

Инжекционные полупроводниковые лазеры

Шмаков Владимир Евгеньевич - ФФКЭ гр. Б04-103

25 марта 2025 г.

Цель работы

- Снять выходные характеристики светодиода и полупроводникового лазера
- Снять спектры излучения светодиодов
- Найти пороговую мощность генерации ПИЛ
- Проанализировать экспериментально полученные спектры

Теоретические сведения

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР состоит из активной области, расположенной между двумя полупроводниковыми слоями с разными типами проводимости, где за счет электрического тока происходит инжекция носителей и их рекомбинация, которая сопровождается излучением света. Роль резонатора в ПИЛ выполняют скошенные грани кристалла.

Необходимым условием генерации является превышение коэффициента усиления над потерями в резонаторе. Пороговый ток накачки, необходимый для генерации ПИЛ задаётся формулой 1.

$$j_{\text{порог}} = j_0 + \frac{\alpha}{\beta} + \frac{1}{2\beta L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (1)$$

- j_0 - плотность тока инверсии
- α - коэффициент поглощения
- L - расстояние между скошенными гранями кристалла
- β - коэффициент усиления по току
- R_1, R_2 - коэффициенты отражения граней

Методика

Оборудование

- Фотоприёмник
- Монохроматор

- Блок питания
- Амперметры и вольтметры
- ПИЛ и набор светодиодов

Экспериментальная установка

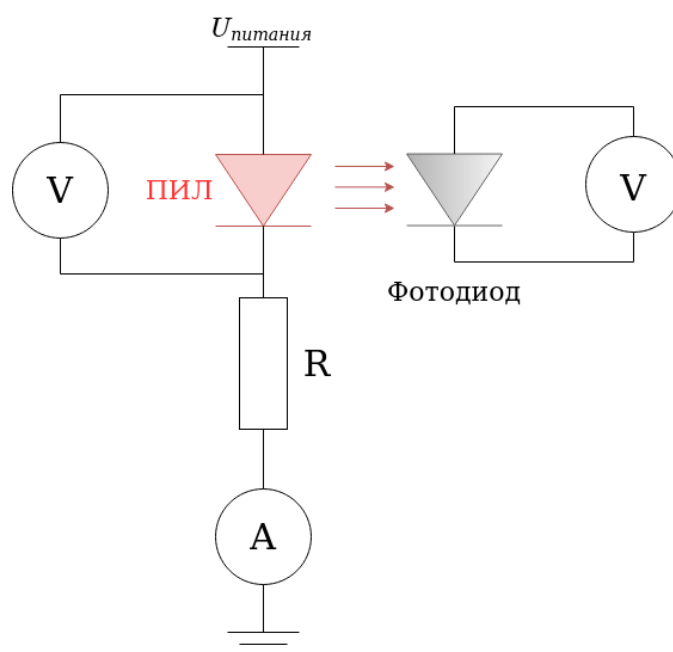


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 1. Регулируя напряжение питания $U_{\text{питания}}$ изменяем силу тока накачки. Напряжение на исследуемом ПИЛ фиксируется при помощи вольтметра. Сила тока, текущая через ПИЛ фиксируется при помощи амперметра. Для регистрации интенсивности излучения ПИЛ используется фотодиод, напряжение на котором пропорционально интенсивности падающего света.

Для регистрации спектра исследуемого образца в оптическую схему добавляется монохроматор. Вращая ручку монохроматора регистрируем интенсивности на различных длинах волн.

Обработка экспериментальных данных

Выходные характеристики светодиода

Выходная характеристика красного светодиода изображена на рисунке 2. Как видно, с ростом мощности накачки растёт интенсивность излучения светодиода. При низких токах накачки число носителей заряда, попадающих в активную область, пропорционально силе тока – интенсивность линейно зависит от мощности накачки. При высоких токах активная область перенасыщается носителями и повышение мощности накачки практически не приводит к увеличению интенсивности.

