

Система контроля положения лазерного пучка в схеме записи волоконных брэгговских решеток методом поперечного сканирования сердцевины

**Котюшев Михаил Юрьевич**

Физический факультет. Кафедра автоматизации физико-технических исследований.

Группа №14305, 2017.

Научный руководитель:

**А. А. Вольф**, аспирант ИАиЭ СО РАН.

### **Аннотация**

В ходе данной работы была спроектирована и реализована система автоматического контроля затвора лазера в схеме записи волоконных брэгговских решеток методом поперечного сканирования сердцевины.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, запись волоконных брэгговских решеток методом сканирования волокна.

Работа выполнена в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН.

## **Аннотация**

В ходе данной работы была спроектирована и реализована система автоматического контроля затвора лазера в схеме записи волоконных брэгговских решеток методом поперечного сканирования сердцевины.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, запись волоконных брэгговских решеток методом сканирования волокна.

Работа выполнена в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН.

# Оглавление

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Введение</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Постановка задачи</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Запись волоконных брэгговских решеток методом сканирования лазерного пучка . . . . . | 4         |
| 2.2      | Проблемы записи решеток без контроля затвора лазера . . .                            | 5         |
| 2.3      | Требования к системе . . . . .   | 6         |
| <b>3</b> | <b>Принцип работы решения</b>  | <b>7</b>  |
| 3.1      | Задачи реализации аппаратной части системы . . . . .                                 | 7         |
| 3.2      | Программная часть . . . . .  | 10        |
| <b>4</b> | <b>Результаты</b>  | <b>12</b> |
| <b>5</b> | <b>Заключение</b>  | <b>13</b> |
| <b>6</b> | <b>Список литературы</b>   | <b>14</b> |

# 1 Введение

Запись волоконных брэгговских решеток (далее ВБР) является одной наиболее часто возникающих задач волоконной оптики и фотоники. Один из методов записи ВБР — запись сканированием лазерного пучка [1]. При записи этим методом возникает ряд трудностей, таких как невозможность записи структур произвольной формы или уменьшение прочности волокна при записи вследствие пробоя материала [2]. Сохранение исходной прочности возможно при записи через фазовую маску [3], либо при более низких энергиях лазерных импульсов при прямой записи (реализуется в данной работе).

Данная работа посвящена разработке системы контроля области модификации материала путем открытия/закрытия затвора лазера в процессе записи ВБР. Такая система контроля позволяет реализовывать специфичные геометрии показателя преломления ВБР без использования дополнительных оптических элементов, что является затруднительным для интерференционных методов записи. Примерами таких структур являются наклонные решетки, решетки с переменным периодом и т.д. Также такая система позволяет избежать пробоя материала волокна и потери прочности путем закрытия затвора лазера в областях повышенной плотности лазерного излучения.

Выполнение работы состоит из нескольких частей. Первая часть — аппаратная — разработка и реализация электрической схемы для конвертации уровней напряжения между цифровой и аналоговой частями системы, а также подключение и настройка сканера. Вторая — разработка прошивки для микроконтроллера, позволяющей задавать условия для открытия и закрытия затвора лазера, а также контролировать форму записываемой ВБР. Третья — разработка пользовательского интерфейса ПК для управления полученным устройством.

## 2 Постановка задачи

### 2.1 Запись волоконных брэгговских решеток методом сканирования лазерного пучка

Схема системы записи ВБР методом сканирования лазерного пучка изображена на рис. 1.

