

Министерство науки высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
"Национальный исследовательский университет ИТМО"  
(Университет ИТМО)

УДК 621.3  
Рег. N НИОКТР  
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
д-р техн. наук, профессор

\_\_\_\_\_ В.О.Никифоров

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Анализ состояния исследований в области изучения взаимодействия резонаторов нового поколения с коммуникационными сетями. Обоснование направления исследований в части совершенствования подходов по регистрации параметров взаимодействия резонаторов с коммуникационными сетями

по теме:

Исследование взаимодействия резонаторов типа «Lifetune» с электромагнитными полями, создаваемыми коммуникационными сетями  
(промежуточный, Этап N 2)

Шифр: 225011

Руководитель темы  
профессор, д.т.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Г.Н.Лукьянов

Санкт-Петербург 2025

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы  
профессор,  
д.т.н. , ведущий научный  
сотрудник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Г.Н. Лукьянов  
(введение, разделы 1-3,  
заключение)

Исполнители:  
Профессор,  
д.т.н., ведущий научный  
сотрудник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Копыльцов  
(раздел 1)

Вед. инженер

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

С.Л. Макаров  
(раздел 2)

Лаборант

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

И.А. Прокофьев  
(разделы 2, 3)

к.т.н.,  
научный сотрудник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.А. Рассадина  
(введение,  
разделы 1-3, заключение)

к.т.н.,  
научный сотрудник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.Я. Афанасьев  
(Раздел 2)

Конструктор

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

С.А. Шорохов  
(Раздел 2)

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

В.В. Беззубик

## РЕФЕРАТ

Отчет 44 с., 28 рис., 1 табл., 9 ист.

### МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТОВ РЕЗОНАТОРА, ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ КОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ, МАКЕТ ПРИБОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АКТИВНОСТИ МОЗГА

Объектом исследования является резонатор «Lifetune». Цель работы - изучение взаимодействия резонаторов нового поколения с коммуникационными сетями, исследование взаимодействия резонаторов с электромагнитным излучением в беспроводных коммуникационных сетях. Для этого используется физико-математическая модель взаимодействия резонатора «Lifetune» с излучением, созданная авторами [1, 2] и развиваемая в данной работе. Для подтверждения правильности модели приводятся результаты периодического нагрева-охлаждения резонатора с измерением распределения температурного поля на его поверхности.

Также, на основе выполненных авторами ранее работ [3, 4], рассматриваются методы совершенствования подходов и их конкретная реализация для регистрации параметров взаимодействия резонаторов с коммуникационными сетями, на основе контроля действия этих сетей на живой организм. Областью применения и внедрения результатов НИР могут быть беспроводные сети.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                   | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                     | 6    |
| 1 Моделирование откликов резонаторов на внешнее воздействие.....                                                                                  | 7    |
| 1.1 Моделирование отклика одного резонатора .....                                                                                                 | 7    |
| 1.1.1 Модель.....                                                                                                                                 | 7    |
| 1.1.2 Модель отклика одного резонатора.....                                                                                                       | 9    |
| 1.2 Моделирование отклика от блока, скомпонованного из четырех резонаторов (тетрагональная схема).....                                            | 10   |
| 1.2.1 Результаты моделирования, при котором возбуждается один резонатор из четырех.....                                                           | 11   |
| 1.2.2 Результаты моделирования, при котором возбуждаются все резонаторы одновременно.....                                                         | 12   |
| 1.2.3 Выводы.....                                                                                                                                 | 13   |
| 1.3 Моделирование отклика от блока, скомпонованного из шести резонаторов (гексагональная схема).....                                              | 15   |
| 1.3.1 Результаты моделирования, при котором возбуждается один резонатор.....                                                                      | 15   |
| 1.3.2 Выводы для случая шести резонаторов.....                                                                                                    | 16   |
| 1.4 Моделирование блока из трех резонаторов («Lifetun Zone Max»)....                                                                              | 16   |
| 1.4.1 Первый цикл расчетов. Три резонатора находятся на общем основании без какого-либо рисунка или рельефа.....                                  | 17   |
| 1.4.2 Второй цикл расчетов. Три резонатора находятся на общем основании с металлической сеткой в виде самоподобного рисунка (т.н. «антенна»)..... | 18   |
| 1.4.3 Выводы для случая трех резонаторов.....                                                                                                     | 19   |
| 2 Исследование поведения резонатора при периодическом нагреве-охлаждении.....                                                                     | 20   |
| 2.1 Эксперимент.....                                                                                                                              | 21   |
| 3 Макет прибора для визуализации реакции на действие электромагнитного поля.....                                                                  | 29   |
| 3.1 Описание принципиальной схемы.....                                                                                                            | 29   |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Связь с компьютером и программа работы прибора.....                                              | 30 |
| 3.3 Конструкция макета.....                                                                          | 33 |
| 3.3.1 Общее назначение.....                                                                          | 33 |
| 3.3.2 Конструктивное исполнение.....                                                                 | 33 |
| 3.3.3 Материал и технология изготовления.....                                                        | 34 |
| 3.4 Результаты, полученные с помощью макета.....                                                     | 35 |
| 4 Макет устройства для визуализации значений распределения поля в<br>различных точках помещения..... | 37 |
| 3.1 Описание схемы базового элемента.....                                                            | 38 |
| 4.2 Связь с компьютером.....                                                                         | 39 |
| 4.2 Программирование схемы базового элемента.....                                                    | 39 |
| 4.4 Программирование устройства.....                                                                 | 40 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                                                                      | 41 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                | 44 |

## ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются резонаторы «Lifetune». Целью работы является исследование взаимодействия резонаторов с электромагнитным излучением сетей мобильной связи и Wi-Fi - роутеров. Основой для работы являются проведенные ранее авторами предварительные исследования [1-4] и устройства, предоставленные заказчиком.

В отчете приводятся физико-математическая и, созданная на ее основе, компьютерная модель для расчетов отклика резонатора на электромагнитное излучение. Рассмотрен макет устройства для измерения сигналов с поверхности головы человека для визуализации реакции человека на изменение электромагнитной обстановки. Разработанная компьютерная модель и макет устройства для измерения сигналов с поверхности головы человека будут использоваться и уточняться при выполнении следующих этапов работы.

Результаты работы по этапу являются базой для дальнейшего выполнения работ по НИР.

# 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКОВ РЕЗОНАТОРОВ НА ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

## 1.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ОДНОГО РЕЗОНАТОРА

### 1.1.1 МОДЕЛЬ

Применялась модель «взаимодействие резонаторов с электромагнитным излучением», описанная в [1-4], и использованная при работе в рамках 1-го этапа этого исследования (рис.1).

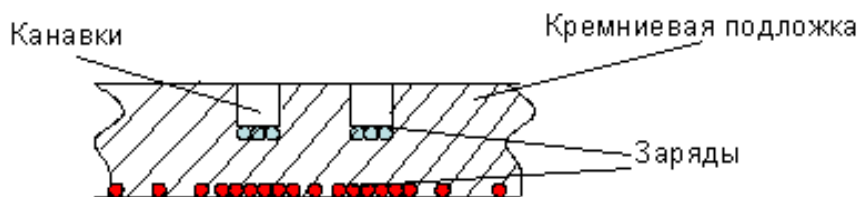


Рисунок 1 – Взаимодействие с полупроводником

В этой модели рассматривается механизм поляризации кремниевой пластины с рельефом из кольцевых канавок, расположение которых задается построением на основе аффинных преобразований, которые отображаются на себя.

Рассматривался отклик резонатора на воздействие электромагнитной волной. Исследовалось изменение распределения напряженности во времени по поверхности резонатора для различных граничных условий (нестационарный случай) для двумерной модели.

В соответствии с упомянутой выше моделью (рис. 1) электрическое поле при взаимодействии с полупроводником вызывает явление смещения зарядов и, вследствие того, что в области «канавок» пластина имеет меньшую толщину, концентрация носителей заряда в канавках будет выше, чем в соседних областях. Поэтому при моделировании принималось, что носители заряда сосредотачиваются в канавках (см. рисунок 1).

Если магнитных токов нет и среда изотропная, то уравнения Максвелла, связывающие магнитное поле (МП) и электрическое поле (ЭП) имеют вид:

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \times E = 0,$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} - \nabla \times H = -J,$$

$$B = \mu H,$$

$$D = \varepsilon E,$$

где

$E$  – напряженность ЭП,

$H$  – напряженность МП,

$D$  – индукция ЭП,

$B$  – индукция МП,

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемости среды,

$\mu$  – магнитная проницаемости среды,

$J$  – вектор электрического тока, образованного зарядами на мембране,

$\nabla$  – оператор.

В декартовой системе координат  $(x, y, z)$ :

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

$$\nabla \times F = \text{rot} F = i \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) + j \left( -\frac{\partial F_z}{\partial x} + \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) + k \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right),$$

где  $F$  – произвольная функция,  $i, j, k$  – единичные орты осей координат  $(x, y, z)$ .

Тогда

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y},$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z},$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x},$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial t} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} + \frac{\partial H_z}{\partial y} - J_x,$$

$$\frac{\partial D_y}{\partial t} = -\frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{\partial H_x}{\partial z} - J_y,$$

$$\frac{\partial D_z}{\partial t} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} + \frac{\partial H_y}{\partial x} - J_z.$$

Расчеты проводились для одного, трех, четырех и шести резонаторов.

### 1.1.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ОДНОГО РЕЗОНАТОРА

Листинги программ приводятся ниже. Расчеты выполнялись для резонатора «Lifetune», представленного на рисунке 2.

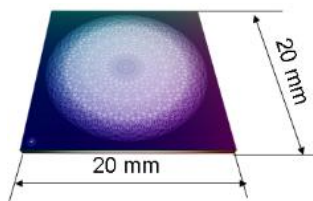


Рисунок 2 – Модель резонатора «Lifetune»

Структура резонатора представлена на рисунке 3.

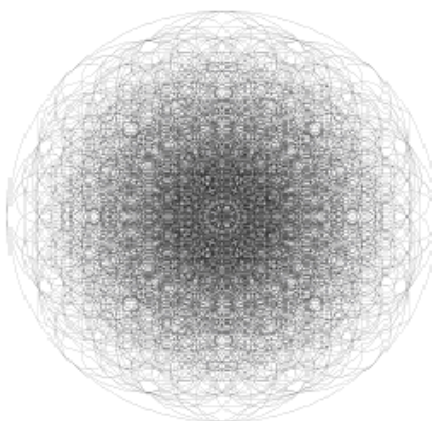


Рисунок 3 – Структура резонатора «Lifetune»

На рисунке 4 приведены результаты расчета распределения напряженности по поверхности резонатора. Приведены две проекции распределения напряженности электрического поля по поверхности резонатора

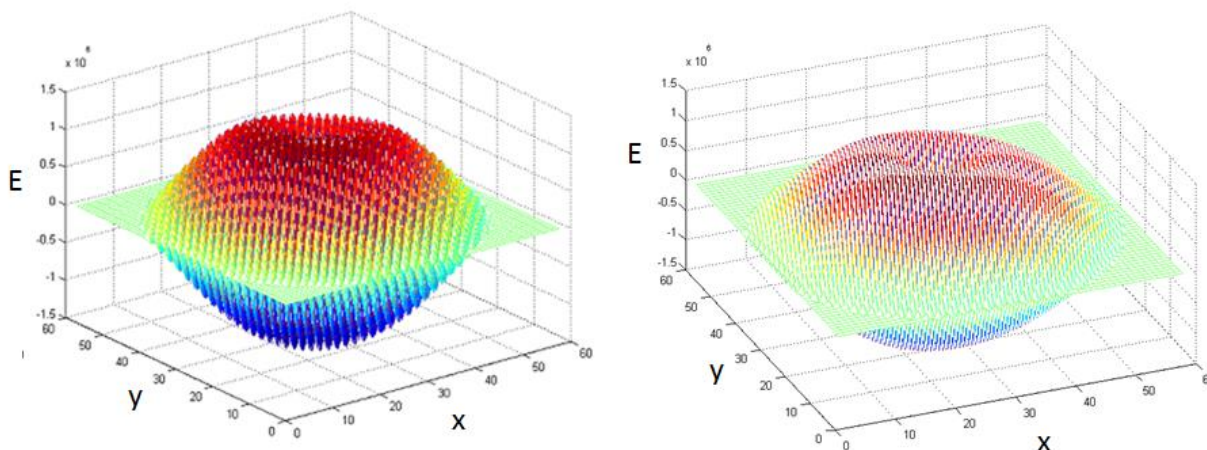


Рисунок 4 – Результат расчета распределения напряженности по поверхности резонатора

Полученный результат не отличается от полученных ранее, и опубликованных в [1-4], и в отчете по этапу 1.

