Номер варианта выбирается в соответствие с таблицей:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№ варианта** | **ФИО** | **Группа** |
| 1 | Бондаренко Анастасия Григорьевна | L34301 |
| 2 | Волошина Анна Ладимировна |
| 3 | Давыдова Евгения Александровна |
| 4 | Дубкова Мария Алексеевна |
| 5 | Едигарев Антон Владимирович |
| 6 | Ермолаев Владислав Михайлович |
| 7 | Карзов Михаил Михайлович |
| 8 | Карпов Павел Александрович |
| 9 | Крупин Дмитрий Александрович |
| 10 | Кустов Вадим Антонович |
| 11 | Лисичников Андрей Константинович |
| 12 | Литвинов Сергей Павлович |
| 13 | Морозова Анастасия Алексеевна |
| 14 | Патрикеева Алина Александровна |
| 15 | Пашкевич Илья Дмитриевич |
| 16 | Разживина Карина Романовна |
| 17 | Суворов Александр Романович |
| 18 | Юмин Евгений Сергеевич |
| 1 | Александров Александр Антонович | L34302 |
| 2 | Ансимов Даниил Васильевич |
| 3 | Баловнев Даниил Юрьевич |
| 4 | Будылин Даниил Игоревич |
| 5 | Вальков Даниил Олегович |
| 6 | Ефимов Арсений Олегович |
| 7 | Журавлев Глеб Сергеевич |
| 8 | Зыкина Аделия Алексеевна |
| 9 | Козлов Константин Вячеславович |
| 10 | Козлова Александра Игоревна |
| 11 | Куликова Варвара Александровна |
| 12 | Савин Владислав Витальевич |
| 13 | Щекотуров Артем Александрович |

Отчеты по лабораторным работам присылать в формате Word или PDF на электронную почту:

avkovalev@itmo.ru

Шаблон темы письма: ППЛ ЛР № X, номер группы, Фамилия И.О.

**Лабораторная работа № 1. Релаксационные колебания в лазерах на основе  
квантовых ям**

**Задание**

Безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе квантовых ям записывается следующим образом [1]:

, (1)

, (2)

где время  выражено в единицах времени жизни фотона в резонаторе  (, где  – действительное время);

точка обозначает дифференцирование по времени;

 – нормированная интенсивность поля лазерного излучения;

 – нормированная инверсия носителей заряда в активной среде;

– отношение между временем жизни фотона и временем релаксации носителей заряда в активной среде;

 – параметр накачки.

*Задача 1:* определить стационарное состояние генерации ,  и пороговое значение параметра накачки  в модели (1–2). Пороговое значение накачки соответствует ситуации, когда  становится положительным.

*Задача 2:* построить график интенсивности лазерного излучения  и определить по данному графику частоту наблюдаемых релаксационных колебаний интенсивности. Частоту релаксационных колебаний выразить в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

Для интегрирования данной системы уравнений следует воспользоваться численными методами, реализованными в программной среде по выбору (например, MATLAB, SciLab, Octave, Python, Julia или другой).

Значения параметров и начальных условий взять в соответствии с вариантом задания в таблице 1.

Значение времени релаксации носителей заряда  = 1 нс для всех вариантов.

**Таблица 1 – Варианты задания**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Начальные значения и значения параметров** | **№ п/п** | **Начальные значения и значения параметров** |
| 1 | *J* = 2*Jthr*;  = 100 пс;  *I*(0) = 1; *N*(0) = 0 | 11 | *J* = 2,5*Jthr*;  = 15 пс;  *I*(0) = 1; *N*(0) = 3 |
| 2 | *J* = 3*Jthr*;  = 20 пс;  *I*(0) = 5; *N*(0) = 2 | 12 | *J* = 2*Jthr*;  = 30 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 0 |
| 3 | *J* = 3.5*Jthr*;  = 50 пс;  *I*(0) = 5; *N*(0) = 1 | 13 | *J* = 1,5*Jthr*;  = 60 пс;  *I*(0) = 3; *N*(0) = 1 |
| 4 | *J* = 2*Jthr*;  = 40 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 0 | 14 | *J* = 2*Jthr*;  = 50 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 2 |
| 5 | *J* = 3*Jthr*;  = 60 пс;  *I*(0) = 5; *N*(0) = 1 | 15 | *J* = 2*Jthr*;  = 10 пс;  *I*(0) = 2; *N*(0) = 3 |
| 6 | *J* = 1.5*Jthr*;  = 40 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 0 | 16 | *J* = 1,5*Jthr*;  = 10 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 0 |
| 7 | *J* = 4*Jthr*;  = 20 пс;  *I*(0) = 3; *N*(0) = 2 | 17 | *J* = 3,5*Jthr*;  = 20 пс;  *I*(0) = 3; *N*(0) = 1 |
| 8 | *J* = 3*Jthr*;  = 20 пс;  *I*(0) = 1; *N*(0) = 0 | 18 | *J* = 4*Jthr*;  = 10 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 2 |
| 9 | *J* = 3,5*Jthr*;  = 50 пс;  *I*(0) = 2; *N*(0) = 0 | 19 | *J* = 2,5*Jthr*;  = 30 пс;  *I*(0) = 3; *N*(0) = 2 |
| 10 | *J* = 4*Jthr*;  = 20 пс;  *I*(0) = 2; *N*(0) = 5 | 20 | *J* = 4*Jthr*;  = 50 пс;  *I*(0) = 4; *N*(0) = 3 |

Подготовить отчет по лабораторной работе в соответствии с шаблоном.

**Список источников**

1. Erneux T., Glorieux P. Laser dynamics. Cambridge University Press, 2010.

**Шаблон отчета по лабораторной работе №1**

**1. Содержание титульного листа:**

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

институт перспективных систем передачи данных

Лабораторная работа № 1

по дисциплине «Полупроводниковые лазеры»

«Релаксационные колебания в лазерах на основе квантовых ям»

Выполнил(а) студент(ка) группы XXX

Ф.И.О.

Санкт-Петербург

20\_\_ г.

**2. Содержание отчета:**

**Целью** лабораторной работы является исследование процессов релаксации в полупроводниковых лазерах, усовершенствование навыков использования средств математического моделирования.

**Задание** на лабораторную работу:

лазера на основе квантовых ям записывается следующим образом:

, (1)

, (2)

где время  выражено в единицах времени жизни фотона в резонаторе  (, где  – действительное время);

точка обозначает дифференцирование по времени;

 – нормированная интенсивность поля лазерного излучения;

 – нормированная инверсия носителей заряда в активной среде;

– отношение между временем жизни фотона и временем релаксации носителей заряда в активной среде;

 – параметр накачки.