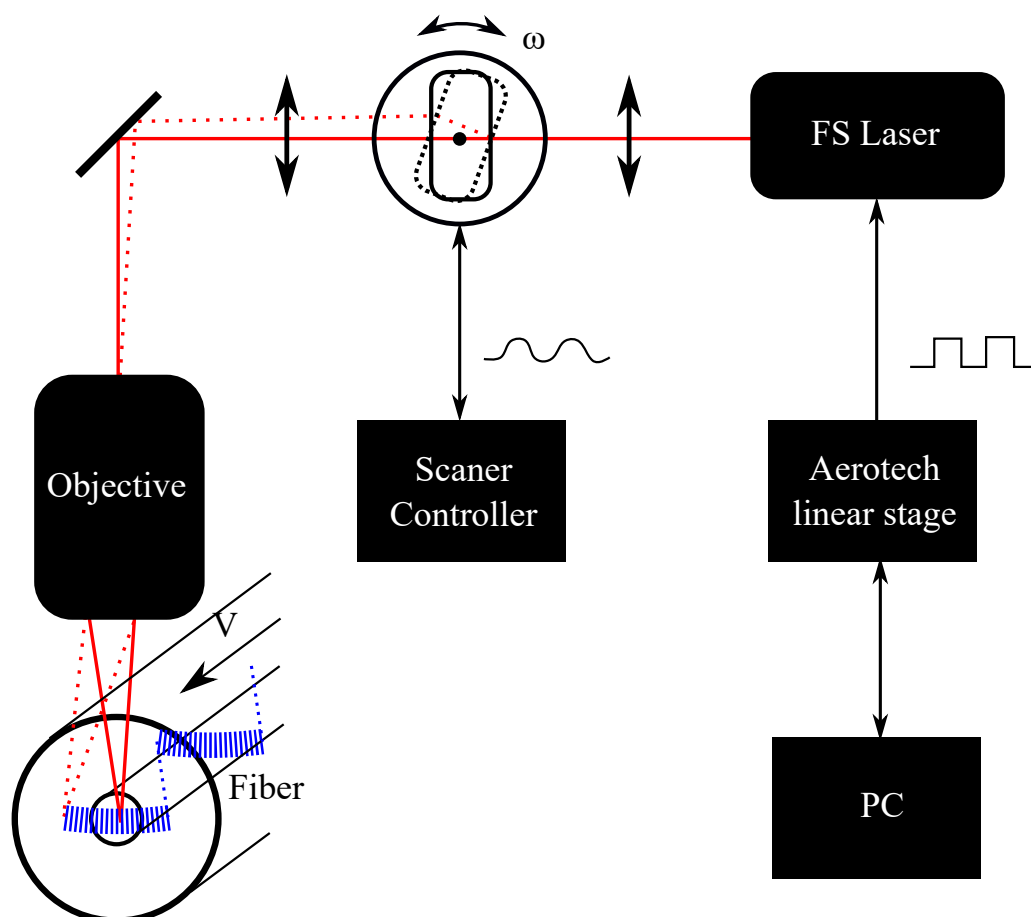


Рис. 1. Упрощенная схема системы записи ВБР методом сканирования волокна

С помощью линейного позиционера волокно протягивается через фокус лазера на постоянной скорости. Луч лазера доходит до зеркала, установленного на головке сканера и, в зависимости от положения сканера, через систему зеркал попадает в различные части волокна и модифицирует показатель преломления, записывая ВБР.

Такой метод записи ВБР порождает различные проблемы, рассматриваемые в следующем параграфе.

## 2.2 Проблемы записи решеток без контроля затвора лазера

Рис. 2 схематически изображает основные проблемы, возникающие при записи ВБР методом сканирования лазерного луча без контроля затвора лазера.

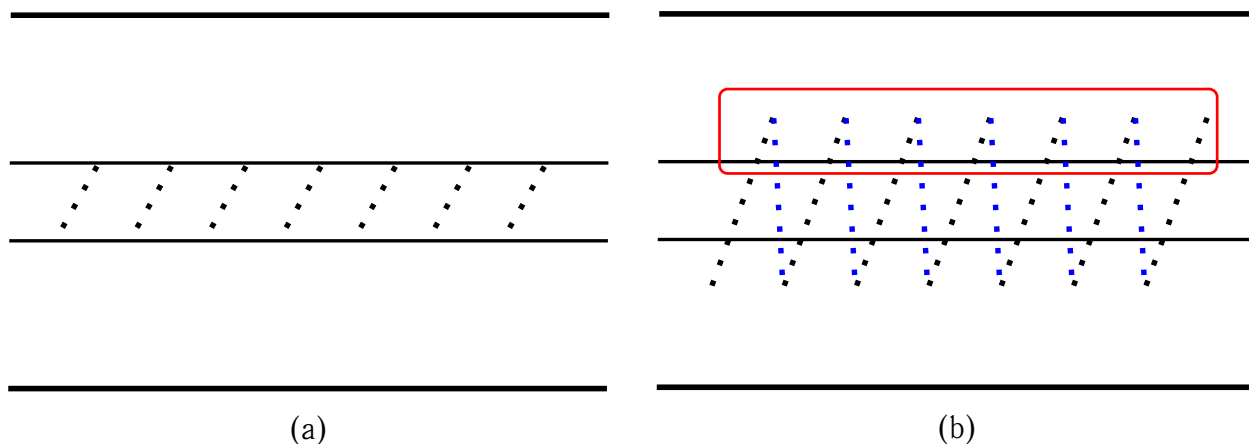


Рис. 2. (2a) "Идеальная" наклонная ВБР. (2b) наклонная ВБР, записанная методом сканирования лазерного пучка без контроля затвора лазера, синим выделены области обратного хода пучка лазера, красным обведены области с повышенной плотностью попаданий импульсов лазера.

Первая проблема — ограничение на форму получаемой структуры. Вторая проблема — пробой материала при записи. Ниже каждая из проблем рассматривается подробнее.