С целью изучения поведения и взаимодействия нескольких резонаторов, объединенных в единый комплекс, было проведено моделирование устройств, состоящих из четырех, шести и трех резонаторов «Lifetune». При этом проверялась гипотеза о возможности взаимодействия резонаторов между собой.

## 1.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ОТ БЛОКА, СКОМПОНОВАННОГО ИЗ ЧЕТЫРЕХ РЕЗОНАТОРОВ (ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СХЕМА)

Рассмотрено поведение блока из четырех резонаторов, расположенных вплотную друг к другу, как показано на рисунке 5.

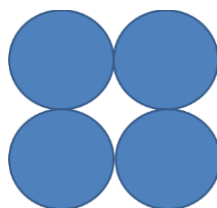


Рисунок 5 – Схема блока из 4-х резонаторов

### 1.2.1 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРИ КОТОРОМ ВОЗБУЖДАЕТСЯ ОДИН РЕЗОНАТОР ИЗ ЧЕТЫРЕХ

Далее представлены результаты моделирования, при котором возбуждается один резонатор. На рисунках 6, 7 представлено развитие возбуждения со временем (условное время, циклы расчета, от 120 до 360).

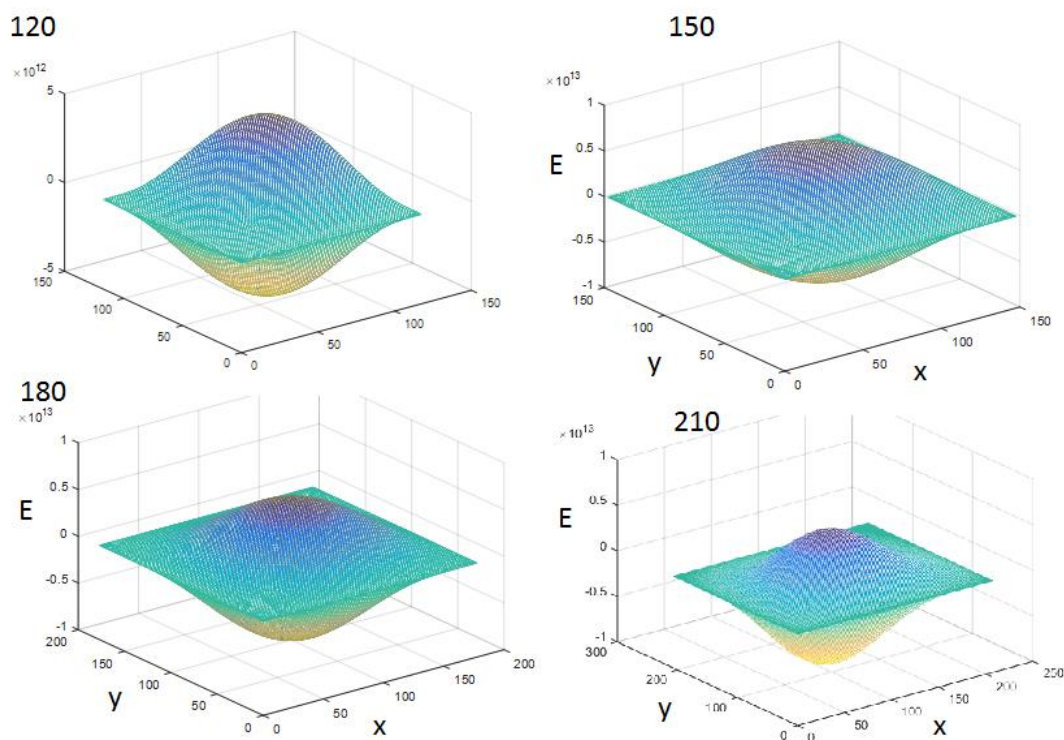


Рисунок 6 – Результаты моделирования, при котором возбуждается один резонатор. На рисунках представлено развитие возбуждения со временем, с передачей от резонатора к резонатору (условное время, циклы расчета, от 120 до 210)

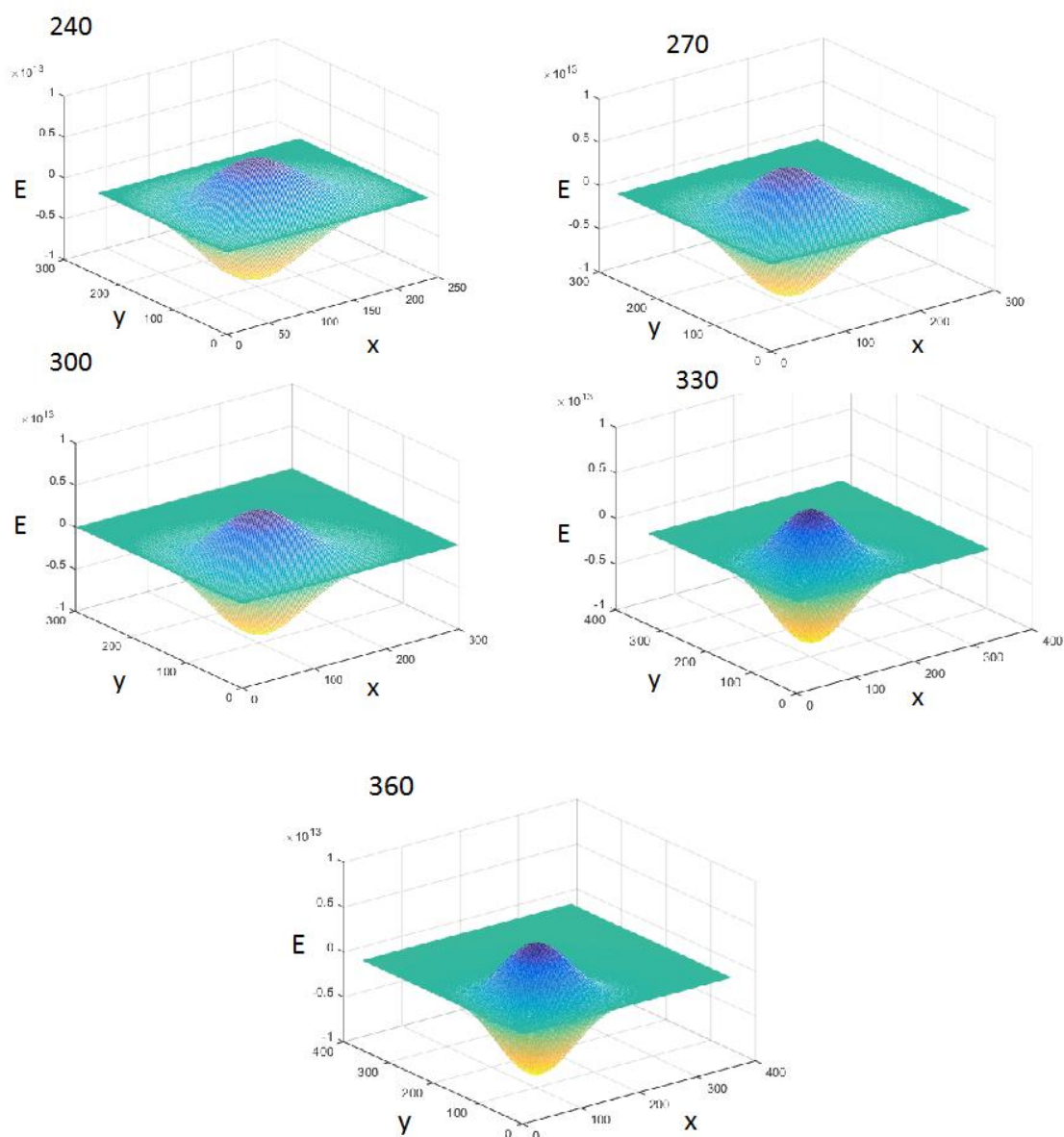


Рисунок 7 – Развитие возбуждения со временем (условное время, циклы расчета, от 240 до 360)

## 1.2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРИ КОТОРОМ ВОЗБУЖДАЮТСЯ ВСЕ РЕЗОНАТОРЫ ОДНОВРЕМЕННО

Далее представлены результаты моделирования, при котором возбуждаются все резонаторы одновременно, возбуждение приходит на все резонаторы одновременно. На рисунке 8 представлен результат расчета, установившейся режим.

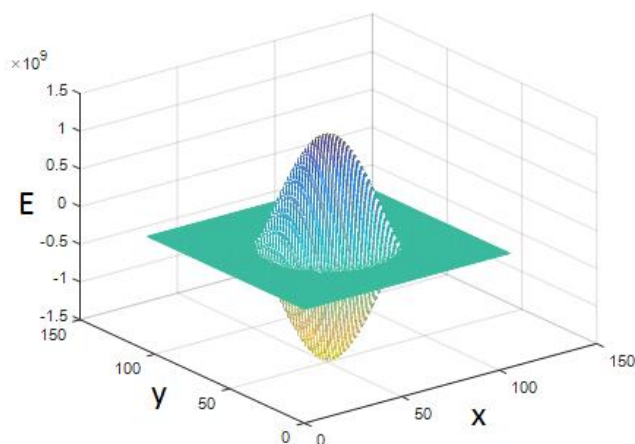


Рисунок 8 – Результат моделирования, при котором возбуждаются все резонаторы одновременно, установившийся режим

### 1.2.3 ВЫВОДЫ

По сравнению с моделью одного резонатора, амплитуда отклика резко возросла. Для одного резонатора она составляла  $\sim 10^6$ , (рисунок 4), для четырех составляет  $\sim 10^{13}$ , для случая возбуждения одного резонатора, и  $\sim 10^9$  – для случая одновременного возбуждения четырех резонаторов (значения амплитуды приводятся в относительных, безразмерных единицах).

Разницу в амплитуде для двух рассмотренных случаев для четырех резонаторов можно объяснить тем, что, когда возбуждается один резонатор, возникающий на нем отклик последовательно вовлекает в процесс возбуждения один за другим, три оставшихся резонатора. При этом каждому для включения в этот процесс требуется время. Это время определяется скоростью, с которой возникают носители заряда.

При одновременном возбуждении резонаторы одновременно вовлекаются в процесс поляризации. При этом, из-за инерционных свойств (требуется время для отклика) они не успевают за изменениями поля.

При возбуждении одного резонатора возбуждение передается на соседний резонатор тогда, когда уровень напряженности на первом достигнет величины, при которой на втором концентрация носителей заряда достигнет величины, при которой начнутся разряды между канавками. Затем возбуждение передастся на третий и т.д. Происходит автоподстройка, резонаторы находятся в резонансе друг с другом. В случае с возбуждением четырех резонаторов такой резонанс между ними

не наблюдается и максимальное значение напряженности поля существенно ниже (рисунок 8), чем в случае возбуждения одного резонатора.