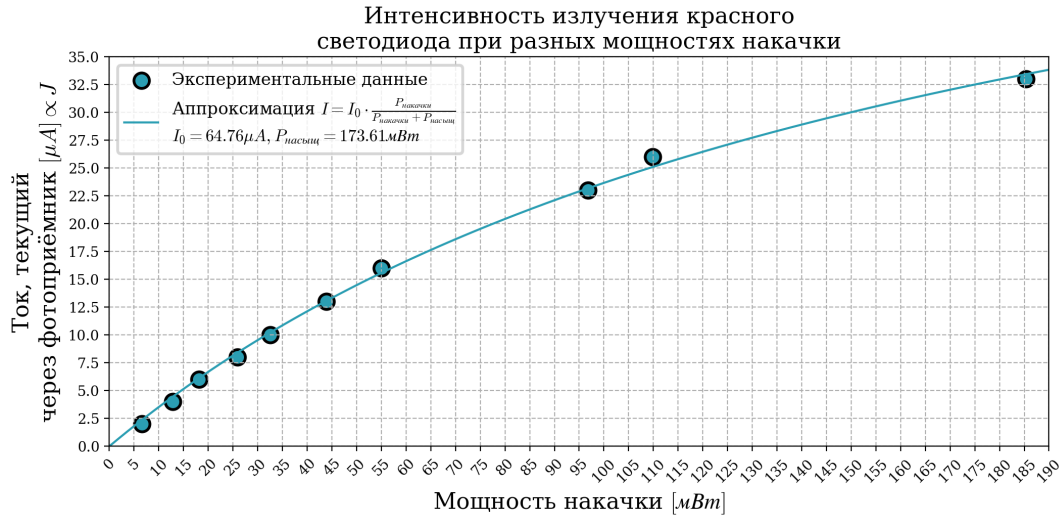


Рис. 2: Выходная характеристика красного светодиода

Аппроксимируем экспериментальные данные по формуле 2, и найдём мощность при которой светодиод входит в насыщение.

$$I = I_0 \frac{P_{\text{накачки}}}{P_{\text{накачки}} + P_{\text{насыщения}}} \quad (2)$$

Результат аппроксимации изображен на рисунке 2. «Мощность насыщения» оказалась равной $P_{\text{насыщения}} \sim 175 \text{ мВт}$.