### Ограничения на форму области модификации показателя преломления

Первая проблема заключается в том, что при записи методом сканирования волокна без контроля затвора лазера становится невозможным избежать модификации показателя преломления при обратном ходе пучка лазера. Это, в свою очередь, делает невозможным получение таким методом записи решеток со специальным профилем показателя преломления, например наклонных ВБР, состоящих из чередующихся наклонных областей с различным показателем преломления (рис. 2a), что ограничивает возможности системы записи.

Пример структуры с дефектом этого типа показан на рис. 3a.

## Пробой материала и потеря прочности

При попадании большого числа импульсов лазера в одну область волокна происходит пробой материала с образованием микропустот и его необратимое повреждение, что влечет за собой ухудшение прочностных характеристик волокна [2].

При записи методом сканирования волокна в областях, где лазерный пучок меняет свое направление движения, плотность попаданий лазерных импульсов возрастает. При типичных энергиях записи это ведет к пробую материала волокна.

На рис. 3b представлены фотографии ВБР с ярковыраженными дефектами такого типа.

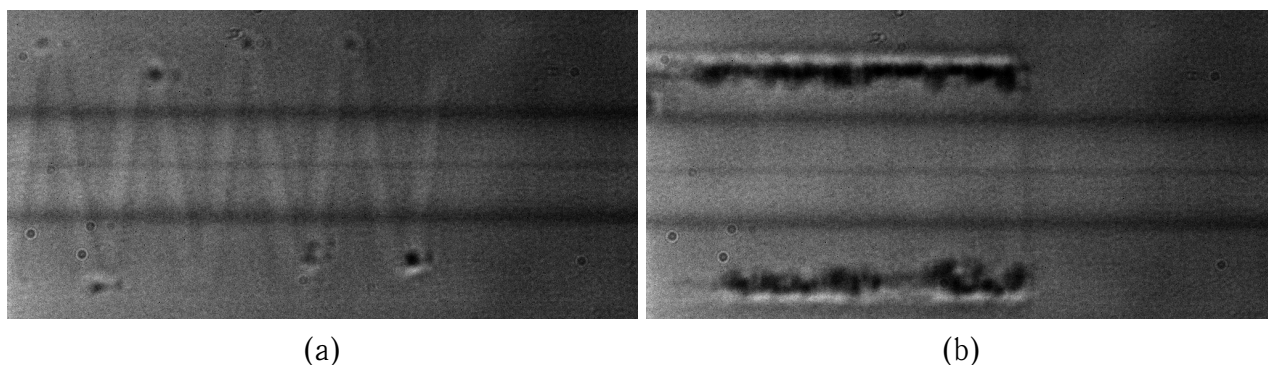


Рис. 3. Фотографии ВБР, записанных с частотой сканирования 5 Гц (3a) и 50 Гц (3b)

## 2.3 Требования к системе

Разрабатываемая система должна решать проблемы, описанные в параграфе 2.2 — позволять пользователю записывать структуры со специальным профилем модификации показателя преломления без ухудшения прочностных характеристик. Для полноты решения без привлечения дополнительных сторонних компонентов система должна осуществлять генерирование заданного пользователем сигнала для сканера.

Основное требование к системе контроля затвора лазера — быстрота принятия решения и осуществления закрытия/открытия затвора. Численно это выражается в максимальном времени принятия решения не большем, чем  $1/N$  часть периода записываемой решетки.

Кроме того, система должна быть легко переносимой в случае полной или частичной замены оборудования (сканер / энкодер).

### **3 Принцип работы решения**

Для реализации системы в качестве главного управляющего элемента была выбрана Arduino-совместимая плата Teensy 3.6 на базе микроконтроллера семейства ARM Cortex-M4F. Данный процессор имеет несколько быстродействующих (частота преобразования до 12 МГц) АЦП и несколько ЦАП с разрешением 16 и 12 бит соответственно, что является достаточным с точки зрения временных и пространственных погрешностей поставленной задачи (см. пар. 3.1).

#### **3.1 Задачи реализации аппаратной части системы**

В данном разделе описываются основные аспекты реализации аппаратной части системы.

##### **Преобразование диапазонов напряжений**

Текущая версия системы записи ВБР включает в себя сканер и энкодер, работающие в диапазоне напряжений от -10В до +10В. Ввиду того, что порты используемого в системе контроля затвора лазера микроконтроллера рассчитаны на работу в диапазоне от 0В до +3.3В, понадобился конвертер напряжений. В силу требования гибкости системы было решено использовать переменные резисторы, позволяющие в будущем легко перейти на другие диапазоны напряжений сканера и энкодера.

Для преобразования уровней напряжения сдвигом и делением были воплощены схемы делителя напряжения и сумматора из [4], изображенные на рис. 4.

##### **Временные и амплитудные искажения при использовании сигнала генератора**

Простейшая схема контроля затвора лазера подразумевает анализ и принятие решения на основании текущего сигнала генератора. Но такой подход обладает существенными недостатками, которые заключаются в наличии временных задержек в работе сканера и искажении амплитудной части сигнала на больших частотах из-за встроенного в сканер ПИД-регулятора.