### 1.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ОТ БЛОКА, СКОМПОНОВАННОГО ИЗ ШЕСТИ РЕЗОНАТОРОВ (ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ СХЕМА)

Резонаторы располагаются по схеме рисунка 9. Проводились расчеты их отклика на их возбуждение.

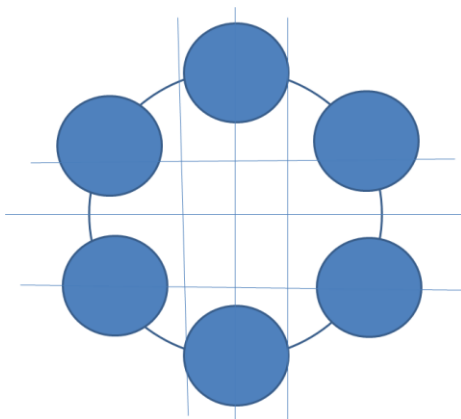


Рисунок 9 – Расположение шести резонаторов

#### 1.3.1 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРИ КОТОРОМ ВОЗБУЖДАЕТСЯ ОДИН РЕЗОНАТОР

Далее представлены результаты моделирования, при котором возбуждается один резонатор из шести. Механизм возбуждения такой же, как было описано выше для случая четырех резонаторов. На рисунке 10 представлен результат возбуждения со временем после 260 циклов условного времени.

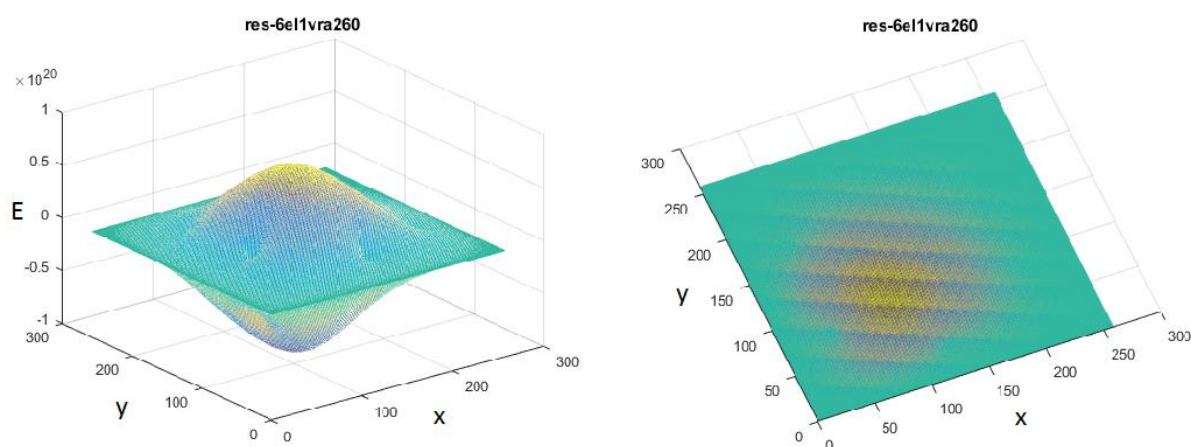


Рисунок 10 – Результат моделирования отклика схемы из шести резонаторов (после 260 циклов условного времени). Приведены две разные проекции отклика

### 1.3.2 ВЫВОДЫ, ДЛЯ СЛУЧАЯ ШЕСТИ РЕЗОНАТОРОВ

По сравнению с моделью одного резонатора, или четырех резонаторов, амплитуда отклика возросла далее. Для одного резонатора она составляла  $\sim 10^6$ , (рисунок 4), для четырех составляла  $\sim 10^{13}$  (рисунки 6, 7), для случая возбуждения одного резонатора из четырех и для шести она уже составляет  $\sim 10^{20}$  (рисунок 10).

### 1.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ИЗ ТРЕХ РЕЗОНАТОРОВ («LIFETUN ZONE MAX»)

Три резонатора скомпонованы таким образом, что они находятся на одной линии, при этом средний – в центре и направлен поверхностью с рельефом в сторону противоположную по отношению к резонаторам, расположенным по краям (рисунок 11).

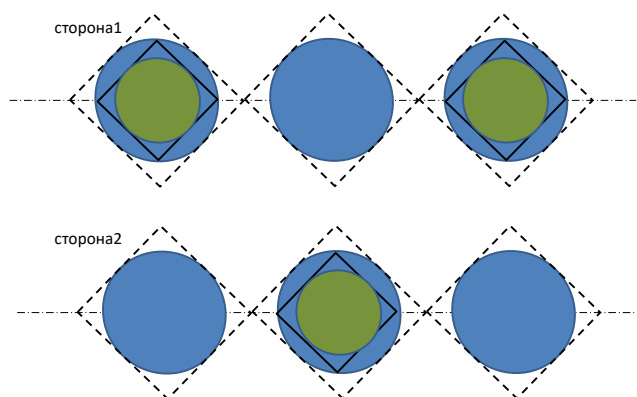


Рисунок 11 – Компоновка блока из трех резонаторов

Для этого устройства проведены два цикла расчетов: при первом три резонатора находятся на общем основании, без какого либо рисунка или рельефа. На втором цикле расчетов моделировалось собственно устройство «Lifetun Zone Max», где резонаторы находятся на общем основании с металлической сеткой в виде самоподобного рисунка (т.н. «антенна»).

#### 1.4.1 ПЕРВЫЙ ЦИКЛ РАСЧЕТОВ. ТРИ РЕЗОНАТОРА НАХОДЯТСЯ НА ОБЩЕМ ОСНОВАНИИ БЕЗ КАКОГО-ЛИБО РИСУНКА ИЛИ РЕЛЬЕФА

Результат моделирования отклика схемы из трех резонаторов для этого случая приведен на рисунке 12. Здесь приведены две разные проекции отклика. Изображение искажено (видны эллипсы вместо окружностей) из-за того, что объект вытянут в длину (см. рисунок 11).

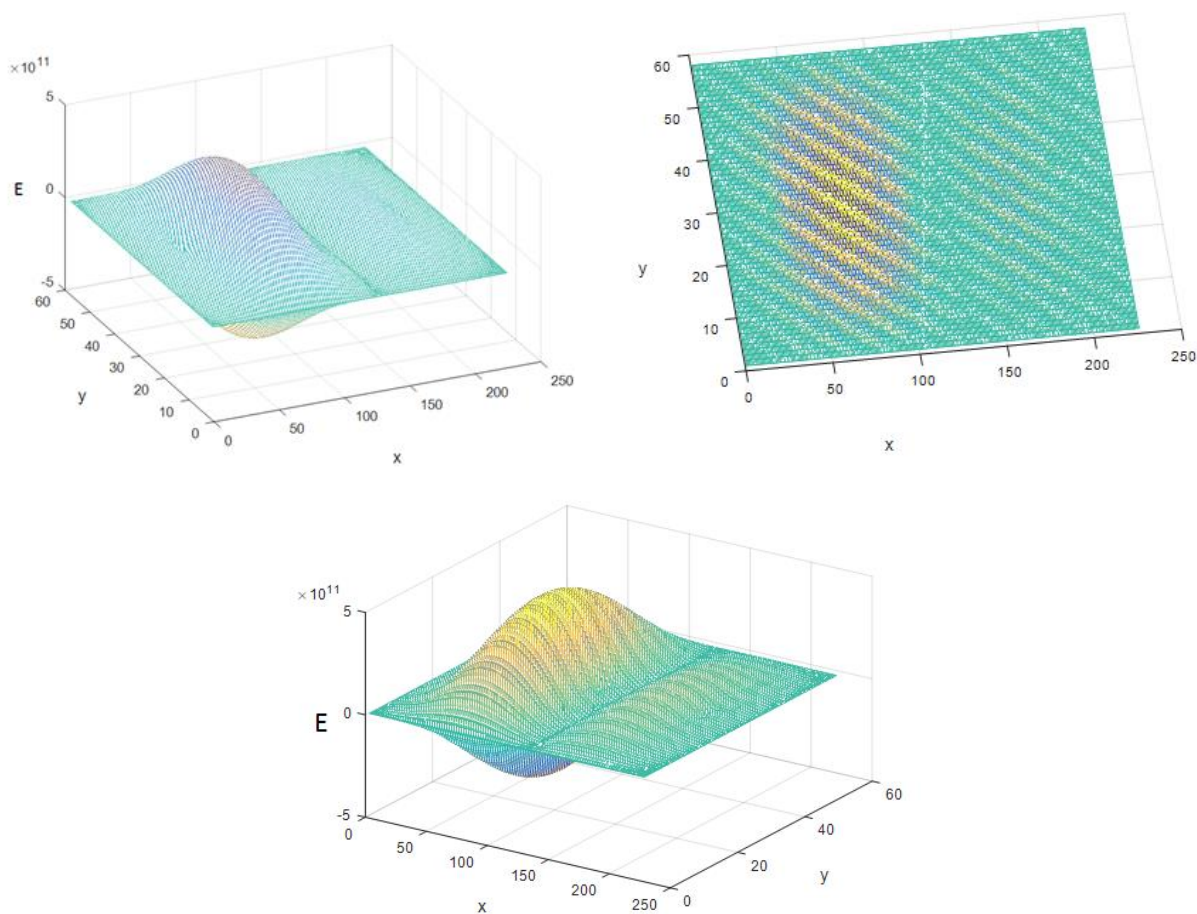


Рисунок 12 – Результат моделирования отклика схемы из трех резонаторов (после циклов условного времени)

1.4.2 ВТОРОЙ ЦИКЛ РАСЧЕТОВ. ТРИ РЕЗОНАТОРА НАХОДЯТСЯ НА ОБЩЕМ ОСНОВАНИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКОЙ В ВИДЕ САМОПОДОБНОГО РИСУНКА (Т.Н. «АНТЕННА»)

Результат моделирования отклика схемы из трех резонаторов (после циклов условного времени) представлен на рисунке 13. Приведены три проекции отклика. Изображение искажено (видны эллипсы вместо окружностей) из-за того, что объект вытянут в длину (см. рисунок 11)

