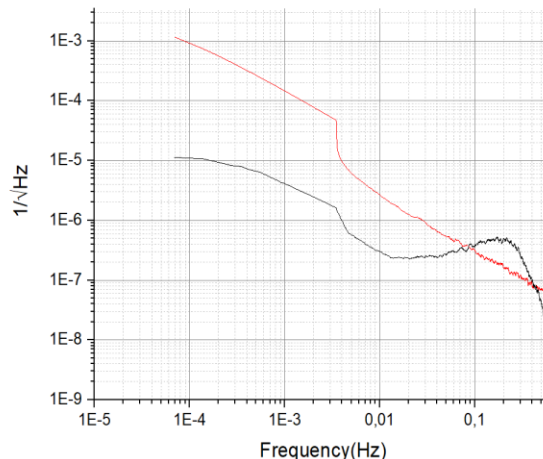
Анализ результатов



Для сравнения показаны графики относительного изменения напряжения на фотоприемнике при стабилизированном и нестабилизированном лазере. Синим цветом выделены 4-х часовые участки с наилучшей кратковременной стабильностью в обоих случаях.

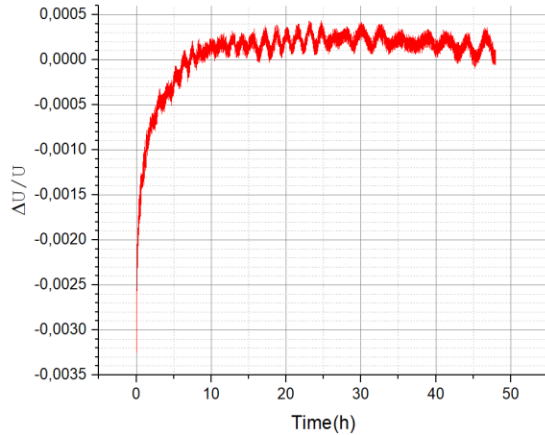


Спектральная плотность по относительным данным за сутки без стабилизации (красн.) и со стабилизацией лазера (черн.)



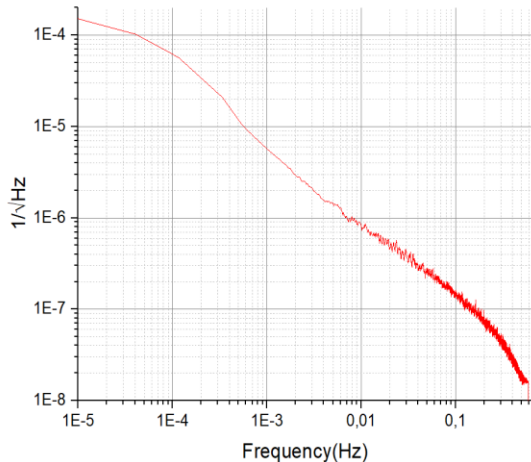
Спектральная плотность по относительным данным за 4 часа без стабилизации (красн.) и со стабилизацией лазера (черн.)

Анализ результатов



Сигнал с фотоприемника при стабилизированном лазере в термоизолированных условиях

АЦП DT9824 зависит от внешней температурной стабильности. Поэтому лабораторный стенд был перенесен в термоизолированную лабораторию (с суточной температурной стабильностью $0,1^{\circ}\text{C}$) и был протестирован там. На графиках представлены относительное изменение сигнала фотоприемника при стабилизированном лазере в термоизолированных условиях и соответствующая спектральная плотность, вычисленная по полученным данным.



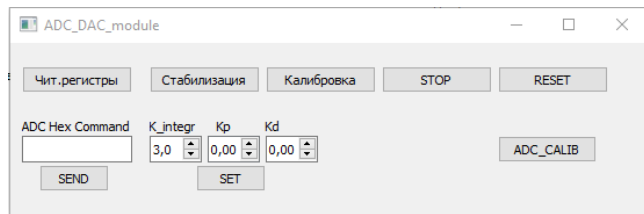
Спектральная плотность по относительным данным за сутки в термоизолированных условиях

Из графика относительного изменения на участке, начинающегося с 10-го часа, стабильность мощности составляет $4,5 \cdot 10^{-4}$. Также на графике видны колебания — с частотой $1,85 \cdot 10^{-4}$ Гц и $1,175 \cdot 10^{-4}$ Гц.