На рис. 5 представлено сравнение сигнала, подаваемого на сканер и сигнала, получаемого с энкодера. Ввиду механических ограничений и внутреннего устройства сканера сигналы сильно отличаются — появляется вре-



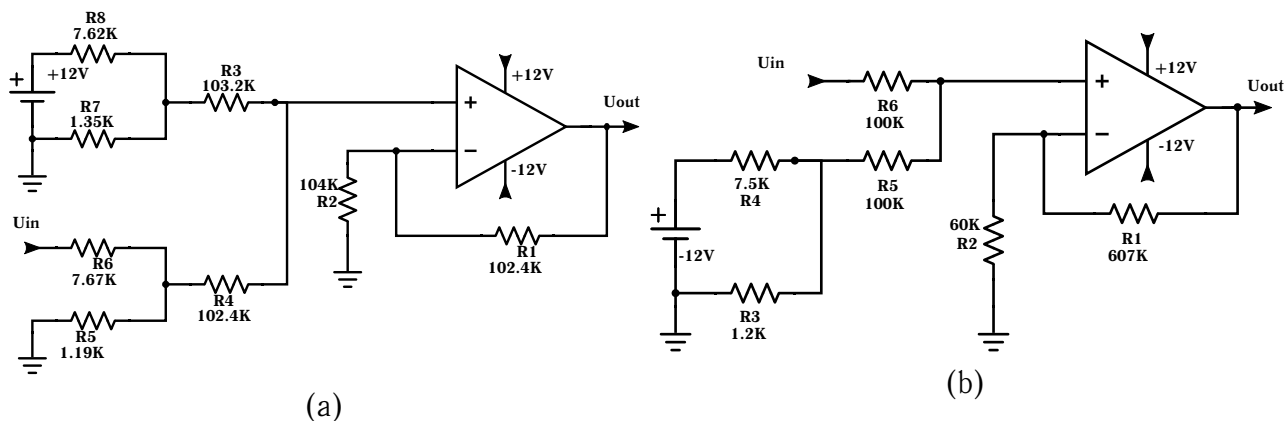


Рис. 4. Схема понижающего и повышающего преобразователя уровней напряжения для перевода диапазона от  $-10\text{В}$  до  $+10\text{В}$  в диапазон от  $0\text{В}$  до  $+3.3\text{В}$  (энкодер) и обратно (генератор)

менная задержка, падает амплитуда и частота, на больших частотах любой сигнал вырождается в гармонический. На практике это означает, что реальное положение сканера отличается от ожидаемого по подаваемому генератором сигналу.