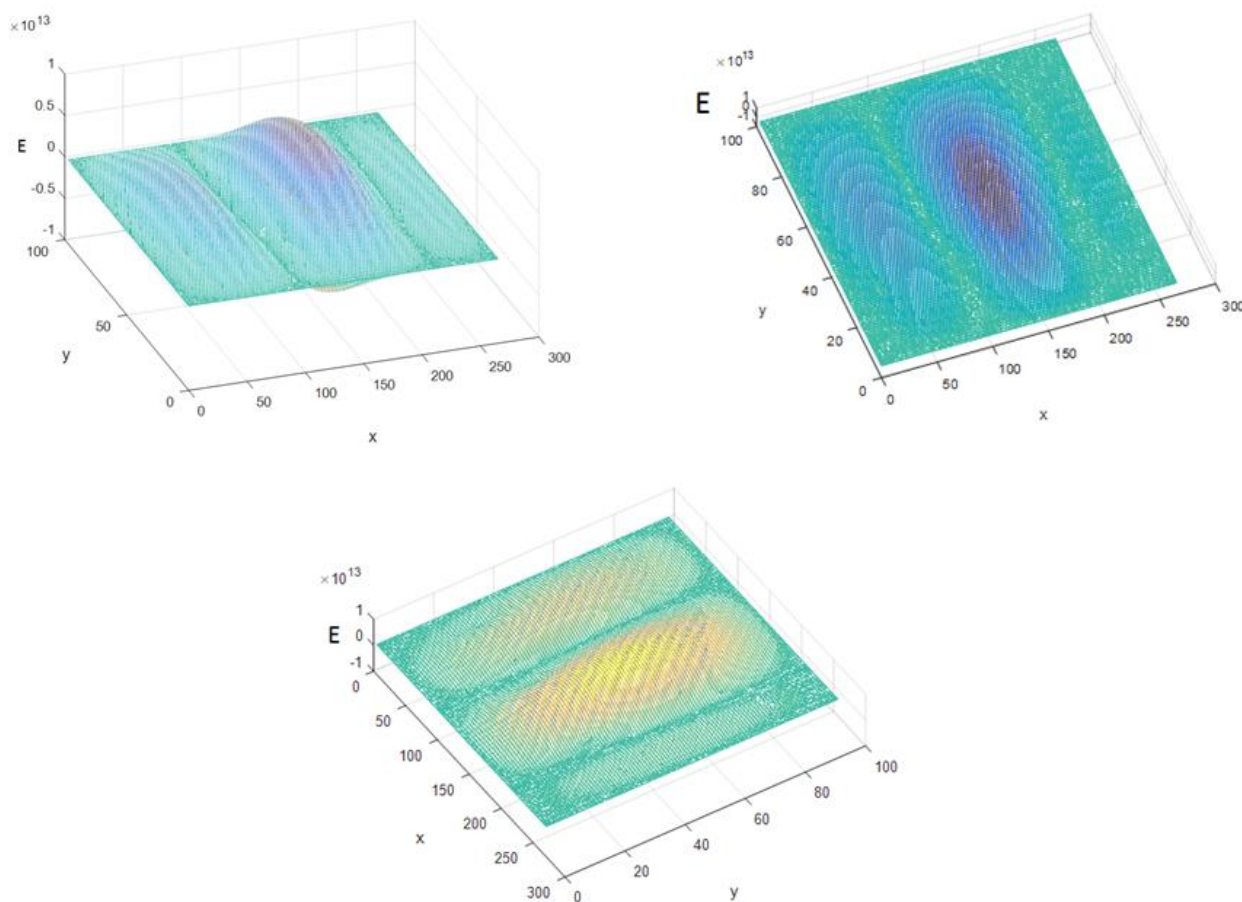


Рисунок 13 – Результат моделирования отклика схемы из трех резонаторов (после циклов условного времени)

#### 1.4.3 ВЫВОДЫ ДЛЯ СЛУЧАЯ ТРЕХ РЕЗОНАТОРОВ

Видна разница между изображениями на рисунке 12 и рисунке 13. Амплитуда на рисунке 13 больше, чем на рисунке 12. Распределение стало более равномерным, более сглаженным. Наличие «антенны» приводит к дополнительному усилению отклика. Этот эффект требует дополнительного исследования, в том числе для систем из четырех и шести резонаторов.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗОНАТОРА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ-ОХЛАЖДЕНИИ

Численные эксперименты показали необычное поведение кремниевой пластины с самоаффинным рельефом на поверхности, выполненным из кольцевых канавок при воздействии на нее электромагнитным излучением. Были выполнены эксперименты с нагревом и охлаждением с помощью батареи Пельтье, которые также подтвердили гипотезу, положенную в основу численной модели.

На рисунке 14 [5] представлена зависимость коэффициента поглощения кремния в зависимости от длины волны. Видно, что кремний поглощает электромагнитное излучение в диапазоне от 200 нм до 1400 нм. Близкие значения получаются из значения ширины запрещенной зоны для кремния. Ширина запрещенной зоны для кремния  $E_g=1,12$  эВ. Это соответствует поглощению на длинах волн  $\lambda < 1,11$  мкм, что далеко от спектрального диапазона, в котором «видит» тепловизор Testo 890, который был использован в этом эксперименте.

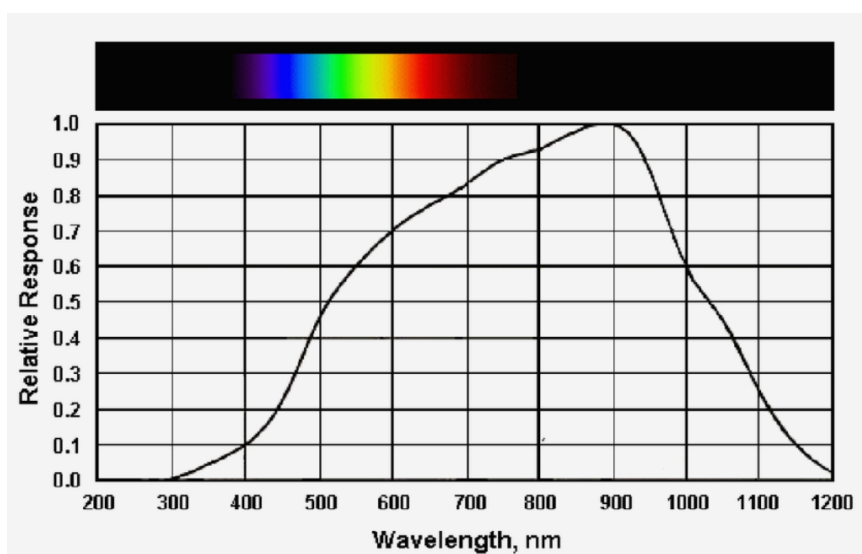


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента поглощения кремния от длины волны [5]

## 2.1 ЭКСПЕРИМЕНТ

В эксперименте резонатор периодически нагревался и охлаждался с помощью батареи Пельтье. Экспериментальная установка показана на фотографиях рисунке 15.

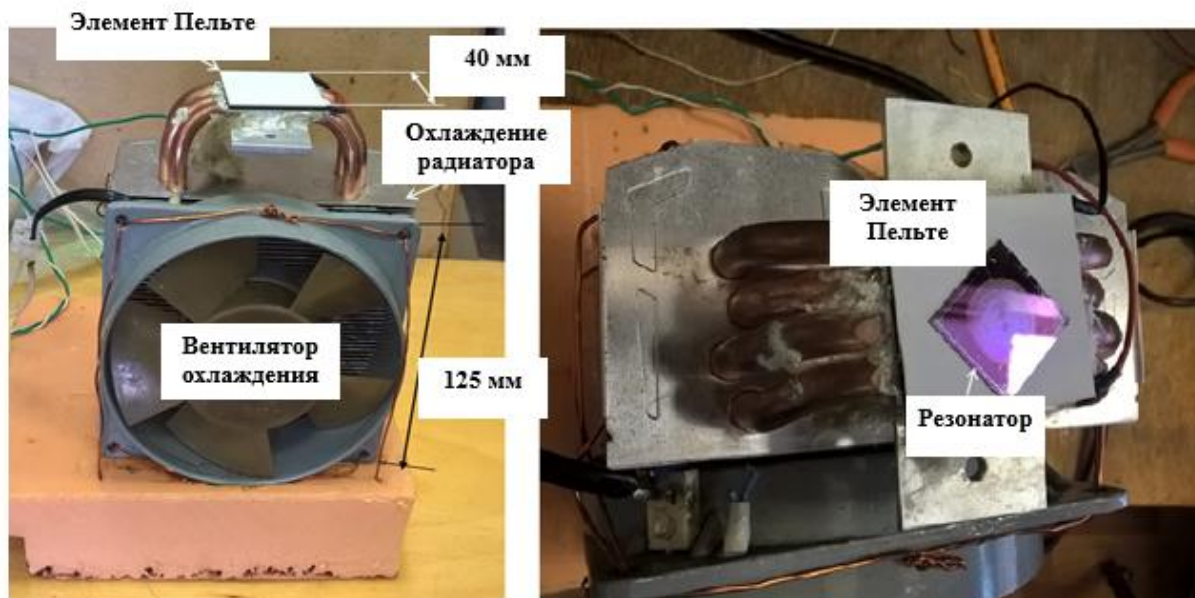


Рисунок 15 – Экспериментальная установка

Нагрев и охлаждение элемента Пельтье осуществлялись путём переключения направления тока через него. Схема переключения полярности тока показана на рисунке 16. При одной полярности тока резонатор охлаждался, при другой – нагревался.

Распределение температуры измерялось с помощью тепловизора Testo 890. Примеры термограмм, полученных таким образом, показаны на рисунке 17.

При нагревании и охлаждении элемент Пельтье нагревает и охлаждает резонатор, расположенный на его поверхности (рисунок 6). Нагрев резонатора происходит с задержкой относительно элемента Пельтье. Одновременно тепловизор Testo 890 регистрирует колебания температурного поля резонатора.

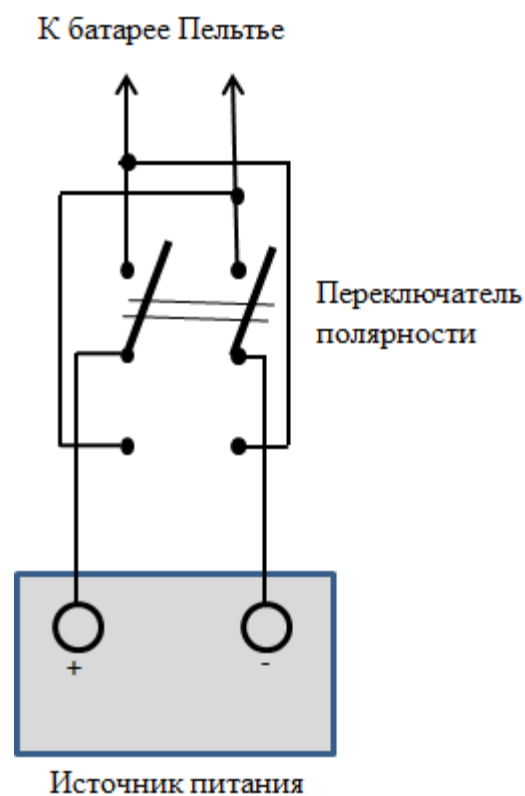


Рисунок 16 – Схема переключения полярности тока

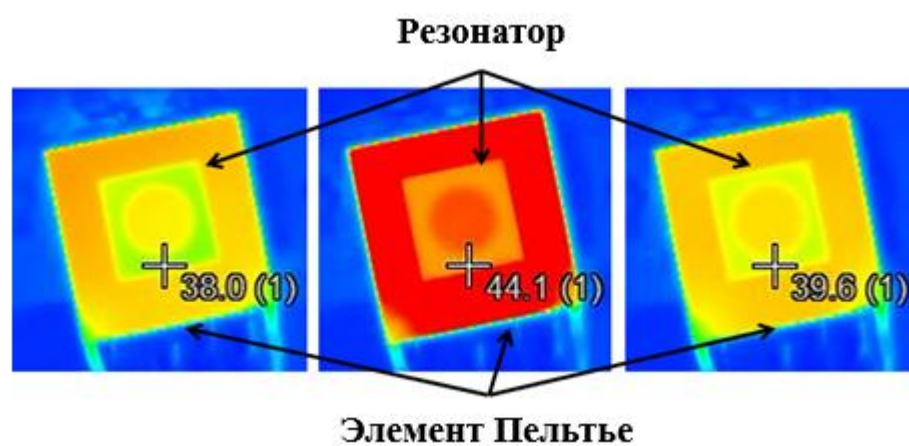


Рисунок 17 – Примеры термограмм

Это объясняется тем, что между теплом, поступающим в пластину от элемента Пельтье, и теплом, отдаваемым поверхностью пластины в окружающую среду, существует динамическое равновесие. Это динамическое равновесие характеризуется показателем тепловой инерции  $\tau$ , который определяется как:

$$\tau = C / \alpha S, \text{ с,}$$

где  $C$  – полная теплоёмкость резонатора;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности резонатора в окружающую среду;  $S$  – площадь поверхности резонатора.