Текущая реализация модуля стабилизации на основе АЦП и ЦАП



Модуль стабилизации(вид сверху)



Прототип программы управления
модулем стабилизации

На данный момент разработан готовый модуль, включающий в себя АЦП, ЦАП и микроконтроллер для управления на одной плате. Питание модуля, управление, перепрошивка и передача данных в ПК осуществляется по шине USB компьютера. Имеется соответствующая изоляция от ПК - цифровая и по питанию.

Разработан прототип программы для управления модулем, в которой в режиме работы возможно корректировать вручную коэффициент(ы) для цифрового регулятора.

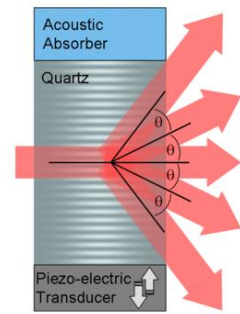
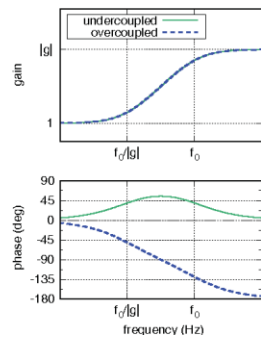
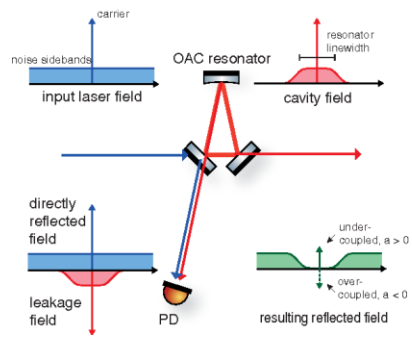


Подключение
модуля
стабилизации
к лазеру

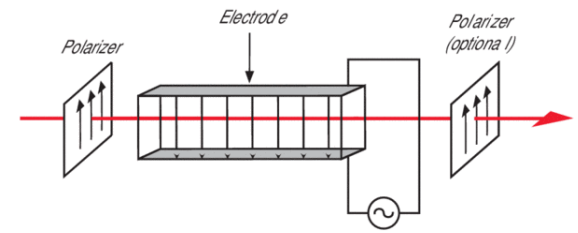
Выводы

1. Определены величины относительной стабильности мощности лазера для ПЛИ. Стабильность мощности должна быть лучше 10^{-3} .
2. Экспериментально проведен мониторинг стабильности мощности лазерного излучения в течение 1-2 суток для полупроводникового лазера с резонатором Фабри-Перо (Thorlabs S1FC635). Стабильность мощности установлена на относительном уровне $1,15 \cdot 10^{-2}$.
3. Проверен метод стабилизации мощности лазерного излучения с помощью АЦП и ЦАП, применение которого улучшило суточную стабильность мощности лазерного излучения до относительного уровня $6 \cdot 10^{-4}$. За 24 часа в частотной области до 0,01 Гц, стабильность мощности увеличена в 10 раз, для четырехчасовых участков в диапазоне частот от 10^{-4} Гц до $3 \cdot 10^{-3}$ Гц - в 100 раз. В термоизолированных условиях показатель стабильности был установлен на относительном уровне $4,5 \cdot 10^{-4}$ ($2,25 \cdot 10^{-4}$ мВт при 0,5 мВт) за 38 часов.
4. Разработан, изготовлен и протестирован модуль стабилизации.
5. Для улучшения полученных результатов в данной системе возможно:
 - применить другую элементную базу, достичь минимального уровня шума собственных шумов платы АЦП и ЦАП;
 - совершенствовать алгоритм стабилизации (например, изменять интегральный коэффициент в зависимости от времени суток, температуры окружающей среды).
6. Для улучшения долговременной стабильности мощности, необходимо исследовать другие методы стабилизации (например, разработать систему термоизоляции лазерного источника и модуля стабилизации).

Спасибо за внимание!



AOM



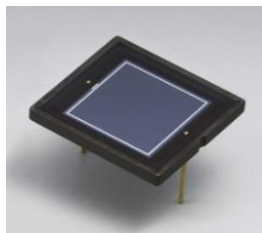
EOM



**HL6320G - 635 nm, 10 mW,
Ø9 mm, Laser Diode**



**LPS-635-FC - 635
nm, 2.5 mW**



S12915-1010R



DT9824

Spectral response