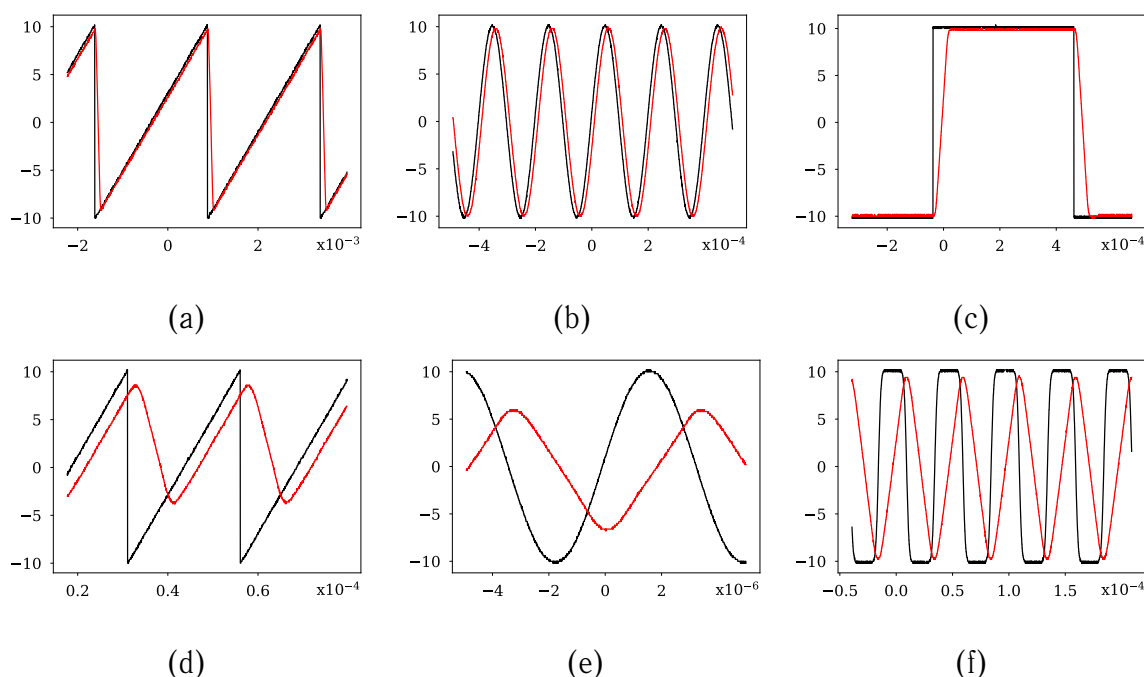


Рис. 5. Графики сигналов сканера. Черным изображен сигнал, подаваемый генератором, красным — сигнал, получаемый с энкодера. 5а, 5б и 5с — сканирование на низких частотах; 5д, 5е и 5ф — сканирование на высоких частотах

Ввиду высоких требований к точности этот фактор не позволяет использовать для управления затвором лазера напрямую сигнал с генератора — неизбежны запаздывания и неточности в срабатывании. Также этот фактор

накладывает ограничения на частоту сканирования, так как при высоких частотах форма сигнала искажается. Поэтому было решено использовать энкодер в качестве источника информации о положении сканера.

## Защита от выхода за диапазон допустимых напряжений

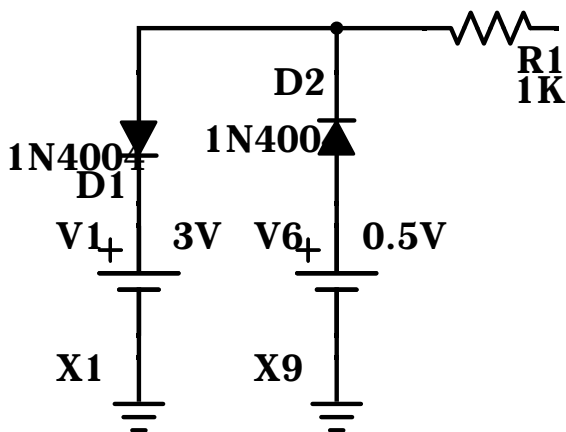


Рис. 6. Схема защиты от выхода за диапазон допустимых напряжений для одного пина микроконтроллера

Даже при условии наличия понижающей схемы из предыдущего параграфа, всегда остаются непредвиденные факторы, такие как выход из строя элементов схемы, скачки напряжения питания и т.д. Микроконтроллеры семейства ARM Cortex-M4F имеют диапазон рабочих напряжений от 0 до +3.3В. На плате Teensy 3.6 не предусмотрена защита пинов контроллера от выхода за диапазон допустимых входных напряжений, поэтому для уменьшения риска повреждения платы бы-

ло решено реализовать подобную защиту самостоятельно, следуя схемам из [4]. Схема защиты для одного пина представлена на рис. 6.

## Общая схема

Микроконтроллер управляет затвором лазера на основании данных энкодера и пользовательских условий, а также генерирует сигнал для сканера, также задаваемый пользователем посредством загрузки периода сигнала на SD карту. Общая схема устройства представлена на рис. 7.

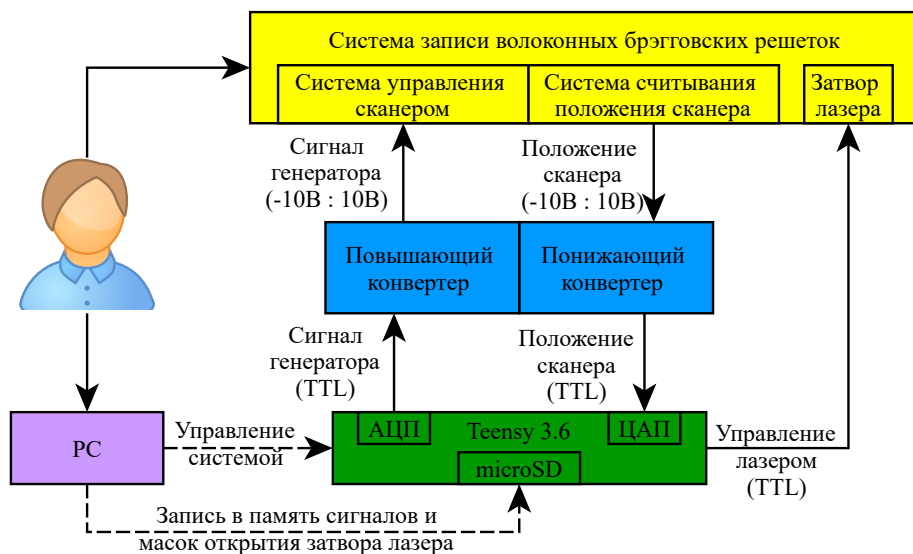


Рис. 7. Блок-схема системы контроля затвора лазера

## 3.2 Программная часть

### Алгоритм работы микроконтроллера

Алгоритм работы программы на микроконтроллере:

1. Обработать пользовательский ввод.
2. Обработать сигнал с энкодера.
3. Подать сигнал на затвор лазера.
4. Вычислить или считать с карты памяти сигнал для подачи на сканер.
5. Подать сигнал на сканер.
6. Перейти к пункту 1.