*Задача 1:* определить стационарное состояние генерации ,  и пороговое значение параметра накачки  в модели (1–2). Пороговое значение накачки соответствует ситуации, когда  становится положительным.

*Задача 2:* построить график интенсивности лазерного излучения  и определить по данному графику частоту наблюдаемых релаксационных колебаний интенсивности. Частоту релаксационных колебаний выразить в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

Для интегрирования данной системы уравнений следует воспользоваться численными методами, реализованными в программной среде по выбору (например, MATLAB, SciLab, Octave, Python, Julia или другой).

Значение времени релаксации носителей заряда  = 1 нс.

/\* вставить соответствующие значения из таблицы 1 \*/

**Ход работы**

/\* Кратко описать последовательность шагов и действий, которые осуществлялись при выполнении лабораторной работы, какие для этого использовались средства и т.п. Привести требуемые графики и определенное значение частоты релаксационных колебаний. \*/

**Выводы по работе:** /\* написать о том, какие знания и навыки были приобретены в ходе выполнения лабораторной работы. \*/

**Лабораторная работа № 2. Релаксационные колебания в лазерах на основе квантовых точек**

**Задание**

Безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе квантовых точек записывается следующим образом [1]:

, (1)

, (2)

, (3)

где время  выражено в единицах времени жизни фотона в резонаторе  (, где  – действительное время);

точка обозначает дифференцирование по времени;

 – нормированная интенсивность;

 – вероятность заселенности точки;

 – нормированное число носителей заряда в смачивающем слое;

 – дифференциальное усиление;

 – отношение между временем жизни фотона и скоростью релаксации заселенности точки;

 – отношение между временем жизни фотона и скоростью релаксации смачивающего слоя;

 – параметр накачки.

Функция  характеризует обмен носителями заряда между точкой и смачивающим слоем:

, (4)

где  – процесс захвата носителя заряда со скоростью ,  – зависящая от температуры скорость высвобождения носителя заряда в смачивающий слой,  при комнатных температурах, в настоящей работе  = 0.

*Задача 1:* определить стационарное состояние генерации , ,  и пороговое значение параметра накачки  в модели (1–3). Пороговое значение накачки соответствует ситуации, когда  становится положительным.

*Задача 2:* построить график интенсивности лазерного излучения  и определить по данному графику частоту наблюдаемых релаксационных колебаний интенсивности. Частоту релаксационных колебаний выразить в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

*Задача 3*: уменьшить значение параметра *B* в два раза. Как изменилась при этом частота релаксационных колебаний?

Для интегрирования данной системы уравнений следует воспользоваться численными методами, реализованными в программной среде по выбору (например, MATLAB, SciLab, Octave, Python, Julia или другой).

Значения параметров и начальных условий взять в соответствии с вариантом задания в таблице 1.

Значение времени релаксации носителей заряда в смачивающем слое  = 1 нс для всех вариантов.

**Таблица 1 – Варианты задания**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Начальные значения и значения параметров** | **№ п/п** | **Начальные значения и значения параметров** |
| 1 | *g =* 1.1; *J* = 2*Jthr*; *B* = 500;  = 0.5 нс;  = 100 пс;  *I*(0) = 1; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; | 11 | *g =* 1.1; *J* = 2,5*Jthr*; *B* = 700;  = 0.5 нс;  = 15 пс  *I*(0) = 1; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 3; |
| 2 | *g =* 1.2, *J* = 3*Jthr*; *B* = 600;  = 0.6 нс;  = 20 пс;  *I*(0) = 5; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 2; | 12 | *g =* 1.15; *J* = 2*Jthr*; *B* = 800;  = 0.6 нс;  = 30 пс  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; |
| 3 | *g =* 1.15, *J* = 3.5*Jthr*; *B* = 700;  = 0.7 нс;  = 50 пс  *I*(0) = 5; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; | 13 | *g =* 1.13; *J* = 1,5*Jthr*; *B* = 500;  = 0.7 нс;  = 60 пс  *I*(0) = 3; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; |
| 4 | *g =* 1.12, *J* = 2*Jthr*; *B* = 800;  = 0.8 нс;  = 40 пс;  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; | 14 | *g =* 1.14, *J* = 2*Jthr*; *B* = 600  = 0.8 нс;  = 50 пс  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 2; |
| 5 | *g =* 1.14, *J* = 3*Jthr*; *B* = 900;  = 0.9 нс;  = 60 пс  *I*(0) = 5; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; | 15 | *g =* 1.18; *J* = 2 *Jthr*; *B* = 700;  = 0.5 нс;  = 25 пс  *I*(0) = 1; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 3; |
| 6 | *g =* 1.13, *J* = 1.5*Jthr*; *B* = 800;  = 1.0 нс,  = 40 пс  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; | 16 | *g =* 1.16; *J* = 3*Jthr*; *B* = 800;  = 0.6 нс;  = 40 пс  *I*(0) = 6; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; |
| 7 | *g =* 1.17, *J* = 4*Jthr*; *B* = 700;  = 0.9 нс;  = 20 пс;  *I*(0) = 3; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 2; | 17 | *g =* 1.14; *J* = 3,5*Jthr*; *B* = 500;  = 0.7 нс;  = 40 пс  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; |
| 8 | *g =* 1.13; *J* = 3*Jthr*; *B* = 600;  = 0.8 нс;  = 200 пс  *I*(0) = 1; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; | 18 | *g =* 1.16, *J* = 4*Jthr*; *B* = 600  = 0.8 нс;  = 30 пс  *I*(0) = 5; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 2; |
| 9 | *g =* 1.1; *J* = 3,5*Jthr*; *B* = 500;  = 0.7 нс;  = 50 пс  *I*(0) = 2; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 0; | 19 | *g =* 1.18; *J* = 2,5*Jthr*; *B* = 500;  = 0.7 нс;  = 15 пс  *I*(0) = 5; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 1; |
| 10 | *g =* 1.17; *J* = 4*Jthr*; *B* = 600;  = 0.6 нс;  = 20 пс  *I*(0) = 2; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 5; | 20 | *g =* 1.2, *J* = 3*Jthr*; *B* = 600  = 0.8 нс;  = 40 пс  *I*(0) = 4; *ρ*(0) = 0; *n*(0) = 3; |

**Список источников**

1. Erneux T., Viktorov E.A., Mandel P. Time scales and relaxation dynamics in quantum-dot lasers // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2007. Т. 76, № 2. С. 23819.

**Шаблон отчета по лабораторной работе №2**

**1. Содержание титульного листа:**

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

институт перспективных систем передачи данных

Лабораторная работа № 2

по дисциплине «Полупроводниковые лазеры»

«Релаксационные колебания в лазерах на основе квантовых точек»

Выполнил(а) студент(ка) группы XXX

Ф.И.О.