Излучение нагретого тела описывается законом Планка.

$$E = c_1 \lambda^{-5} \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1},$$

где  $E$  – энергия излучения,  $\lambda$  – длина волны,  $T$  – температура,  $c_1$  – первая постоянная излучения,  $c_1 = h \cdot c_0^2$ ,  $c_0$  – скорость света в вакууме,  $h$  – постоянная Планка,  $c_2$  – вторая постоянная излучения,  $c_2 = \frac{h \cdot c_0}{k}$ ,  $k$  – постоянная Больцмана.

Закон излучения Планка применим к так называемому чёрному телу. Фундаментальные свойства чёрного тела заключаются в том, что, во-первых, оно поглощает всё падающее излучение, а во-вторых, всегда испускает больше энергии, чем любое другое тело при той же температуре. Моделью чёрного тела является полость с отверстием, или углублением на поверхности, или канавкой. Когда, например, луч света попадает в отверстие в полости, он многократно отражается и поглощается стенками полости, и вероятность того, что он покинет полость через отверстие, крайне мала (см. рисунок 18).

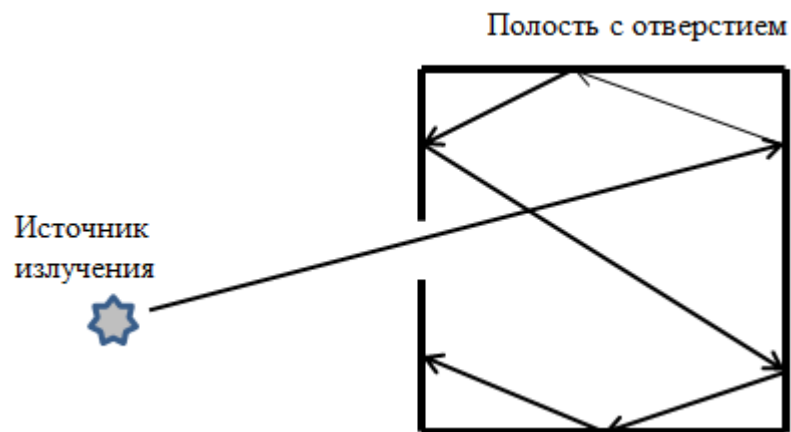


Рисунок 18 – Полость с отверстием как модель абсолютно черного тела

На практике энергия этого луча практически полностью поглощается полостью. Углубления и канавки поглощают свет почти так же хорошо. Однако, эти модели не обладают в полной мере свойствами абсолютно черного тела, поглощая энергию так же, как абсолютно черное тело.

Разница между реальным и абсолютно черным телом характеризуется так называемым коэффициентом поглощения,  $\varepsilon = E_r/E$ , где  $E$  – энергия излучения абсолютно черного тела,  $E_r$  – энергия излучения абсолютно черного тела при той же температуре, что и абсолютно черное тело. Полости обычно используются в качестве моделей абсолютно черного тела [6, 7].

С помощью тепловизора Testo 890 измерялось температурное поле поверхности резонатора при нагреве и охлаждении. Нагрев и охлаждение контролировались с помощью элемента Пельтье. Полученные результаты, а именно изменение температуры центральной части резонатора (с рельефом), температуры его периферийной части, и температуры элемента Пельтье с течением времени, представлены на графике рисунке 19. Различие в полученных значениях температуры обусловлено разными значениями коэффициентов поглощения этих частей. В действительности они находятся при одинаковой температуре.

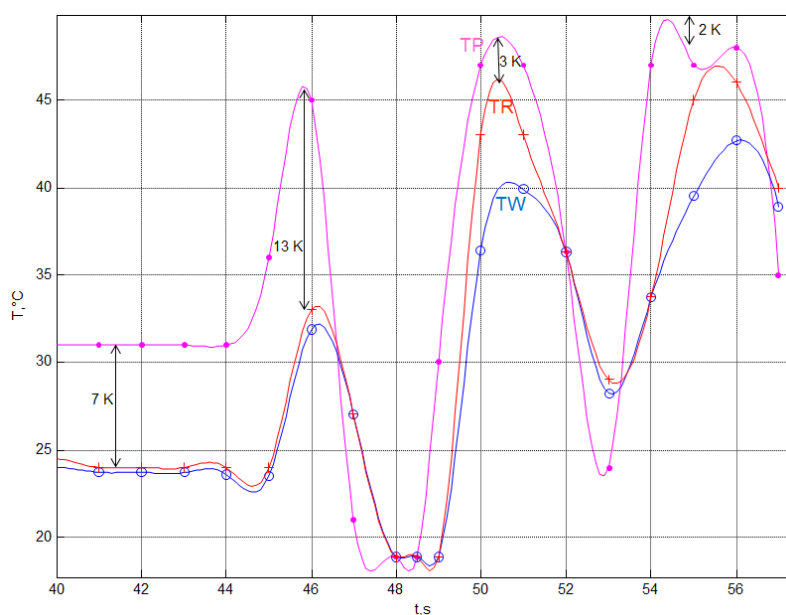


Рисунок 19 – Измеренные температуры: 1. Элементы Пельтье, пурпурная кривая, пурпурные символы «•», TP; 2. Центральная часть резонатора с рельефом, красная кривая, красные символы «+», TR; 3. Его периферийные части, без рельефа, полированный кремний, синяя кривая, синие символы «°», TW

При быстром изменении температуры батареи Пельтье, задающем повышение или понижение температуры резонатора, измеренная температура центральной части (TR) с рельефом выше температуры периферии пластины (TW) без рельефа. Однако их фактические температуры должны быть одинаковыми, поскольку это части одного объекта. Это означает, что коэффициент поглощения

на рифленном участке поверхности резонатора существенно выше, чем на гладком. Этот коэффициент не является постоянным и зависит от скорости нагрева из-за тепловой инерции. Его минимальное значение может достигать того же значения, что и коэффициент поглощения  $\varepsilon$  полированного кремния, максимальное – значения коэффициента поглощения  $\varepsilon$  поверхности элемента Пельтье ( $\varepsilon \approx 0,8$ ). Следует также отметить, что ширина канавки на поверхности резонатора (0,2 мкм) несравнимо мала по сравнению с используемым в Testo 890 спектральным диапазоном чувствительности (8 мкм ... 14 мкм), и такая канавка шириной 0,2 мкм не может обеспечить поглощение в диапазоне чувствительности прибора. Коэффициент излучения  $\varepsilon$  для алюминиевого излучателя Пельтье составляет  $\varepsilon \approx 0,8$ . Исходя из закона Стефана-Больцмана, коэффициент излучения для центральной части резонатора (с рельефом) можно определить как:

$$\varepsilon_{Pelt} \sigma T_{Pelt}^4 = \varepsilon_{Center} \sigma T_{Center}^4, \quad (1)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана.

$$\varepsilon_{Center} = \frac{T_{Center}^4}{T_{Pelt}^4}, \quad (2)$$

Коэффициент черноты центральной области резонатора, определяемый по формуле (2), представлен на графике рисунка 20 внизу. Для сравнения график изменения температуры рисунке 19 повторён на верхнем графике рисунка 20.

Из графиков видно, что резкое снижение излучательной способности происходит в моменты резкого изменения направления изменения температуры. Это можно объяснить тем, что должно происходить также быстрое изменение концентрации носителей заряда в области «канавки». Концентрация носителей заряда в центральной части резонатора при резких изменениях температуры выше, чем в его периферийных областях, поэтому за счёт дополнительного поглощения носителями заряда коэффициент излучательной способности излучения здесь увеличивается. Известно, что полупроводники имеют очень сильную, экспоненциальную зависимость концентрации носителей заряда от температуры. Поэтому близость кажущейся температуры центральной части резонатора к температуре элемента Пельтье объясняется резким увеличением концентрации электронов, их концентрацией вблизи канавок и дополнительным поглощением света этими электронами. Это также объясняет увеличение излучательной

способности излучения центральной части с ростом температуры. Правда, увеличение излучательной способности излучения происходит с некоторой задержкой (примерно 0,5...1 секунды), но эта задержка объясняется обычной тепловой инерцией. При нагревании резонатора, во-первых, повышается температура, что приводит к увеличению концентрации носителей заряда (электронов). Известно, что концентрация электронов в полупроводнике сильно зависит от температуры. Повышение температуры обеспечивает энергию для разрыва ковалентных связей в кремнии и освобождения электронов. С ростом температуры увеличивается концентрация свободных электронов (температура) [8]. Во-вторых, при нагревании возникает разность температур между нижней плоскостью резонатора, контактирующей с источником тепла (элементом Пельтье), и его верхней плоскостью. Это, согласно закону теплопроводности Фурье, вызывает поток тепла через резонатор, направленный от нижней плоскости к верхней.

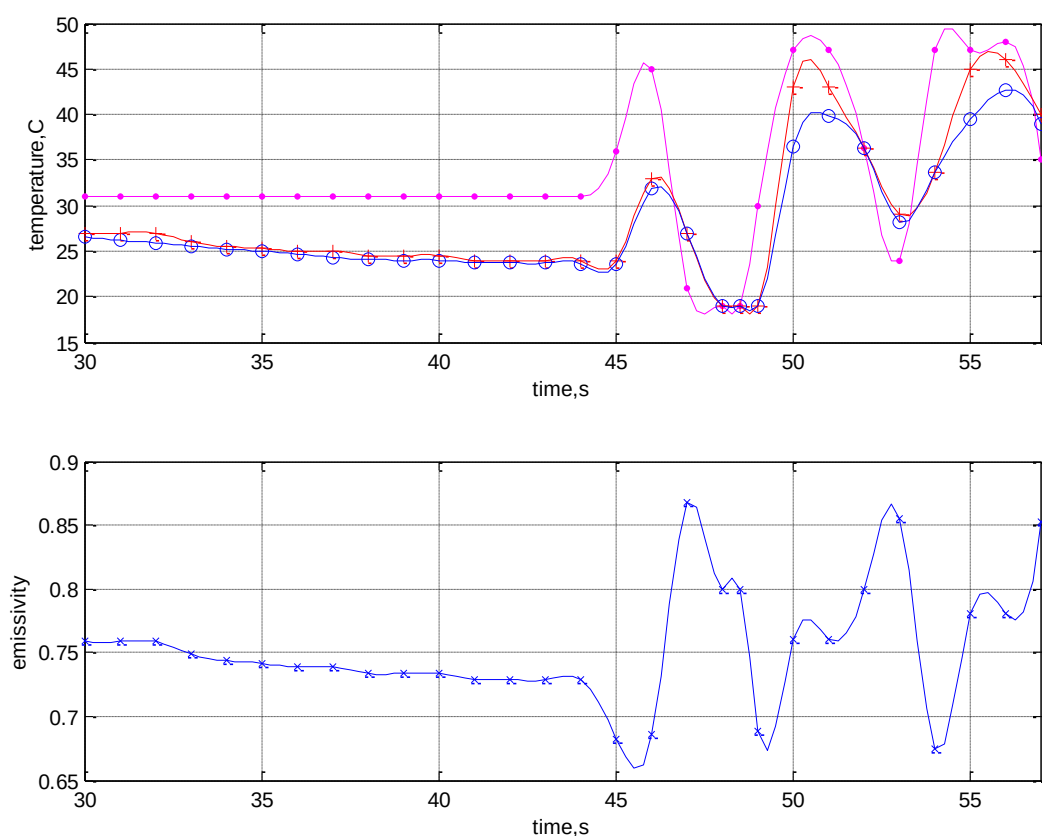


Рисунок 20 – Измеренные температуры (верхнее окно) и коэффициент излучения центральной области (нижнее окно)

Предполагая, что тепловой поток одномерен и направлен по нормали от нагретой нижней поверхности к верхней, его можно описать с помощью закона Фурье, в виде выражения:

$$q = \lambda(dT/dx)S, \quad (3)$$

где  $q$ , Вт/м<sup>2</sup> – тепловой поток через единицу поверхности,  $\lambda = 149$  Вт/м·К – теплопроводность материала (кремния),  $T$  – температура,  $x$  – координата по нормали к поверхности,  $S$  – площадь поверхности резонатора, м<sup>2</sup>. Выражение (3) можно переписать в упрощенном виде:

$$q = \lambda(\Delta T/\Delta x)S, \quad (4)$$

Тогда, при температуре внешней поверхности резонатора  $t_{\text{out}} = 20^\circ\text{C}$  и температуре внутренней поверхности  $t_{\text{in}} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = t_{\text{in}} - t_{\text{out}} = 20\text{K}$ .