В виде блок-схемы алгоритм изображен на рис. 8 Программа микрокон-

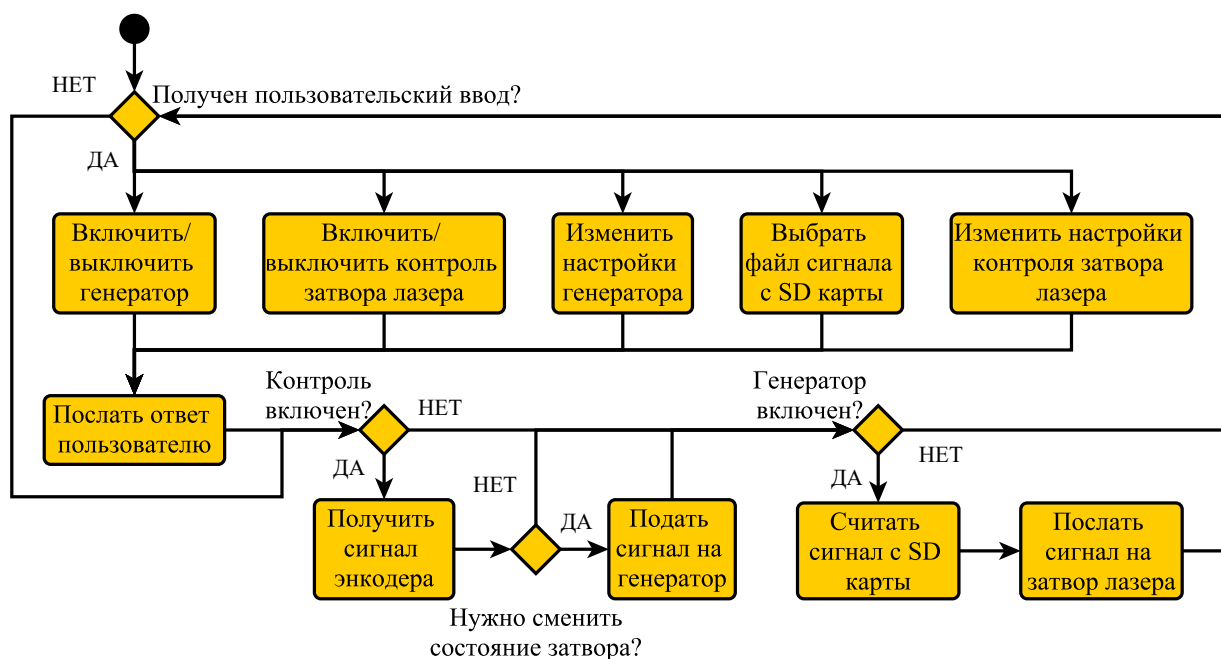


Рис. 8. Блок-схема системы контроля затвора лазера

троллера написана на языке C++ (avr-gcc). Ниже представлены основные особенности работы программы.

Для увеличения стабильности и уменьшения дребезга выходного сигнала при чтении с энкодера осуществляется программное усреднение по участку задаваемой пользователем длины с использованием кольцевого буфера и оптимизированного алгоритма вычисления среднего значения по кольцевому буферу.

Скорость системы ограничивается временем работы АЦП (около 100 микросекунд на одно значение). Для уменьшения задержек пользователь

может вручную выставить разрешение для АЦП в диапазоне 1-12 бит (по умолчанию 12 бит).

## Приложение для ПК

Управление генератором и сканером производится с помощью приложения для ПК (рис. 9). Приложение позволяет включать и отключать генератор и контроль затвора лазера, настраивать частоту и амплитуду сигнала генератора и способы контроля затвора, а так же выставлять значения для разрешения АЦП и размера буфера усреднения при чтении сигнала с энкодера. Консольный интерфейс предоставляет возможность загружать форму периода сигнала с SD карты с помощью специальных команд, а также выполнять все действия, доступные из графического пользовательского интерфейса.