Санкт-Петербург

20\_\_ г.

**2. Содержание отчета:**

**Целью** лабораторной работы является исследование процессов релаксации в полупроводниковых лазерах, усовершенствование навыков использования средств математического моделирования.

**Задание** на лабораторную работу:

Безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе квантовых точек записывается следующим образом [2,3]:

, (1)

, (2)

, (3)

где время  выражено в единицах времени жизни фотона в резонаторе  (, где  – действительное время);

точка обозначает дифференцирование по времени;

 – нормированная интенсивность;

 – вероятность заселенности точки;

 – нормированное число носителей заряда в смачивающем слое;

 – дифференциальное усиление;

 – отношение между временем жизни фотона и скоростью релаксации заселенности точки;

 – отношение между временем жизни фотона и скоростью релаксации смачивающего слоя;

 – параметр накачки.

Функция  характеризует обмен носителями заряда между точкой и смачивающим слоем:

, (4)

где  – процесс захвата носителя заряда со скоростью ,  – зависящая от температуры скорость высвобождения носителя заряда в смачивающий слой,  при комнатных температурах, в настоящей работе  = 0.

*Задача 1:* определить стационарное состояние генерации , ,  и пороговое значение параметра накачки  в модели (1–3). Пороговое значение накачки соответствует ситуации, когда  становится положительным.

*Задача 2:* построить график интенсивности лазерного излучения  и определить по данному графику частоту наблюдаемых релаксационных колебаний интенсивности. Частоту релаксационных колебаний выразить в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

*Задача 3*: уменьшить значение параметра *B* в два раза. Как изменилась при этом частота релаксационных колебаний?

Для интегрирования данной системы уравнений следует воспользоваться численными методами, реализованными в программной среде по выбору (например, MATLAB, SciLab, Octave, Python, Julia или другой).

Значение времени релаксации носителей заряда в смачивающем слое  = 1.

/\* вставить соответствующие значения из таблицы 1 \*/

**Ход работы**

/\* Кратко описать последовательность шагов и действий, которые осуществлялись при выполнении лабораторной работы, какие для этого использовались средства и т.п. Привести требуемые графики и определенное значение частоты релаксационных колебаний. \*/

**Выводы по работе:** /\* написать о том, какие знания и навыки были приобретены в ходе выполнения лабораторной работы. \*/

**Контрольные вопросы к защите лабораторных работ № 1-2:**

1. Какие характеристики релаксационных колебаний вы можете выделить?

2. Чем определяется время жизни фотона в резонаторе?

3. Какой физический процесс характеризуется временем жизни фотона в резонаторе? Каким уравнением его можно описать?

4. К какому состоянию стремятся релаксационные колебания лазера?

5. Каким методом осуществлялось решение системы ОДУ в лабораторной работе?

6. Какова ошибка данного метода?

7. В каких единицах выражено время в модели?

8. Как осуществить переход от частоты, вычисленной в физических единицах, к частоте в модельных единицах времени?

9. Наблюдается ли отличие в характере релаксационных колебаний для лазера на квантовых ямах и квантовых точках?

**Список источников**

1. Erneux T., Glorieux P. Laser dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

2. Erneux T., Viktorov E.A., Mandel P. Time scales and relaxation dynamics in quantum-dot lasers // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2007. Т. 76, № 2. С. 23819.

3. Ohtsubo. Semiconductor Lasers. Stability, Instability and Chaos. – Cham: Springer International Publishing, 2017

**Лабораторная работа № 3. Исследование модуляционных характеристик полупроводниковых лазеров**

**Задание 1**

Используя безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе **квантовых ям** с модуляцией параметра накачки, построить график амплитудного отклика системы в зависимости от частоты модуляции.

Модель соответствует таковой из задания лабораторной работы № 1 с учетом добавленного гармонического члена, отвечающего за модуляцию:

, (1)

, (2)

где  и  – амплитуда и частота модуляции параметра накачки соответственно.

Начальные значения переменных соответствуют стационарному состоянию модели в отсутствие модуляции: , , которые были определены в ходе лабораторной работы 1.

**Задача 1.1**

Используя численные методы для интегрирования данной системы уравнений и значения параметров из таблицы 1 лабораторной работы **№1**, построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции .

При этом должны выполняться следующие условия:

1. число значений  (точек) на графиках должно быть не менее 17;
2. минимальное значение  соответствует 5% от определенного в лабораторной работе №1 значения частоты релаксационных колебаний;
3. максимальное значение  соответствует 125% от определенного в лабораторной работе №1 значения частоты релаксационных колебаний;
4. для простоты, установившимся режимом можно считать режим, наблюдаемый по прошествии временного интервала, соответствующего ;
5. значение параметра  принять равным 10% значения параметра *J*;
6. частота на графиках должна быть выражена в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

**Важно**: значение частоты , которое используется при моделировании, является нормированным, поэтому для расчетов оно должно быть переведено в нормированные единицы в модели.

**Задача 1.2**

Уменьшить значение параметра *J* на 25% (и, соответственно, **изменить значение параметра  и начальные условия**). Построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции  для нового значения параметров. Требования к графикам соответствуют задаче 1.1.

**Задание 2**

Используя безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе **квантовых точек** с модуляцией параметра накачки, построить график амплитудного отклика системы в зависимости от частоты модуляции.

Модель соответствует таковой из задания лабораторной работы №2 с учетом добавленного гармонического члена, отвечающего за модуляцию:

, (3)

, (4)

, (5)

где  и  – амплитуда и частота модуляции параметра накачки соответственно.

Начальные значения переменных соответствуют стационарному состоянию модели в отсутствие модуляции: ,  , которые были определены в ходе лабораторной работы 1.

**Задача 2.1**

Используя численные методы для интегрирования системы уравнений (3–5) и значения параметров из таблицы 1 лабораторной работы **№2**, построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции .

При этом должны выполняться следующие условия:

1. число значений  (точек) на графиках должно быть не менее 17;
2. минимальное значение  соответствует 5% от определенного в лабораторной работе №2 (задача 2) значения частоты релаксационных колебаний;
3. максимальное значение  соответствует 125% от определенного в лабораторной работе №2 (задача 2) значения частоты релаксационных колебаний;
4. для простоты, установившимся режимом можно считать режим, наблюдаемый по прошествии временного интервала, соответствующего ;
5. значение параметра  принять равным 10% значения параметра *J*;
6. частота на графиках должна быть выражена в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

**Важно**: значение частоты , которое используется при моделировании, является нормированным, поэтому для расчетов оно должно быть переведено в нормированные единицы в модели.