Выходные характеристики полупроводникового лазера

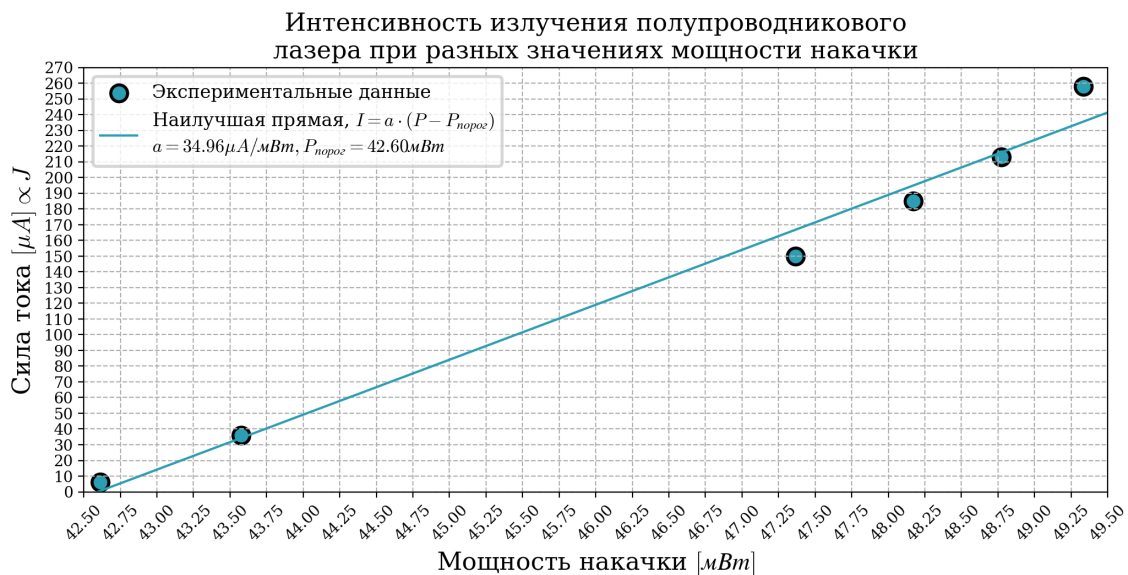


Рис. 3: Выходная характеристика полупроводникового лазера

В отличие от светодиода, полупроводниковый лазер начинает излучать только в том случае, когда мощность накачки превышает некоторую пороговую величину. На рисунке 3 изображена линейная часть выходной характеристики полупроводникового инжекционного лазера.

Найдём пороговую мощность накачки, для этого аппроксимируем экспериментальные данные по формуле 3.

$$I = \alpha(P - P_{\text{порог}}) \quad (3)$$

В результате аппроксимации получили что пересечение наилучшей прямой с осью x равно $P_{\text{порог}} \sim 40\text{мВт}$.

Спектральные характеристики излучения синего светодиода

Экспериментально полученные спектры излучения различных светодиодов могут быть найдены в таблицах(4 - 6).

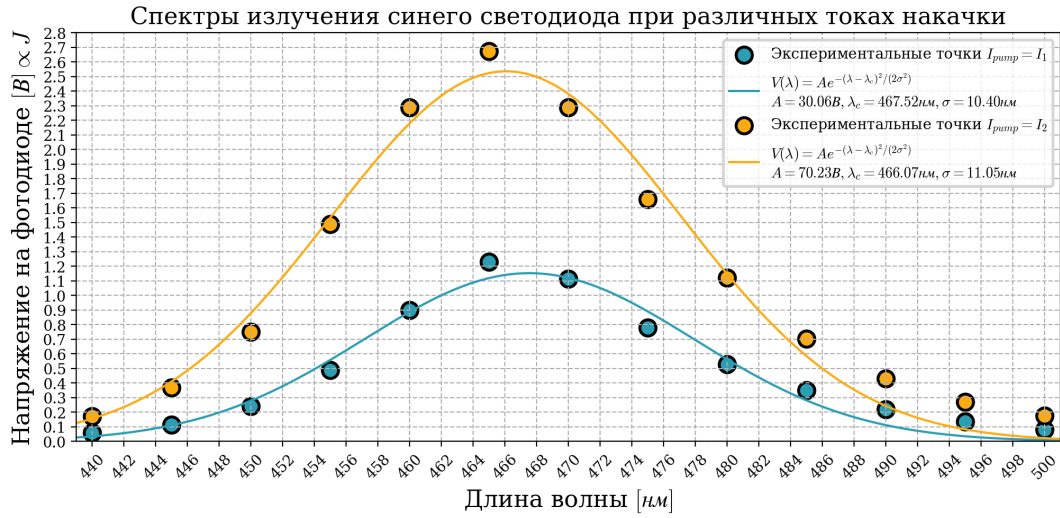


Рис. 4: Спектры излучения синего светодиода при различных токах накачки. Аппроксимация экспериментальных спектров кривой Гаусса.

Экспериментальные кривые могут быть приближены Гауссианом. Результат аппроксимации экспериментальных данных Гауссианом изображен на рисунке 4. Среднеквадратичная ошибка аппроксимации экспериментальных данных Гауссианом оказалась равной $MSE_{gauss} \sim 0.05$.

Для повышения точности следует использовать более сложную математическую модель. Известно два механизма уширения спектральных линий:

- Гауссово уширение (доплеровское уширение) – вызвано движением частиц относительно наблюдателя (эффект Доплера).
- Лоренцовское уширение (естественное уширение) – обусловлено квантовыми эффектами (конечное время жизни возбужденных состояний).