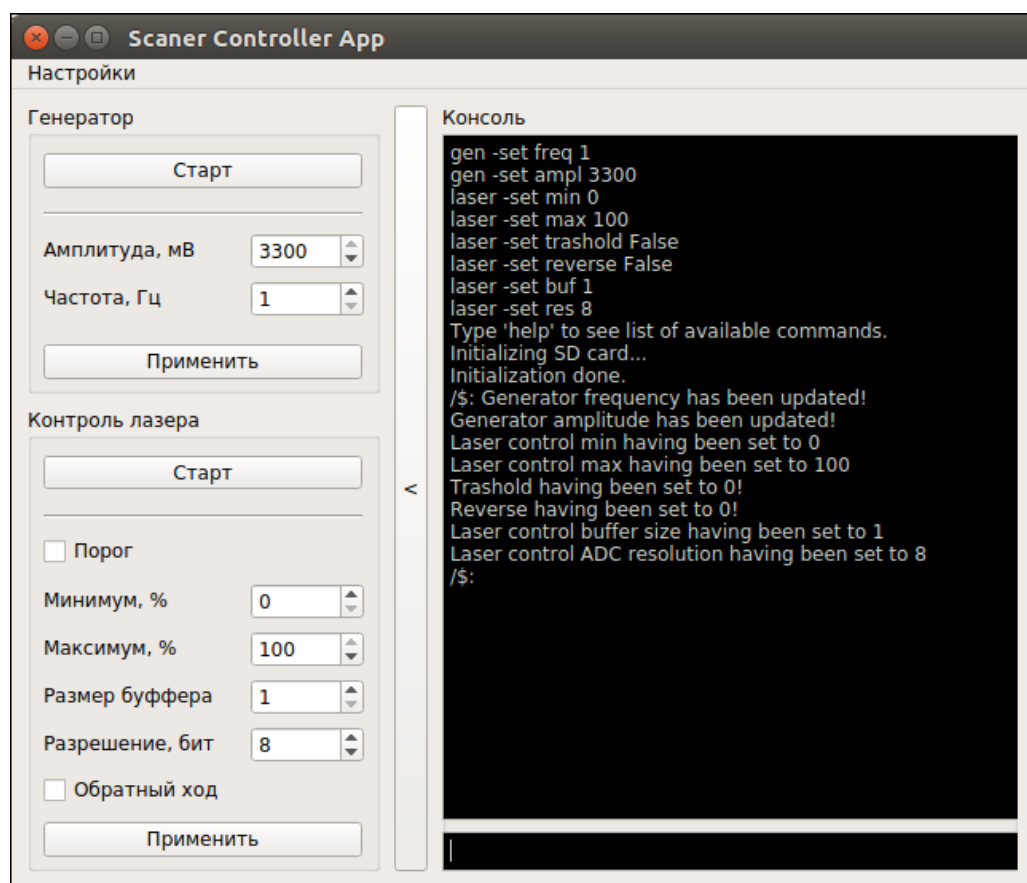


Рис. 9. Скриншот графического пользовательского интерфейса десктопного приложения

Логика приложения написанна на языке Python 3.5, графический пользовательский интерфейс использует библиотеку PyQt5. Это позволяет исполнять приложение на любых операционных системах.

## 4 Результаты

Сконструированная в ходе данной работы программно-аппаратная система решает поставленные перед ней задачи оптимизации записи ВБР. Фотографии полученных с применением системы контроля затвора лазера решеток, а так же их сравнение с решеткой, записанной без данной системы, приведены на рис. 10: на изображении 10a — без контроля затвора; 10b, 10c и 10d — различные режимы контроля затвора и соответствующие сигналы энкодера (синим) и лазера (красным).