**Задача 2.2**

Уменьшить значение параметра *J* на 25% (и, соответственно, **изменить значение параметра  и начальные условия**). Построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции  для нового значения параметров. Требования к графикам соответствуют задаче 2.1.

Подготовить отчет по лабораторной работе в соответствии с шаблоном.

**Шаблон отчета по лабораторной работе №3:**

**1. Содержание титульного листа:**

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

институт перспективных систем передачи данных

Лабораторная работа № 3

по дисциплине «Полупроводниковые лазеры»

«Исследование модуляционных характеристик полупроводниковых лазеров»

Выполнил(а) студент(ка) группы XXX

Ф.И.О.

Санкт-Петербург

20\_\_ г.

**2. Содержание отчета:**

**Целью** лабораторной работы является исследование влияния частоты релаксационных колебаний на модуляционные характеристики полупроводниковых лазеров.

**Задание** на лабораторную работу:

**Задание 1**

Используя безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе **квантовых ям** с модуляцией параметра накачки, построить график амплитудного отклика системы в зависимости от частоты модуляции.

Модель соответствует таковой из задания лабораторной работы № 1 с учетом добавленного гармонического члена, отвечающего за модуляцию:

, (1)

, (2)

где  и  – амплитуда и частота модуляции параметра накачки соответственно.

Начальные значения переменных соответствуют стационарному состоянию модели в отсутствие модуляции: , , которые были определены в ходе лабораторной работы 1.

**Задача 1.1**

Используя численные методы для интегрирования данной системы уравнений и значения параметров из таблицы 1 лабораторной работы **№1**, построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции .

При этом должны выполняться следующие условия:

1. число значений  (точек) на графиках должно быть не менее 17;
2. минимальное значение  соответствует 5% от определенного в лабораторной работе №1 значения частоты релаксационных колебаний;
3. максимальное значение  соответствует 125% от определенного в лабораторной работе №1 значения частоты релаксационных колебаний;
4. для простоты, установившимся режимом можно считать режим, наблюдаемый по прошествии временного интервала, соответствующего ;
5. значение параметра  принять равным 10% значения параметра *J*;
6. частота на графиках должна быть выражена в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

**Важно**: значение частоты , которое используется при моделировании, является нормированным, поэтому для расчетов оно должно быть переведено в нормированные единицы в модели.

**Задача 1.2**

Уменьшить значение параметра *J* на 25% (и, соответственно, **изменить значение параметра  и начальные условия**). Построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции  для нового значения параметров. Требования к графикам соответствуют задаче 1.1.

**Задание 2**

Используя безразмерные скоростные уравнения динамики одночастотного полупроводникового лазера на основе **квантовых точек** с модуляцией параметра накачки, построить график амплитудного отклика системы в зависимости от частоты модуляции.

Модель соответствует таковой из задания лабораторной работы №2 с учетом добавленного гармонического члена, отвечающего за модуляцию:

, (3)

, (4)

, (5)

где  и  – амплитуда и частота модуляции параметра накачки соответственно.

Начальные значения переменных соответствуют стационарному состоянию модели в отсутствие модуляции: ,  , которые были определены в ходе лабораторной работы 1.

**Задача 2.1**

Используя численные методы для интегрирования системы уравнений (3–5) и значения параметров из таблицы 1 лабораторной работы **№2**, построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции .

При этом должны выполняться следующие условия:

1. число значений  (точек) на графиках должно быть не менее 17;
2. минимальное значение  соответствует 5% от определенного в лабораторной работе №2 (задача 2) значения частоты релаксационных колебаний;
3. максимальное значение  соответствует 125% от определенного в лабораторной работе №2 (задача 2) значения частоты релаксационных колебаний;
4. для простоты, установившимся режимом можно считать режим, наблюдаемый по прошествии временного интервала, соответствующего ;
5. значение параметра  принять равным 10% значения параметра *J*;
6. частота на графиках должна быть выражена в единицах частоты, кратных Гц, используя значение *τp*, на которое нормировано время в данной модели.

**Важно**: значение частоты , которое используется при моделировании, является нормированным, поэтому для расчетов оно должно быть переведено в нормированные единицы в модели.

**Задача 2.2**

Уменьшить значение параметра *J* на 25% (и, соответственно, **изменить значение параметра  и начальные условия**). Построить графики зависимости максимального и минимального значения интенсивности  в установившемся режиме от частоты модуляции  для нового значения параметров. Требования к графикам соответствуют задаче 2.1.

**Ход работы**

/\* Кратко описать последовательность шагов и действий, которые осуществлялись при выполнении лабораторной работы, какие для этого использовались средства и т.п. Привести вычисление промежуточных величин, а также полученные графики. В приложениях к отчету привести листинги программ, использованных для расчета. \*/

Выводы по работе: /\* сделать выводы о том, как влияет частота релаксационных колебаний на модуляционные характеристики полупроводникового лазера. Проиллюстрировать данные выводы при помощи результатов выполнения работы. \*/

**Контрольные вопросы к лабораторной работе № 3:**

1. Как зависит частота релаксационных колебаний от параметра накачки?

2. Как зависит полуширина резонансного пика на графике зависимости максимальной интенсивности от параметра накачки?

3. Есть ли способ определить частоту релаксационных колебаний при помощи аналитических методов на основе системы уравнений? Как называется такой метод?

4. Как зависит частота релаксационных колебаний от параметра *γ*?

5. Каковы пути увеличения частоты релаксационных колебаний полупроводниковых лазеров? Какие трудности при этом могут возникнуть?

6. Каковы отличия характера модуляционного отклика между лазером на квантовых ямах и квантовых точках?

**Лабораторная работа № 4. Исследование оптического и радиочастотного спектра полупроводникового лазера**

**Задание 1**

В настоящей лабораторной работе рассматривается модель полупроводникового лазера, учитывающая динамику продольных мод и эффекты, связанные с амплитудно-фазовым сопряжением в полупроводниковой среде и внутрирезонаторной фильтрацией. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, что позволяет моделировать динамику потенциально бесконечного континуума решений, в том числе, эффекты перескока между модами (mode-hopping), гистерезиса и импульсной генерации.

В модели принято приближение кольцевого двухсекционного полупроводникового лазера. Первая секция содержит усиливающую среду. Вторая секция действует как спектральный фильтр с пропускной способностью, зависящей от частоты. В роли спектрального фильтра может выступать как ограниченная полоса усиления, так и присутствующие внутри резонатора Брэгговские отражатели и эталоны Фабри-Перо.