Расчёты по формуле (4) дают плотность теплового потока  $q \approx 1184$  Вт/м<sup>2</sup>. Тогда тепловой поток через резонатор,  $Q = q \cdot S$ , составит  $Q = 1184 \cdot 4 \cdot 10 \approx 0,4736$  Вт. Этот тепловой поток затем рассеивается в окружающую среду двумя способами: естественной конвекцией и тепловым излучением.

Закон конвекции:

$$Q = \alpha(t_{\text{out}} - t_a)S, \quad (5)$$

где  $Q$  – количество тепла, передаваемое за единицу времени, Вт,  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К, – коэффициент теплопередачи,  $t_a$  – температура окружающей среды. Если температура окружающей среды  $t_a = 20^\circ\text{C}$ , то разность температур  $t_{\text{out}} - t_a = 20\text{K}$ . Закон излучения Стефана–Больцмана:  $Q = \varepsilon \sigma T^4$ , Вт, где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана,  $T$  – температура. Если коэффициент излучения  $\varepsilon = 0,8$ ,  $T = 313\text{K}$  и  $S = 4 \cdot 10^{-4}\text{м}^2$ , то мощность излучения с поверхности резонатора имеет величину  $Q = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 313^4 \approx 0,174$  Вт.

Под действием разности температур и теплового потока электроны диффундируют с нижней поверхности резонатора, нагреваемой элементом Пельтье, на его верхнюю поверхность. Это направленное движение электронов есть не что иное, как электрический ток. Возбуждённые электроны испускают фотон, находят вакансию, и на месте образовавшейся дырки образуется нейтральный атом. Этот процесс продолжается до тех пор, пока сохраняется разность температур. Эти соображения проиллюстрированы на рисунке 21.



Рисунок 21 – Движение зарядов (электронов) под действием разности температур

$$\Delta T = t_{in} - t_{out} \text{ между нижней и верхней поверхностями резонатора}$$

Таким образом, при нагревании концентрация электронов увеличивается (Киттель, 1996), в том числе за счёт электрического тока, генерируемого на поверхности резонатора. Наиболее благоприятное положение для приповерхностных электронов находится у дна канавок, поскольку расстояние от них до нагреваемой нижней части резонатора меньше, чем от его верхней поверхности в соседних областях. Поэтому концентрация электронов в области канавок значительно выше, а поглощение излучения электронами также выше. Известно, что поглощение света свободными электронами в полупроводниках увеличивается с увеличением длины волны [9].

## 3 МАКЕТ ПРИБОРА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕАКЦИИ НА ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

### 3.1 ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Принципиальная схема макета устройства включает в себя несколько функциональных узлов, обеспечивающих регистрацию биопотенциалов, обработку сигналов, питание устройства и передачу данных на компьютер для визуализации.

#### а) Модуль регистрации биопотенциалов EEG Click

В основу модуля EEG Click входит высокоточный инструментальный усилитель INA114, обеспечивающий дифференциальное усиление слабых биопотенциалов, поступающих от электродов. После предварительного усиления сигнал проходит через малошумящий операционный усилитель MCP609, формирующий требуемую амплитуду и частотную характеристику (рисунок 22).

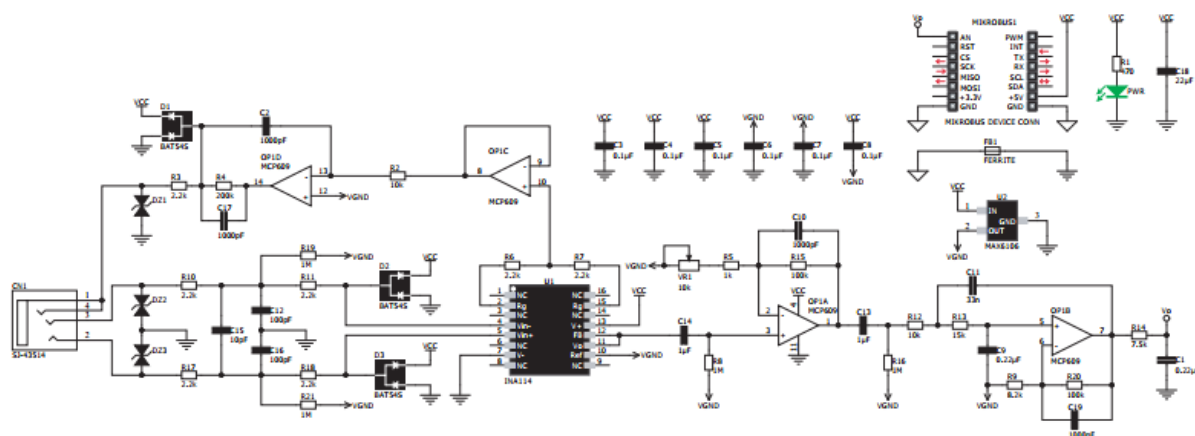


Рисунок 22 – Принципиальная схема

Основные функции модуля:

- усиление низкоамплитудного ЭЭГ-сигнала до уровня, пригодного для дальнейшей обработки;
- фильтрация высокочастотных и сетевых помех;
- вывод сигнала по аналоговому выходу.

К модулю подключаются три электрода. Для выполнения измерения электроды крепятся на лбу человека, в двух точках, находящихся над бровями, третья находится между ними (рисунок 23). Измерения выполняются относительно третьей точки, потенциал которой принимается за нулевой.

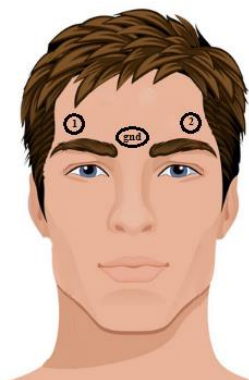


Рисунок 23 - Схема размещения электродов

Выход EEG Click представляет собой *аналоговый сигнал*, передаваемый непосредственно на вход ADC микроконтроллера ESP32-C3.

б) Микроконтроллер ESP32-C3 Super Mini

В качестве узла опроса и передачи данных используется плата ESP32-C3 Super Mini, выполняющая следующие функции:

- считывание аналогового сигнала EEG Click через встроенный АЦП;
- формирование и передача данных в компьютер по интерфейсу USB;
- подключение к внешнему питанию и управление периферийными узлами.

в) Узел стабилизации питания

Для питания аналоговой части используется линейный стабилизатор 5 В, обеспечивающий низкий уровень шума и стабильность работы усилительных каскадов EEG Click. Питание подаётся по цепочке:

Зарядное устройство → аккумуляторная батарея → стабилизатор 5 В → EEG Click.

г) Зарядное устройство и аккумуляторная батарея

Для автономной работы применен модуль из двух литий-полимерных батарей 3.7 В каждая, соединённых последовательно, они подключаются через модуль зарядки. Зарядное устройство обеспечивает защиту от перезаряда, ограничение тока, безопасное подключение внешнего источника.

## 3.2 СВЯЗЬ С КОМПЬЮТЕРОМ И ПРОГРАММА РАБОТЫ ПРИБОРА

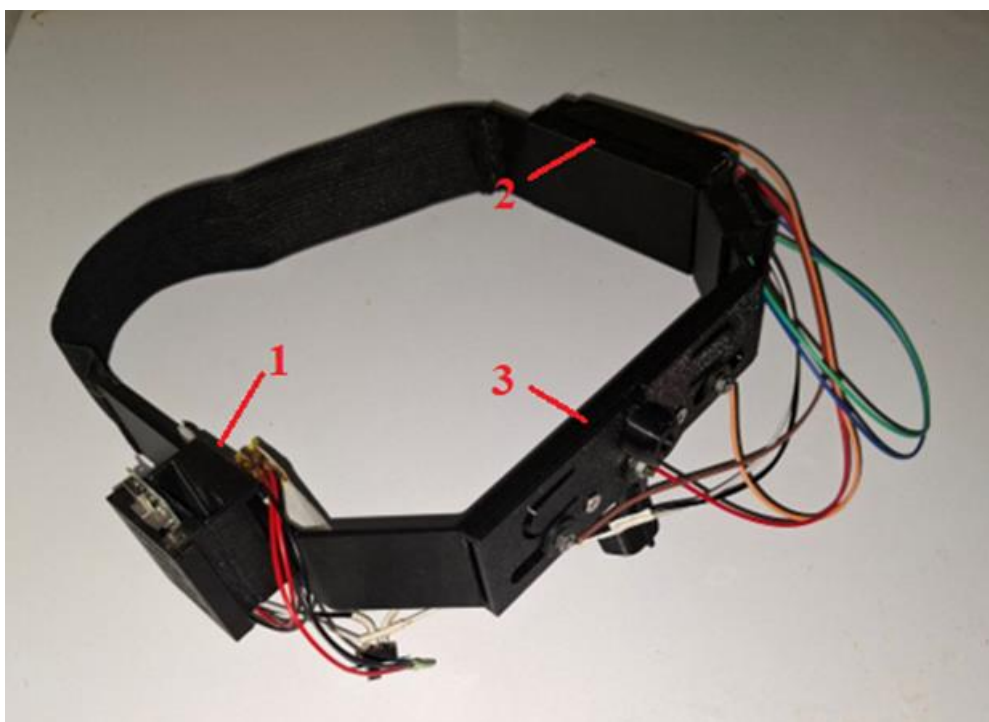
Передача данных от макета в ПК осуществляется по USB-интерфейсу, через виртуальный последовательный порт. Вся обработка и визуализация выполняется в программе, написанной на языке Python. Обмен включает: отправку ESP32-C3 массива сигналов АЦП в текстовом виде; приём и отображение данных на стороне

ПК; сохранение сигнала в файл с последующей обработкой (спектр, фильтрация, статистика).

#### Конструкция макета

Конструкция макета устройства разработана таким образом, чтобы обеспечить надёжное крепление электродов, стабильное питание аналоговой части и удобство подключения устройства к компьютеру.

#### Общее построение конструкции



1 – контроллер; 2 – усилитель; 3 – электроды

Рисунок 24 – Макет устройства

Макет состоит из трёх основных подсистем: корпус устройства в форме обода, повторяющего форму головы, карманы с оборудованием – съемные отделения для установки и закрепления плат 1- контроллер, 2- усилитель и электроды (рисунок 24).

Все элементы соединены между собой проводниками малой длины для минимизации уровня помех и обеспечения устойчивой работы.