Дабы учесть оба механизма уширения спектра, удобно использовать контур Фойгта – свертку контура Лоренца и Гаусса(смотрите формулу 4).

$$V(\lambda) = A \int_{-\infty}^{\infty} G(\lambda'; \sigma, \lambda_c) L(\lambda - \lambda'; \gamma, \lambda_c) d\lambda' \quad (4)$$

- A - нормировочный параметр

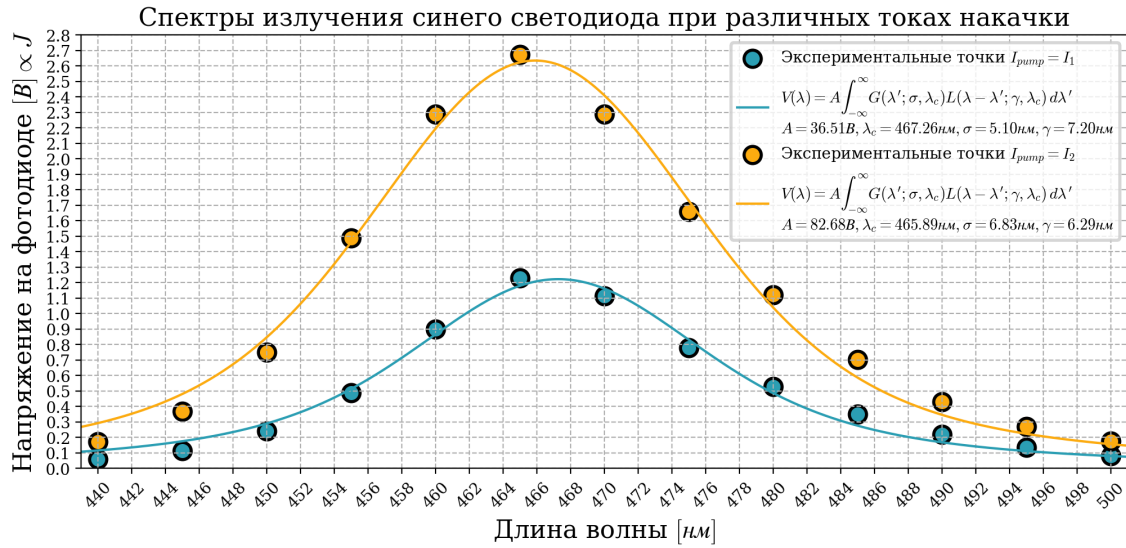


Рис. 5: Спектры излучения синего светодиода при различных токах накачки. Аппроксимация экспериментальных спектров кривой Фойгта.

- $G(\lambda, \sigma, \lambda_c)$ - функция распределения Гаусса с математическим ожиданием λ_c и дисперсией σ .
- $L(\lambda, \gamma, \lambda_c)$ - функция распределения Коши(контур Лоренца) с максимум λ_c и шириной γ

Результаты приближения спектра контуром Фойгта изображены на рисунке 5. Средне-квадратичная ошибка приближения $MSE_{voigt} \sim 0.02$. Таким образом точность аппроксимации экспериментальных данных контуром Фойгта в два раза выше точности полученной при использовании контура Гаусса. Параметры оптимального контура γ и σ оказались равными по порядку – то есть оба механизма уширения оказывают примерно одинаковое влияние на наблюдаемый спектр.