Модель сформулирована на основе модели, предложенной А.Г. Владимировым и Д. Тураевым в работе [1], следующим образом:

, (1)

, (2)

где  – комплексная амплитуда электрического поля внутри резонатора;

 – полоса пропускания спектрального фильтра;

*T* – время запаздывания, равное времени обхода «холодного» резонатора;

 – фактор ослабления внутрирезонаторного поля, описывающий полные нерезонансные потери интенсивности за один полный обход резонатора;

 – коэффициент уширения линии (фактор Генри) полупроводниковой активной среды [2];

 и  – расстройка между центральной частотой спектрального фильтра  и частотой ближайшей к ней продольной моды резонатора  (см. рисунок 1);

 – усиление активной среды;

 – параметр накачки;

 – скорость релаксации носителей в активной среде.

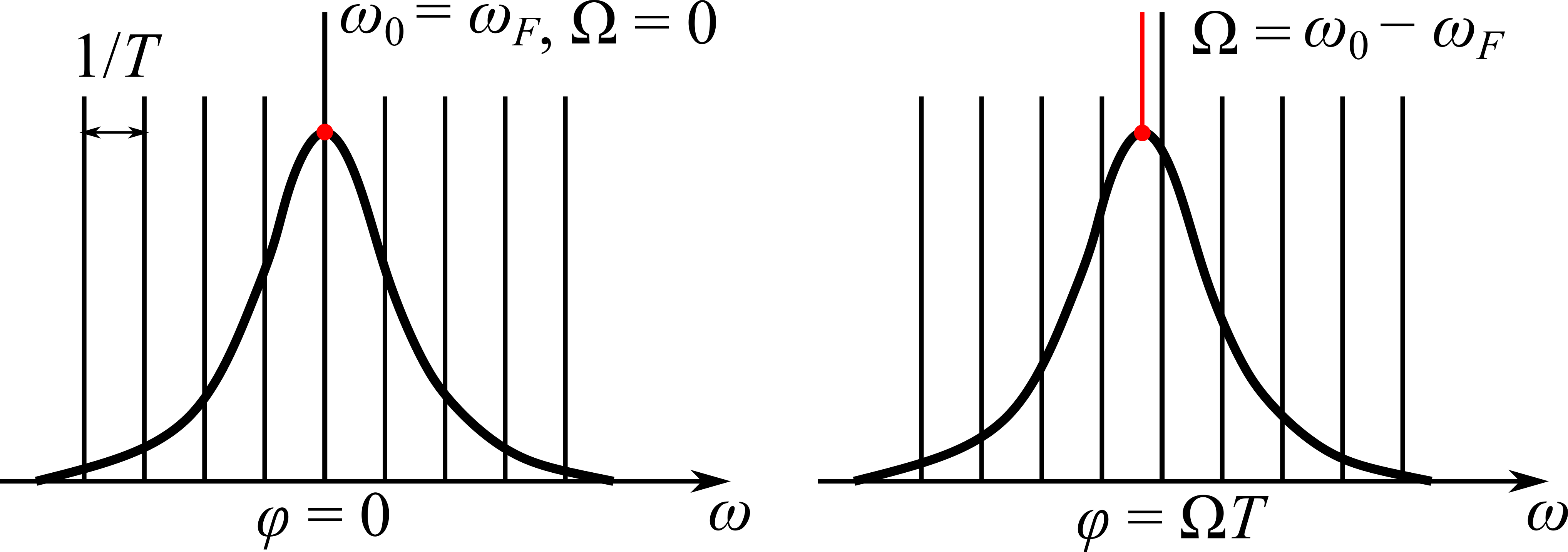


Рисунок 1 – Схематичная иллюстрация расстройки между центральной частотой спектрального фильтра  и ближайшей к ней продольной модой резонатора  (см. рисунок 1). Слева: расстройка отсутствует; справа: присутствует расстройка.

Моды лазера (МЛ) определяются как решения системы уравнений (1)–(2) следующего вида:

, (3)

где  – постоянная амплитуда поля, и *ωS* – разница между частотой моды и центральной частотой спектрального фильтра. При этом усиление в режиме одномодовой генерации постоянно:

. (4)

Используя программный код для численного решения системы уравнений на языке Julia (или реализованный при помощи других средств по выбору), построить графики оптического и радиочастотного спектра лазера при заданных параметрах.

*Примечание*: для установки Julia (свободное программное обеспечение) можно воспользоваться следующим руководством:

http://docs.junolab.org/latest/man/installation/

Общие параметры:  и приведенные в таблице.

**Таблица 1 – Варианты задания**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Значения параметров** | **№ п/п** | **Значения параметров** |
| 1 | , , | 11 | , , |
| 2 | , , | 12 | , , |
| 3 | , , | 13 | , , |
| 4 | , , | 14 | , , |
| 5 | , , | 15 | , , |
| 6 | , , | 16 | , , |
| 7 | , , | 17 | , , |
| 8 | , , | 18 | , , |
| 9 | , , | 19 | , , |
| 10 | , , | 20 | , , |

**Задача 1.1:**

При фиксированных значениях параметра накачки  и коэффициента уширения линии  построить спектры для разных значений оптической фазы

.

**Задача 1.2:**

При фиксированном значении параметра оптической фазы  и коэффициента уширения линии  построить спектры для разных значений параметра накачки

.

**Задача 1.3:**

При фиксированном значении параметра оптической фазы  и параметра накачки  построить спектры для разных значений коэффициента уширения линии

.

**Задание 2**

В настоящей лабораторной работе рассматривается способ получения комплексной амплитуды поля лазерного излучения на основе экспериментальных данных 3x3 интерферометрии, полученных для процесса включения полупроводникового лазера с длинным резонатором и внутрирезонаторным фильтром.

Схема метода представлена на рисунке 2 [2].

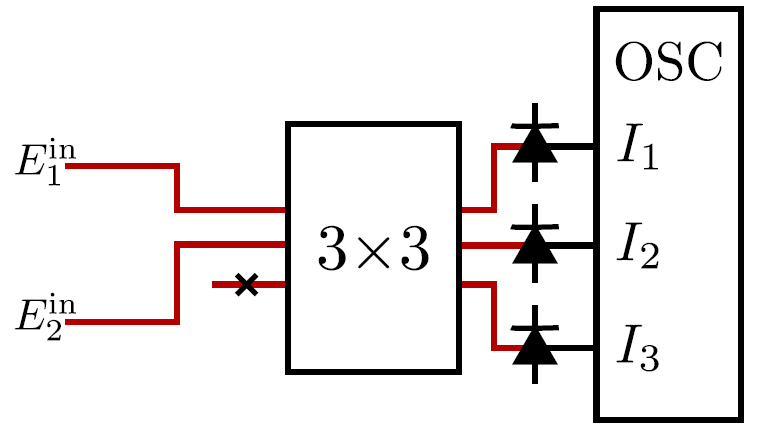


Рисунок 2 – Схема 3x3 интерферометрии с лазером непрерывного излучения: *E*in1 – измеряемое поле, *E*in2 – поле излучения опорного лазера, OSC – осциллограф, *I*1,2,3 – регистрируемые сигналы интенсивности

Интенсивность, регистрируемая тремя каналами осциллографа в некоторый момент времени, соответствует интерференции между измеряемым полем лазерного излучения и опорным согласно следующим выражениям:

, (5)

, (6)

, (7)

где  и  соответствуют амплитуде и фазе *i*-го поля.