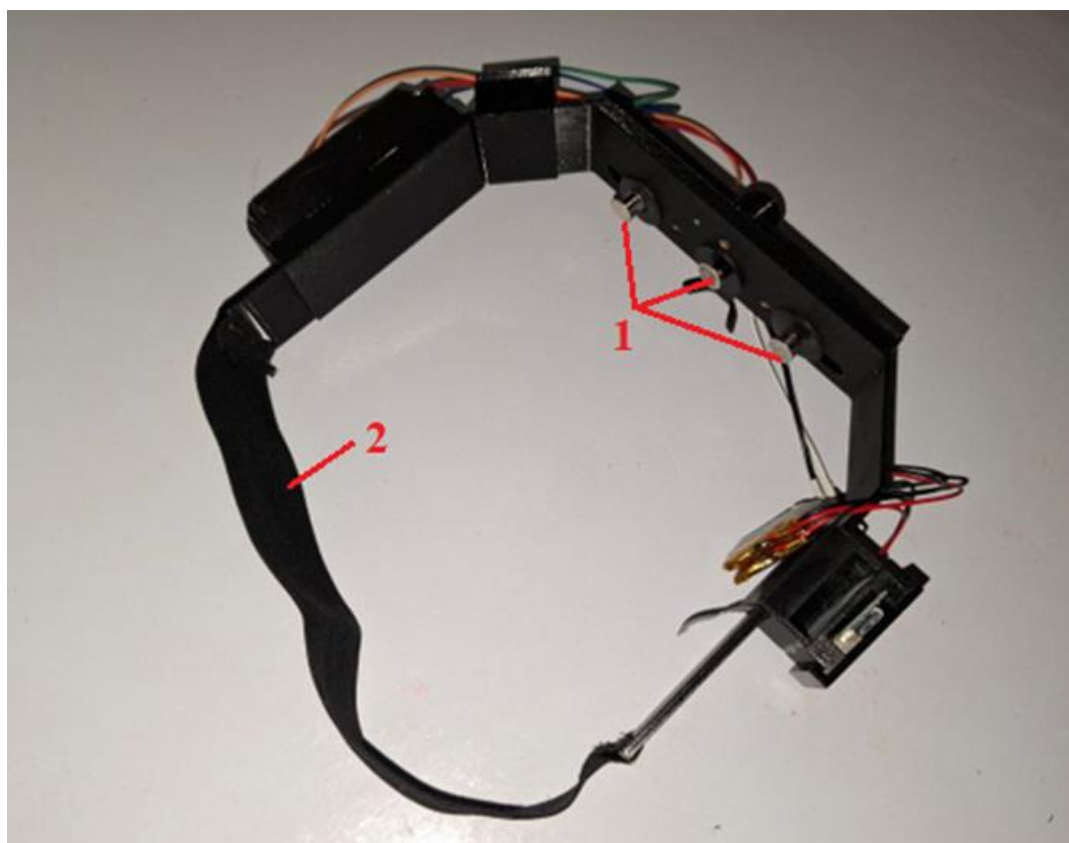
#### Размещение и крепление элементов

Плата EEG Click закреплена на плоском пластиковом боковом основании. Плата ESP32-C3 Super Mini располагается на том же основании и соединяется с

EEG Click коротким аналоговым проводом, ведущим на вход АЦП микроконтроллера.

#### Крепление электродов

Для размещения электродов на голове используется подвижный механизм - расстояние между электродами можно регулировать. Сами электроды поджаты пружинками, что позволяет плотно прилегать к голове. Эластичный ремешок на затылке, обеспечивает стабильное положение всего корпуса на голове человека.



1 – электроды; 2 – упругий элемент крепления

Рисунок 25 – Макет с другой стороны

При необходимости макет может быть перенесён в неразборный корпус, провода могут быть спрятаны, однако на этапе разработки предпочтительно открытое размещение компонентов.

### 3.3 КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТА

#### 3.3.1 ОБЩЕЕ НАЗНАЧЕНИЕ

Разработанный прототип представляет собой обруч-держатель для электродов системы экспресс-ЭЭГ, предназначенный для оперативного размещения электродов на голове пациента с возможностью быстрой регулировки положения и обеспечения плотного контакта с кожей в области лба и затылка. Конструкция ориентирована на лабораторные исследования и интеграцию с миниатюрной электроникой обработки ЭЭГ-сигналов.

#### 3.3.2 КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Обруч выполнен в виде сборки из нескольких 3D-печатных элементов, объединённых в модульную конструкцию. Основные узлы включают (см. рисунки 24-25):

а) Основное оголовье. Состоит из двух симметричных дугообразных деталей, соединённых с передним блоком электроники. Каждая дуга снабжена продольным пазом на концах для крепления и регулировки эластичной ленты, обеспечивающей подстройку под различные размеры головы пользователя. Материал и форма дуг обеспечивают необходимую жёсткость при сохранении комфорта ношения.

б) Передний блок с креплением электродов. Центральная часть обруча содержит корпус для размещения электроники (усилителя биосигнала, фильтра и микроконтроллера). На передней панели предусмотрены гнезда для надбровных электродов, а также фиксаторы и направляющие для зубчатого механизма регулировки межэлектродного расстояния. Электрический разъём служит для подключения сигнальных линий к персональному компьютеру.

в) Механизм регулировки межэлектродного расстояния.

Между электродами реализована зубчатая передача (рис. 24,25), состоящая из:

- зубчатого колеса, закреплённого на оси с рукояткой для ручной регулировки;
- двух симметричных зубчатых реек, перемещающихся в противоположных направлениях. При вращении колеса рейки синхронно раздвигаются или сдвигаются, обеспечивая плавную регулировку расстояния

между надбровными электродами и точную подстройку под индивидуальную анатомию пользователя.

- г) Эластичная фиксация на голове. Для компенсации различий в окружности головы и надёжной фиксации обруча используется регулируемая резинка, продетая через прорези на задних концах дуг. Эластичный элемент позволяет обеспечить комфортное прижатие электродов без избыточного давления.

### 3.3.3 МАТЕРИАЛ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Все конструктивные элементы прототипа изготовлены методом аддитивного производства (FDM-печать) на 3D-принтере Bambu Lab A1. Используемый материал – PETG (полиэтилентерефталат-гликоль), обеспечивающий сочетание прочности, умеренной гибкости и химической стойкости, что делает его подходящим для носимых медицинских прототипов.

Механические характеристики:

- а) Полный вес сборки (без электроники): около 140 г.
- б) Рабочий диапазон регулировки межэлектродного расстояния: от 60 мм до 100 мм.
- в) Диапазон окружности головы: 530 – 610 мм (за счёт эластичной ленты).
- г) Момент вращения зубчатого механизма: не более 0,05 Н·м.

Технологические рекомендации:

- а) Печатать элементы в горизонтальной ориентации для минимизации деформаций и оптимального распределения нагрузки.
- б) Для зубчатых деталей использовать более плотное заполнение (40–50 %) для износостойкости.
- в) Рекомендуются пост-обработка отверстий и пазов сверлением (3,0 мм / 6,0 мм) для точной посадки винтов и оси.
- г) Поверхности, контактирующие с кожей, могут быть покрыты тонким слоем медицинского силикона для повышения комфорта.

Возможности модернизации:

- а) Добавление затылочного модуля с электродами – крепление предусмотрено конструктивно.
- б) Вариант печати из нейлонового или ASA-пластика при серийном производстве для повышения устойчивости к УФ и деформации.

### 3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ МАКЕТА

На рисунке 26 приводится расположение макета на голове при измерении сигналов с точек, показанных на рисунке 23.



Рисунок 26 – Расположение макета на голове

Один из результатов, полученных с помощью макета, приведен на рисунке 27.

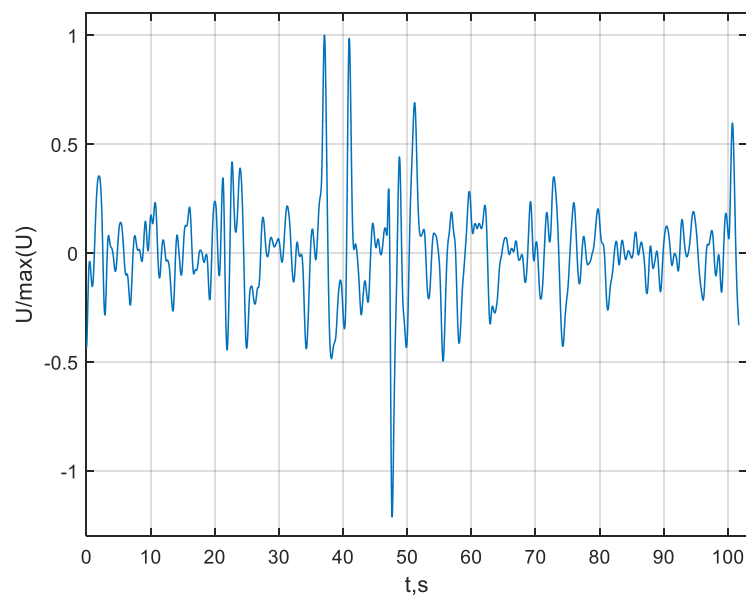


Рисунок 27 – Один из результатов, полученных с помощью макета

#### 4 МАКЕТ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ПОМЕЩЕНИЯ

Для исследования распределения мощности электромагнитного поля Wi-Fi в помещении был разработан макет устройства на базе модуля ESP-12F (семейство ESP8266). Принцип его работы основан на измерении уровня принимаемого сигнала – RSSI (Received Signal Strength Indicator), выраженного в децибелах относительно 1 мВт (дБм). Данный параметр отражает интенсивность электромагнитного поля в точке размещения приёмника.

Модуль ESP-12F подключается к заранее заданной Wi-Fi сети (задаётся через отдельный роутер. Через настраиваемые интервалы времени производится измерение RSSI. Показатель RSSI изменяется при:

- перемещении устройства по комнате;
- появлении физических препятствий (стены, мебель, человек);
- изменении расстояния до точки доступа;
- изменении направления антенны.

Таким образом, устройство позволяет получить карту распределения электромагнитного поля в помещении и визуализировать изменение мощности сигнала в реальном времени.