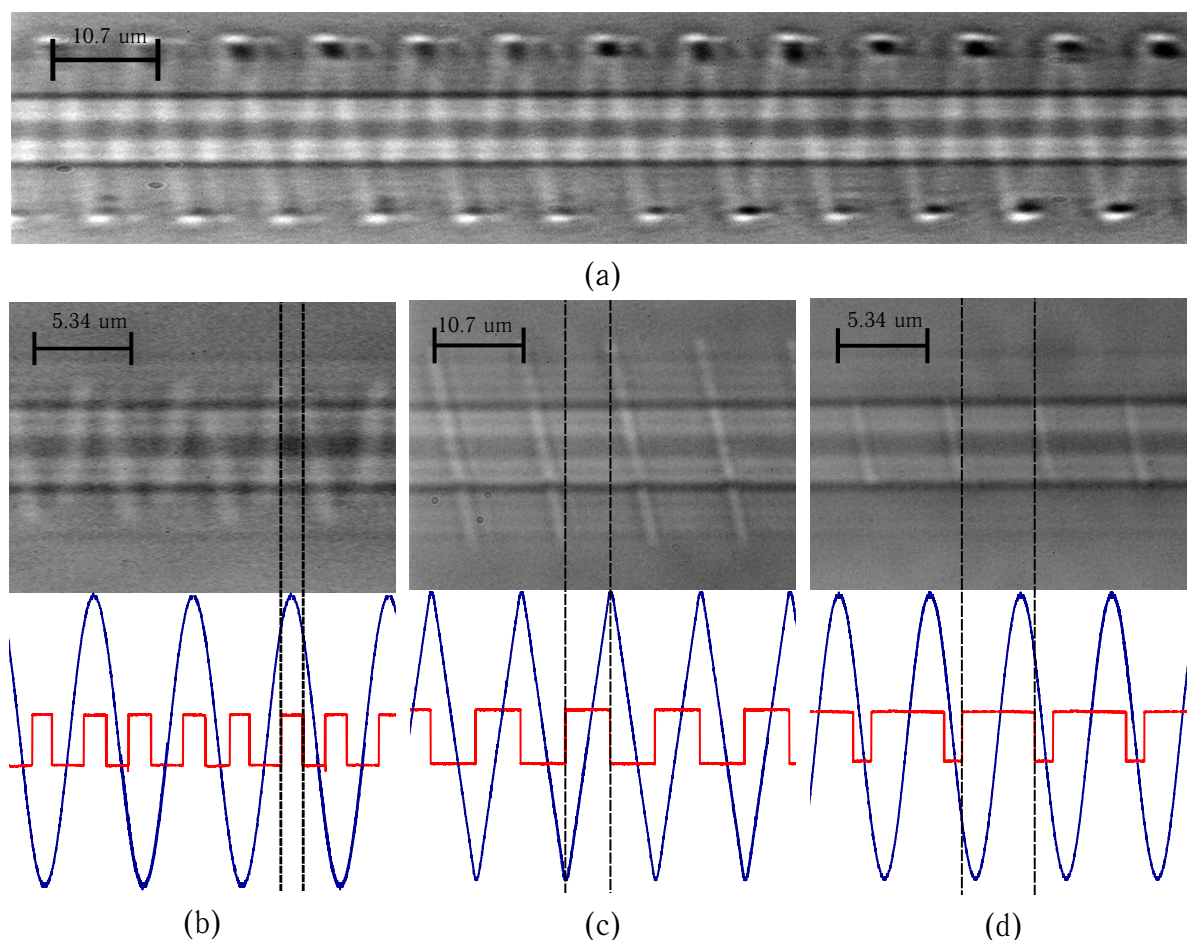


Рис. 10. Сравнение фотографий решеток, записанных с/без контроля затвора лазера. Частота сканирования 50 Гц, скорости записи: 267 мкм/с и 535 мкм/с для 5a, 5b и 5c, 5d соответственно.

Из рисунков видно, что получаемые при запущенной системе контроля ВБР имеют меньше дефектов записи (5b, 5b и 5b) и могут воспроизводить более сложные формы областей модификации (5c) показателя преломления, что является конечной целью данной работы.

## 5 Заключение

Разработанное устройство нуждается в пользовательском тестировании, после которого будет окончательно интегрировано в систему записи ВБР методом сканирования волокна. Этап тестирования включает в себя запись нескольких решеток с использованием всех функций устройства контроля затвора лазера для выявления и исправления ошибок в программной и аппаратной части.

С инженерной точки зрения полученное устройство требует небольших доработок: нереализованными остались такие задачи, как защита пинов контроллера от выхода за пределы допустимого напряжения, добавление внешнего контроля за состоянием затвора лазера, сборка прибора в корпус для повышения безопасности и удобства использования. Кроме того, подлежит реализации задача фильтрации низких частот входного сигнала с энкодера для уменьшения дребезга. Эта задача осложнена тем, что в спектре наиболее часто используемых для записи сигналов, таких как прямоугольный импульс и пила, имеются высокие частоты и фильтрация приведет к искажению сигнала и неточностям в записи.

С концептуальной точки зрения следующим шагом должна стать реализация алгоритма и аппаратной системы, позволяющих записывать структуры произвольной формы.

Механические свойства записываемых методом сканирования сердцевинны волокна с контролем затвора лазера ВБР подлежат изучению. Ожидается увеличение прочности в тестах на растяжение по сравнению с другими методами записи вследствие устранения пробоев материала волокна.

## 6 Список литературы

- [1] R. J. Williams, R. G. Krämer, S. Nolte, and M. J. Withford. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber bragg gratings using a continuous core-scanning technique. *Opt. Lett.*, 38(11):1918, 2013.
- [2] A. Martinez, Y. M. El Shazly, S. N. Kukureka, K. Sudgen, I. Y. Khrushchev, and I. Bennion. Mechanical reliability of fibre bragg gratings inscribed through the coating by a femtosecond laser. In *2006 European Conference on Optical Communications*, volume 1. IEEE, September 2006.
- [3] M. Bernier, F. Trépanier, J. Carrier, and R. Vallée. High mechanical strength fiber bragg gratings made with infrared femtosecond pulses and a phase mask. *Opt. Lett.*, 39(12):3646–3649, 2014.
- [4] Хилл У. Хоровиц П. *Искусство схемотехники, 2-е издание*. БИНОМ, Москва, 2010.