Также осциллограф дополнительно регистрирует сигнал интенсивности измеряемого поля *I*4.

Разность фаз между измеряемым и опорным полями в некоторый момент времени может быть определена в соответствии со следующим выражением:

. (8)

Результатом вычисления выражения (4) является т.н. относительная, неразвернутая фаза. С учетом присутствия технических шумов для получения устойчивого значения развернутой фазы можно использовать следующее выражение:

. (9)

где  – неразвернутая фаза,  – развернутая фаза, полученная при вычислении выражения (4) с использованием сглаженных по времени значений интенсивности *I*1, *I*2, *I*3. Развертывание фазы выполняется на основе любого предпочтительного алгоритма развертки.

Значение  может быть использовано для определения мгновенной частоты:

. (10)

Значение комплексной амплитуды поля может быть получено с использованием следующего выражения:

. (11)

Время когерентности и ширина оптического спектра могут быть определены на основе спектральной плотности мощности:

, (12)

где  – спектральная плотность мощности (полученная, например, с использованием быстрого преобразования Фурье. Также, в этом случае границы интегрирования соответствуют минимальной и максимальной частоте спектрального преобразования).

Файлы данных для лабораторной работы содержат следующие переменные:

smpl – временной шаг дискретизации в секундах;

y1, y2, y3 – значения зарегистрированной интенсивности *I*1, *I*2, *I*3;

y4 – зарегистрированная интенсивность лазера *I*4.

Один обход резонатора соответствует 5215 точкам.

Время начала процесса включения составляет 20.651 мкс от начального момента времени, с которого осуществлялась запись данных.

Файл данных выбрать в соответствие с вариантом.

**Таблица 2 – Варианты задания (максимальный размер файла 70 МБ)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Файл** | **№ п/п** | **Файл** | **№ п/п** | **Файл** | **№ п/п** | **Файл** |
| 1 | A.mat | 6 | B.mat | 11 | C.mat | 16 | D.mat |
| 2 | B.mat | 7 | C.mat | 12 | D.mat | 17 | A.mat |
| 3 | C.mat | 8 | D.mat | 13 | A.mat | 18 | B.mat |
| 4 | D.mat | 9 | A.mat | 14 | B.mat | 19 | C.mat |
| 5 | A.mat | 10 | B.mat | 15 | C.mat | 20 | D.mat |

**Ссылки на данные**

|  |  |
| --- | --- |
| **Название файла** | **URL** |
| A.mat | <https://drive.google.com/file/d/12fUPCn94gkKfDUybx3AS3kfj3gqtnPN7> |
| B.mat | <https://drive.google.com/file/d/17fifbJVqutvHZiSwIBsRTmUH0rsFGdys> |
| C.mat | <https://drive.google.com/file/d/1N6a3DzuMnaScA-hUrafIggl2VddxT_rn> |
| D.mat | <https://drive.google.com/file/d/1q3BfCRL4KdOpfF-9SmIFSMRFRHtewD2P> |

**Задача 2.1:**

Загрузить файл в средство программирования по выбору. Вычислить функцию эволюции фазы  для приведенных данных. Вычислить значение комплексной амплитуды поля .

**Задача 2.2:**

Преобразовать массивы, в которых хранятся значения мгновенной частоты и комплексной амплитуды, в двумерный массив, одно измерение которого соответствует номеру обхода резонатора, а второе – времени внутри этого обхода. Вывести на графики значения мгновенной частоты и интенсивности поля для обходов #10, #50, #100, #500, #1000.

**Задача 2.3:**

Вывести на двумерные диаграммы эволюцию интенсивности лазерного поля и эволюцию действительной части комплексной амплитуды поля.

**Задача 2.4:**

Используя быстрое преобразование Фурье, вычислить спектральную плотность мощности на каждом обходе. Вычислить значение времени когерентности и ширину оптического спектра на каждом обходе. Вывести на графики полученные зависимости.

Подготовить отчет по лабораторной работе в соответствии с шаблоном.

**Список источников**

1. Vladimirov A. G., Turaev D. Model for passive mode locking in semiconductor lasers // Physical Review A. 2005. Vol. 72. P. 033808.

2. Butler T. Real-time characterisation of dynamic laser fields [Электронный ресурс] // Researchgate. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/308336715\_Real-Time\_Characterisation\_of\_Dynamic\_Laser\_Fields (дата обращения: 19.10.2021).

**Листинг программы для выполнения лабораторной работы (язык Julia):**

using Plots, Random, Roots, FFTW, LaTeXStrings

cd(dirname(@\_\_FILE\_\_));

# parameters

gam0 = 1;

gamg0 = 0.1; # inverse is 1 ns physical

tau0 = 2;

alpha0 = 5;

kap0 = 0.25;

phi0 = 0;

g00rel = -log(kap0);

g00 = g00rel \* 1.0;

tphys = 1 \* 10^(-9) \* gamg0;

# initial parameter vector

p0 = [gam0, gamg0, tau0, alpha0, kap0, phi0, g00];

t0 = 0;

# integration procedure parameters

dt = tau0 / 1000;

hist\_len = floor(Int, tau0 / dt);

endtime = 2000 \* tau0;

num\_iter = floor(Int, endtime / dt);

dim = 3; # problem dimension

savnum = 100; # number of points per delay to save

modstep = floor(Int, hist\_len / savnum);

# noise parameters

beta1 = 0.5 \* 10^-3 / sqrt(dt); # noise in u[1]

beta2 = 0.5 \* 10^-3 / sqrt(dt); # noise in u[2]

## function evaluating the derivatives for the iteration with the noise terms

# u is the dependent variables vector: u[1] is ℜ(E(t)), u[2] is ℑ(E(t)), u[3] is G(t)

# uT is the corresponding delayed dependent variables vector

# p is the parameter vector

# p[1] - gam

# p[2] - gamg

# p[3] - tau

# p[4] - alpha

# p[5] - kap

# p[6] - phi

# p[7] - g0

# nt are the Langevin noise terms vector

function VTmodel(u, uT, p, nt, t, t0)

du1 =

-p[1] \* u[1] -

exp(uT[3] / 2) \*

p[1] \*

sqrt(p[5]) \*

(

-cos(p[6] + 0.5 \* p[4] \* uT[3]) \* uT[1] -

sin(p[6] + 0.5 \* p[4] \* uT[3]) \* uT[2]