## 4.1 ОПИСАНИЕ СХЕМЫ БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА

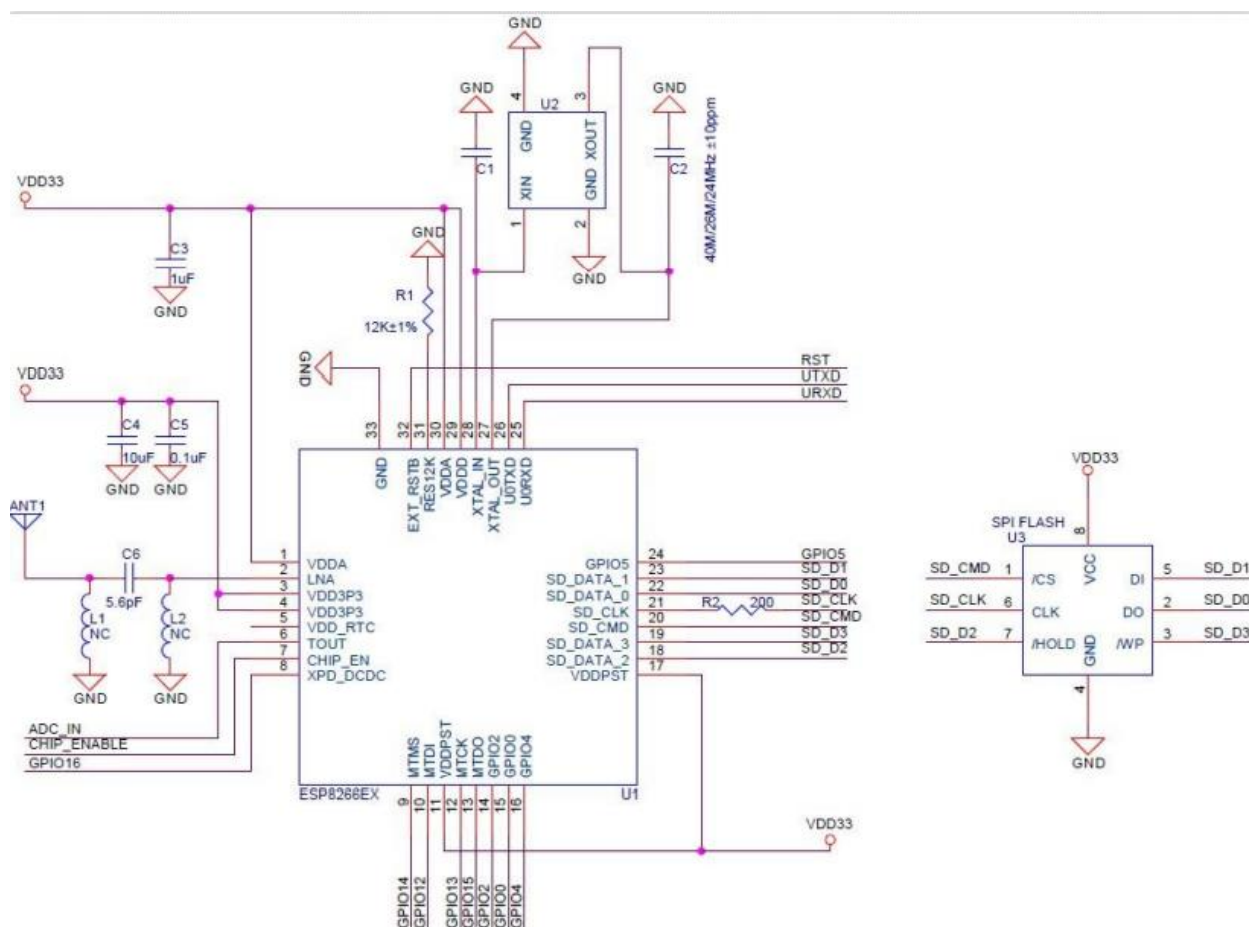


Рисунок 28 – Принципиальная схема ESP12F

Базовый элемент макета представляет собой простую измерительную платформу, включающую следующие узлы:

- 1) Модуль ESP-12F — основной вычислительный и радиочастотный элемент.
- 2) Антенна — встроенная печатная, обеспечивающая приём сигнала Wi-Fi.
- 3) Питание от внешнего источника 3.3 В.

Сигнальная часть замеров полностью цифровая: RSSI вычисляется встроенным радиомодулем ESP8266, что исключает необходимость внешних аналоговых компонентов.

## 4.2 СВЯЗЬ С КОМПЬЮТЕРОМ

Для передачи измеренных значений используется протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – компактный и надёжный протокол поверх TCP/IP, специально разработанный для телеметрических систем.

Для связи с компьютером ESP-12F подключается к точке доступа Wi-Fi. Через заданные интервалы устройство публикует сообщение в MQTT-брокер по одному. Сообщение имеет формат JSON, например: {"id": "node1", "rssi": -62, "ts": 1698765432}. На компьютере установлен MQTT-брокер (Mosquitto или аналог) и клиентское приложение на Python. Клиент подписывается на соответствующий топик и визуализирует изменения RSSI в реальном времени.

На компьютере установлен MQTT-брокер и клиентское приложение, написанное на Python, которое получает данные и визуализирует их в реальном времени.

## 4.3 ПРОГРАММИРОВАНИЕ СХЕМЫ БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА

Программа для ESP-12F реализована на базе Arduino-core для ESP8266. Основные функции прошивки включают:

- подключение к Wi-Fi сети;
- периодический вызов функции WiFi.RSSI() для получения уровня сигнала;
- формирование JSON-структуры;
- публикацию данных в MQTT-брокер через библиотеку PubSubClient;
- обработку переподключения в случае потери сети.

Интервал измерений задаётся в коде (например, 200–1000 мс) и может быть изменён в соответствии с задачей визуализации.

Программное обеспечение ПК включает Python-скрипт, который:

- подписывается на MQTT-топик;
- принимает сообщения от устройства;
- строит график изменения RSSI во времени;
- при необходимости записывает данные в файл для последующей обработки.

#### 4.4 ПРОГРАММИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА

Для прошивки микроконтроллера нам понадобится преобразователь USB – UART на CH340 и сам модуль ESP12F. Подключается преобразователь к модулю следующим образом (Таблица 1).

Таблица 1 – Подключение преобразователя

| ESP12F                                                                                                                                 | USB-Serial               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| VCC                                                                                                                                    | VCC                      |
| CH_PD                                                                                                                                  | VCC                      |
| TX                                                                                                                                     | RX                       |
| RX                                                                                                                                     | TX                       |
| GND                                                                                                                                    | GND                      |
| GPIO 0 - сначала не подключен, но будет использоваться для перевода в режим программирования далее, поэтому к нему уже подведен провод |                          |
| RST, GPIO 2 - не подключены                                                                                                            | RTS, CTS - не подключены |

Алгоритм действий:

- 1) собираем схему;
- 2) переводим в режим программирования (необходимо каждый раз выполнять перед прошивкой модуля):
  - а) Отключаем питание от модуля;
  - б) Подключаем пин GPIO 0 к GND;
  - в) Подаем питание;
- 3) Можно приступить к программированию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование отклика разных комбинаций резонаторов на воздействие электромагнитной волной. Моделирование производилось для одного резонатора, для четырех и шести резонаторов. Показано, что комбинации из четырех и шести резонаторов при воздействии дают значительный рост амплитуды отклика, по сравнению со случаем одного резонатора.

Также исследован отклик резонатора на тепловое воздействие, который дал дополнительное подтверждение модели, на основе которой проводилось компьютерное моделирование. Для этого проведено экспериментальное исследование прибора, изготовленного из кремниевой пластины размером 20 мм x 20 мм x 1 мм с регулярным рельефом кольцевых канавок шириной 0,2 мкм и глубиной 0,8 мкм на её поверхности, построенным путём многократного повторения и масштабирования с использованием аффинных преобразований, формирующих узор, подчиняющийся законам самоподобия и масштабной инвариантности [1-4]. Ранее в этих исследованиях моделировалось поведение такого объекта, используя предположение, что при приложении к такой пластине электрического поля она ведёт себя аналогично приборам типа МОП-транзисторов. Это сходство заключается в том, что в таком транзисторе, основанном на явлении электрической поляризации в электрическом поле, возникает пространственный заряд и происходит переход из электронейтрального состояния в электрически заряженное. Известна также сильная зависимость концентрации электрических зарядов в полупроводнике от температуры. На этом принципе работают такие устройства, как полупроводниковые датчики температуры. В рассматриваемом в данной статье объекте конфигурация канавок приводит к неравномерному распределению электрических зарядов на поверхности пластины с ростом температуры: заряды тяготеют к областям, расположенным вокруг канавок, поскольку им энергетически выгоднее находиться в зоне канавок, чем на поверхности (рис. 3). Это приводит к тому, что кажущаяся температура в центре пластины выше, чем на её периферии. В эксперименте использовался периодический нагрев с использованием элемента Пельтье. Реакция поверхности пластины регистрировалась с помощью тепловизора Testo 890. Измерялось температурное поле поверхности. При нагревании поверхность начинает испускать

электромагнитное излучение согласно закону излучения Планка. Поскольку максимальная температура пластины при нагреве не превышала 50 °С, это излучение лежит в инфракрасном диапазоне. Для определения температуры по этому излучению необходим прибор с инфракрасной чувствительностью – тепловизор. Тепловизор Testo 890 использовался для измерения температурного поля поверхности резонатора при нагреве и охлаждении. Нагрев и охлаждение контролировались с помощью элемента Пельтье. Оказалось, что измеренные значения температуры центральной части резонатора (с рельефом) значительно превышают значения температуры его периферийной части. Однако в действительности все части пластины имеют одинаковую или, по крайней мере, близкие значения. Это можно объяснить только тем, что коэффициент поглощения центральной части пластины с рельефом значительно выше коэффициента поглощения периферийной части (рис. 8). Этот результат не может быть объяснен исключительно наличием поглощающих излучение канавок, поскольку их ширина 0,2 мкм и глубина 0,8 мкм не позволяют им поглощать в диапазоне длин волн, в котором чувствителен Testo 890 (8 – 13 мкм). Рельеф поверхности, однако, обеспечивает хорошее поглощение в диапазоне длин волн долей микрометра. Однако канавки шириной и глубиной порядка долей микрометра не способны поглощать излучение в диапазоне от 8 до 13 мкм, в пределах которого чувствителен Testo 890. Это говорит о существовании другого механизма поглощения. Его можно объяснить поглощением электронами (Seeger, 1982), концентрация которых в центральной части канавчатой пластины значительно выше, чем в периферийных частях. Экспериментальные результаты наглядно подтверждают это. Эти изображения в ИК-спектре показывают, что центральная часть резонатора, вместе с её рельефом, имеет ту же температуру, что и поверхность батареи Пельтье.

Макет прибора, рассмотренный на предыдущем этапе, прошел модернизацию и собран в виде оголовья, напечатанного с помощью 3D- печати. Приведен результат, полученный с его помощью.

Для исследования распределения мощности электромагнитного поля Wi-Fi в помещении разработан макет устройства на базе модуля ESP-12F (семейство ESP8266). Принцип его работы основан на измерении уровня принимаемого

сигнала – RSSI (Received Signal Strength Indicator), выраженного в децибелах относительно 1 мВт (дБм). Данный параметр отражает интенсивность электромагнитного поля в точке размещения приёмника.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Серов И.Н., Лукьянов Г.Н., Копыльцов А.В. Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с кремниевой самоаффинной поверхностью [Текст] / И. Н. Серов, Г. Н. Лукьянов, А. В. Копыльцов // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. Т. 19. – 2007. – № 16. – С. 199.
2. Lukyanov G., Kopyltsov A. Mathematical Modelling Of Interaction Of Electromagnetic Radiation With The Surface Having The Self -Affine Bas-Relief / Lukyanov G. , Kopyltsov A. [Текст] // 4TH International Conference on Physics and Control (PHYSCON 2009), Proceedings - 2005. – Catania: University of Catania, Italy; International Physics and Control Society (IPACS), 2009. – С. 1-5.
3. Kopyltsov A, Lukyanov G, Serov I (2007) Coherent emission of Electromagnetic Radiation from the surface of semiconductor plate with the self-affine relief. The 3rd International IEEE Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon 2007). September, 3rd-7th, Potsdam, Germany
4. Kopyltsov A, Lukyanov G, Serov I (2022) Computer Simulation of the Response of a Semiconductor Wafer with a Self-Affine Pattern in the Form of a System of Coupled Ring Grooves to Electromagnetic Radiation. , ICICT 2022, Vol.1, 2022, pp. 85-92.
5. Anand Y.R., Kumar Mr. R. V., Rudramoorthy Dr. R. Simulation and Analysis of Thermal Efficiency improvement of Solar PV module by Spectral Absorption using Water // 2012 International Conference on Power and Energy Systems (ICPES 2012) URL: [https://www.researchgate.net/figure/Typical-silicon-photovoltaic-cell-spectral-response-to-solar-spectrum\\_fig3\\_237202290](https://www.researchgate.net/figure/Typical-silicon-photovoltaic-cell-spectral-response-to-solar-spectrum_fig3_237202290) (Дата обращения: 16.11.2025)
6. Гордов А.Н. и др. Основы температурных измерений. Энергоатомиздат, 1992
7. Quinn TJ (2013) Temperature. Publisher, Academic Press, 2013
8. Kittel C (1996) Introduction to Solid State Physics. John Willey & (ASIA) Pte. Ltd.
9. Seeger K (2004) Semiconductor physics: an introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004