Спектральные характеристики излучения красного светодиода

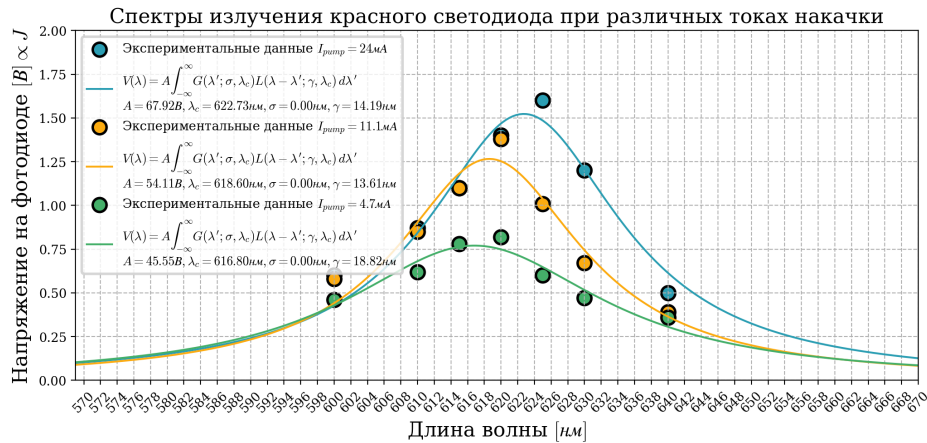


Рис. 6: Спектры излучения красного светодиода при различных токах накачки

Аппроксимируем спектры излучения красного диода по формуле 4. Значение γ сильно превышает значение σ . Однако точность аппроксимации оказалась достаточно низкой, поэтому никаких выводов о природе уширения линии излучения красного светодиода сделать нельзя.

Спектральные характеристики излучения зеленого светодиода

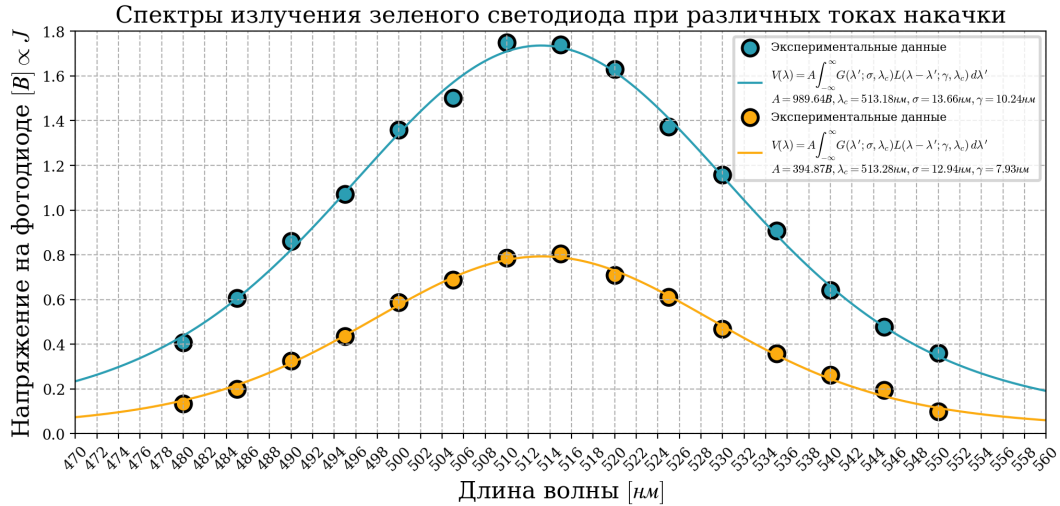


Рис. 7: Спектры излучения зеленого светодиода при различных токах накачки

Результат аппроксимации экспериментально полученных спектров излучения зеленого светодиода изображен на рисунке 7. Оптимальные γ и σ вновь оказались равны по порядку, оба механизма уширения оказывают одинаковое влияние на спектры.

В таблице 1 представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных.

Образец	λ_c [нм]	γ [нм]	σ [нм]
Синий светодиод, маленький ток накачки	467	7.2	5.1
Синий светодиод, большой ток накачки	466	6.2	6.8
Красный светодиод, $J_{\text{накачки}} = 24 \text{ мА}$	623	14.2	0
Красный светодиод, $J_{\text{накачки}} = 11.1 \text{ мА}$	620	13.6	0
Красный светодиод, $J_{\text{накачки}} = 4.7 \text{ мА}$	616	18.8	0
Зеленый светодиод, большой ток накачки	513.2	10.2	13.7
Зеленый светодиод, маленький ток накачки	513.2	7.9	13

Таблица 1: Результаты аппроксимации экспериментально полученных спектров.