) + p[1] \* nt[1]

du2 =

-p[1] \* u[2] -

exp(uT[3] / 2) \*

p[1] \*

sqrt(p[5]) \*

(

sin(p[6] + 0.5 \* p[4] \* uT[3]) \* uT[1] -

cos(p[6] + 0.5 \* p[4] \* uT[3]) \* uT[2]

) + p[1] \* nt[2]

du3 = p[2] \* (p[7] - u[3] - (exp(u[3]) - 1) \* (u[1]^2 + u[2]^2))

return [du1, du2, du3]

end

## Semi-implicit Euler iteration procedure

# rhs should be the function of the form rhs(u,uT,p,nt,t,t0)

# SIEiters alterates qY, qYhead, qYtail and U

function SIEiters(rhs, num\_iter, modstep, T, p, nt, qY1, qY2, qYtail, U)

# dimensions

dim = size(qY1, 1)

# length of the stored history

hist\_len = size(qY1, 2)

# array with the current intermediate values of the function

Y1 = zeros(dim)

Y2 = zeros(dim)

# them delayed

YT1 = zeros(dim)

YT2 = zeros(dim)

# local variable for the tail

lqYtail = qYtail[1]

# initial values of the unknown

Y1 = qY1[:, lqYtail]

# local time variables

t0 = T[1]

tc = T[2]

dt = T[3]

# fixed tau

ft = floor(Int, p[3] / dt)

# RK iterations

for l = 1:num\_iter

# reading the time-delayed value of variables

# the queue is stored in an array qY

# the first index of qY is the number of the integration method subiteration

# the second index is the point number inside the queue

# the tail of the queue corresponds to the (t-dt) variables

di = lqYtail - ft + 1

if di < 1

YT1 = qY1[:, hist\_len+di]

YT2 = qY2[:, hist\_len+di]

else

YT1 = qY1[:, di]

YT2 = qY2[:, di]

end

ntl = nt[l, :]

# some semi-implicit calculations

Y2 = Y1 + dt \* rhs(Y1, YT1, p, ntl, tc, t0)

# storing the time-delayed variables

lqYtail = mod(lqYtail, hist\_len) + 1

qY1[:, lqYtail] = Y1

qY2[:, lqYtail] = Y2

# calculate the actual current-time variable

Y1 = Y1 + dt \* rhs(Y2, YT2, p, ntl, tc + dt, t0)

# integration output

if mod(l, modstep) == 0

U[div(l, modstep), :] = Y1

end

tc = tc + dt

end

T[2] = tc

qYtail[1] = lqYtail

end

## find a steady state as initial condition

# mode number

M = 0;

# function as an rhs for a equation solver

fsol(ws) =

0.5 \* (

-2 \* atan(ws / p0[1]) - 2 \* ws \* p0[3] -

p0[4] \* log((ws^2 + p0[1]^2) / (p0[1]^2 \* p0[5]))

) - p0[6] + 2 \* pi \* M;

gsol(ws) = log((ws^2 + p0[1]^2) / (p0[1]^2 \* p0[5]));

asol(gs) = sqrt(p0[7] - gs) / sqrt(-1 + exp(gs));

om = find\_zero(fsol, 2 \* pi \* M / p0[3]);

gg = gsol(om);

amp = asol(gg);

# our initial history for SIE method subiterations

qY1 = zeros(dim, hist\_len);

qY2 = zeros(dim, hist\_len);

for i = 1:hist\_len

qY1[:, i] = [amp \* cos(om \* dt \* (-i)), amp \* sin(om \* dt \* (-i)), gg]

qY2[:, i] = [amp \* cos(om \* dt \* (1 - i)), amp \* sin(om \* dt \* (1 - i)), gg]

end

display(plot(

qY1[1, :] .^ 2 + qY1[2, :] .^ 2,

ylims = (0, 1.05 \* maximum(qY1[1, :] .^ 2 + qY1[2, :] .^ 2)),

))

## integration

U = zeros(div(num\_iter, modstep), dim)

qYtail = [1];

Random.seed!(1234)

time\_array = [t0, t0, dt]

# noise terms

nt = zeros(num\_iter, 2)

nt[:, 1] = beta1 \* randn(num\_iter)

nt[:, 2] = beta2 \* randn(num\_iter)

SIEiters(VTmodel, num\_iter, modstep, time\_array, p0, nt, qY1, qY2, qYtail, U)

pl\_st\_t = endtime - 200 \* tau0;

pl\_en\_t = endtime;

n = 3000; # number of timepoints for plot

pl\_st\_in = max(1, div(floor(Int, pl\_st\_t / dt), modstep));

pl\_en\_in = div(floor(Int, pl\_en\_t / dt), modstep);

pl\_step = max(1, div(floor(Int, (pl\_en\_in - pl\_st\_in) / n), modstep));

forplot = (

U[pl\_st\_in:pl\_step:pl\_en\_in, 1] .^ 2 + U[pl\_st\_in:pl\_step:pl\_en\_in, 2] .^ 2

);

ts = collect(range(pl\_st\_t, stop = pl\_en\_t, length = length(forplot)));

p1 = plot(

ts,

forplot,

ylims = (0, 1.05 \* maximum(forplot)),

xlabel = "t",

ylabel = "|E|²",

legend = false,

);

# optical spectrum

optfreq =

fftshift(fftfreq(

length(U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 1]),

1 / (dt \* modstep \* tphys),

)) ./ 10^9;

optspec =

10 \*

log10.(abs2.(fftshift(fft(

U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 1] + im \* U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 2],

))));

# rf spectrum

rffreq =

rfftfreq(length(U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 1]), 1 / (dt \* modstep \* tphys)) ./

10^9;

rfspec =

10 \*

log10.(abs2.(rfft(

U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 1] .^ 2 + U[pl\_st\_in:pl\_en\_in, 2] .^ 2,

)));

p2 = plot(

optfreq,

optspec,

xlabel = "Optical Frequency, GHz",

xlims = (-20, 20),

ylabel = "Power density, dB",

legend = false,

)

p3 = plot(

rffreq,

rfspec,

xlabel = "RF Frequency, GHz",

xlims = (0, 20),

ylabel = "Power density, dB",

legend = false,

)

pall = plot(p1, p2, p3, layout = (3, 1), size = (400, 600), dpi = 300)

display(pall)

savefig(pall, "results.png")

GC.gc()

**Шаблон отчета по лабораторной работе №4:**

**1. Содержание титульного листа:**

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

институт перспективных систем передачи данных

Лабораторная работа № 4

по дисциплине «Полупроводниковые лазеры»

«Исследование оптического и радиочастотного спектра полупроводникового лазера»

Выполнил(а) студент(ка) группы XXX

Ф.И.О.