Вывод

- Удалось снять выходную характеристику красного светодиода. Аппроксимируя экспериментальные данные формулой 2 удалось оценить мощность накачки при которой светодиод входит в насыщение. Она оказалась равной $P_{\text{насыщения}} \sim 175 \text{ мВт}$.
- Удалось найти пороговую мощность генерации полупроводникового лазера. $P_{\text{пороговая}} \sim 40 \text{ мВт}$.

- Уширение линии излучения светодиода связано как с Доплеровским механизмом так и с Лоренцевским. Максимальная точность аппроксимации экспериментальных данных достигается при учете обоих механизмов.
- Увеличение мощности накачки приводит к уширению спектра, а также к небольшому увеличению длины волны генерации. Большая мощность накачки влечет рост средней скорости носителей, спектр становится шире за счет Доплеровского механизма.
- Точность аппроксимации спектра красного светодиода значительно ниже точности аппроксимации прочих данных. Низкая точность может быть связана с малым количеством точек.
- Для повышения точности эксперимента следует учитывать спектральные характеристики используемого фотоприёмника.

P.S.

В ходе своего обучения в бакалавриате мне довелось написать множество отчетов. Этот отчет — последний. Мне всегда приносили удовольствие лабораторные работы: процесс сбора данных, их последующая обработка. Огромная благодарность всем преподавателям, которые вели у меня лабораторный практикум — с вами было интересно и увлекательно!

Приложение

Исходные данные и код для их обработки может быть найден в репозитории <https://github.com/ShmakovVladimir/Labs>.

U _{pump} , V	I _{pump} , mA	I _{ph} , μA
3.69	1.79	2
4.02	3.19	4
4.28	4.24	8
4.51	5.75	8
4.68	6.96	12
4.87	9.13	18
5.09	10.8	20
5.46	17.9	23
5.52	19.9	26
5.83	31.8	33

Таблица 2: Выходная характеристика красного светодиода

U _{pump} , V	I _{pump} , mA	P _{pump} , mW	I _{ph} , μ A
2.73	17.35	47.3655	150
2.74	17.58	48.1692	185
2.74	17.8	48.772	213
2.75	17.94	49.335	258
2.71	16.08	43.5768	36
2.68	15.9	42.612	6

Таблица 3: Выходная характеристика ПИЛ

λ , нм	U , В	U , В
440	0.59	1.74
445	1.15	3.68
450	2.40	7.50
455	4.90	14.9
460	9.00	22.9
465	13.20	26.75
470	11.15	22.9
475	7.80	16.6
480	5.30	11.2
485	3.50	7.05
490	2.20	4.32
495	1.35	2.70
500	0.83	1.77

Таблица 4: Спектры синего светодиода при различных токах накачки

λ , нм	U , В	U , В
480	4.07	1.35
485	6.06	2.00
490	8.62	3.25
495	10.71	4.36
500	13.0	5.87
505	15.02	6.89
510	17.50	7.87
515	17.40	8.05
520	16.30	7.10
525	13.74	6.10
530	11.57	4.68
535	9.07	3.58
540	6.42	2.62
545	4.78	1.95
550	3.61	1.00

Таблица 5: Спектры зелёного светодиода при различных токах накачки

λ , нм	U , В (24mA)	U , В (11.1mA)	U , В (4.7mA)
570	0.36	0.35	0.35
590	0.46	0.44	0.39
600	0.60	0.58	0.46
610	0.87	0.85	0.62
615	1.1	1.1	0.78
620	1.4	1.38	0.82
625	1.6	1.1	0.87
630	1.2	0.67	0.47
650	0.38	0.35	0.36
640	0.50	0.39	0.36

Таблица 6: Спектры красного светодиода при различных токах накачки