Санкт-Петербург

20\_\_ г.

**2. Содержание отчета:**

**Целью** лабораторной работы является исследование влияния параметров полупроводникового лазера на оптический и радиочастотный спектр излучения, приобретение навыков исследования режимов работы полупроводникового лазера.

**Задание** на лабораторную работу:

**Задание 1**

Используя программный код для численного решения системы уравнений на языке Julia (или реализованный при помощи других средств), построить графики оптического и радиочастотного спектра лазера при заданных параметрах.

Общие параметры: .

Значения параметров:

/\* вставить соответствующие значения из таблицы 1 \*/

**Задача 1.1:**

При фиксированных значениях параметра накачки  и коэффициента уширения линии  построить спектры для разных значений оптической фазы

.

**Задача 1.2:**

При фиксированном значении параметра оптической фазы  и коэффициента уширения линии  построить спектры для разных значений параметра накачки

.

**Задача 1.3:**

При фиксированном значении параметра оптической фазы  и параметра накачки  построить спектры для разных значений коэффициента уширения линии

.

**Задание 2**

Проанализировать экспериментальные данные, полученные методом 3x3 интерферометрии с лазером непрерывного излучения.

**Задача 2.1:**

Загрузить файл в средство программирования по выбору. Вычислить функцию эволюции фазы  для приведенных данных. Вычислить значение комплексной амплитуды поля .

**Задача 2.2:**

Преобразовать массивы, в которых хранятся значения мгновенной частоты и комплексной амплитуды, в двумерный массив, одно измерение которого соответствует номеру обхода резонатора, а второе – времени внутри этого обхода. Вывести на графики значения мгновенной частоты и интенсивности поля для обходов #10, #50, #100, #500, #1000.

**Задача 2.3:**

Вывести на двумерные диаграммы эволюцию интенсивности лазерного поля и эволюцию действительной части комплексной амплитуды поля.

**Задача 2.4:**

Используя быстрое преобразование Фурье, вычислить спектральную плотность мощности на каждом обходе. Вычислить значение времени когерентности и ширину оптического спектра на каждом обходе. Вывести на графики полученные зависимости.

**Ход работы**

/\* Для каждой задачи задания 1 привести полученные оптические и радиочастотные спектры, указав для какого набора параметров они получены. Кратко описать последовательность шагов и действий, которые осуществлялись при выполнении задания 2, какие для этого использовались средства и т.п. \*/

Выводы по работе: /\* сделать выводы о том, как влияют параметры накачки, расстройки и коэффициент уширения линии на оптический и радиочастотный спектры лазера. Написать о том, какие знания и навыки были приобретены в ходе выполнения лабораторной работы \*/

**Контрольные вопросы к защите лабораторной работы № 4:**

1. В рамках каких приближений получена исследуемая в лабораторной работе модель (1–2)?
2. Какие эффекты могут быть исследованы с использованием данной модели?
3. Каков физический смысл оптической фазы , характеризующей расстройку?
4. Каким образом можно осуществить переход от нормированных единиц времени в модели к физическим единицам?
5. Выполните переход к физическим временным единицам на временной диаграмме интенсивности лазерного излучения.
6. Как влияет параметр расстройки  на оптический спектр лазера?
7. Вычислите частоту сдвига , предварительно переведя время обхода резонатора в физическую единицу времени. Сравните полученное значение со значением сдвига частоты оптического спектра при  и  относительно спектра при .
8. Каким образом коэффициент уширения линии  влияет на оптический спектр?
9. Какой физический механизм отвечает за возникновение уширения линии в полупроводниковых лазерах?
10. На основе построенных оптических спектров сделайте вывод, как зависит частота излучения лазера от параметра накачки.
11. Постройте графики оптического и радиочастотного спектра для  и . Чем можно объяснить получившуюся картину?
12. Каким образом можно вычислить интенсивность оптического спектра на основе значений действительной и мнимой частей комплексной амплитуды электрического поля как функции времени?
13. Каким образом можно вычислить радиочастотный спектр лазерного излучения?
14. Выведите графики оптического и радиочастотного спектра в линейном масштабе по шкале интенсивности.
15. Чему равен шаг между соседними значениями частотных компонент при вычислении оптического спектра на основе дискретного преобразования Фурье?
16. Чему равна максимальная частота при вычислении оптического спектра на основе дискретного преобразования Фурье?
17. Каково назначение операции fftshift при вычислении оптического спектра на основе дискретного преобразования Фурье при помощи таких языков как Julia, Python, MATLAB?
18. Как вы думаете, почему для первых обходов резонатора получается такое большое время когерентности?
19. Каким образом можно определить время когерентности с использованием данных об оптическом спектре?
20. В чем состоит суть метода 3x3 интерферометрии?
21. Как можно вычислить спектральную плотность мощности лазерного излучения?
22. Постройте график эволюции радиочастотного спектра с ростом числа обходов.
23. Постройте график эволюции оптического спектра с ростом числа обходов.
24. Каким другим способом можно определить время когерентности? Чем для этого можно воспользоваться?

**Список источников для подготовки**

1. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. – М.: Наука: ФИЗМАТЛИТ, 1999.

2. Ohtsubo J. Semiconductor Lasers. Stability, Instability and Chaos. – Cham: Springer International Publishing, 2017.

3. Smith J. O. Mathematics of the discrete Fourier transform (DFT) with audio applications second edition [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/st/> (дата обращения: 24.11.2019)

4. Public Interface // API. AbstractFFTs.jl [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://juliamath.github.io/AbstractFFTs.jl/stable/api/> (дата обращения: 24.11.2019)

5. Shift zero-frequency component to center of spectrum // MathWorks [Электронный ресурс]. 2019. URL: [https://www.mathworks.com/help/matlab/  
ref/fftshift.html](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fftshift.html) (дата обращения: 24.11.2019)

6. numpy.fft.fftshift // NumPy v. 1.16 Manual [Электронный ресурс]. 2019. URL: [https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.fft.  
fftshift.html](https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.fft.fftshift.html) (дата обращения: 24.11.2019)

7. Butler T. Real-time characterisation of dynamic laser fields [Электронный ресурс] // Researchgate. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/308336715\_Real-Time\_Characterisation\_of\_Dynamic\_Laser\_Fields (дата обращения: 19.10.2021).