

Пространственные характеристики излучения полупроводникового инжекционного лазера

Шмаков Владимир Евгеньевич - ФФКЭ гр. Б04-103

6 марта 2025 г.

Цель работы

- Исследование диаграмм направленности полупроводникового лазера.
- Нахождение геометрических размеров активного слоя лазера.
- Исследование диаграмм направленности светодиода.

Теоретические сведения

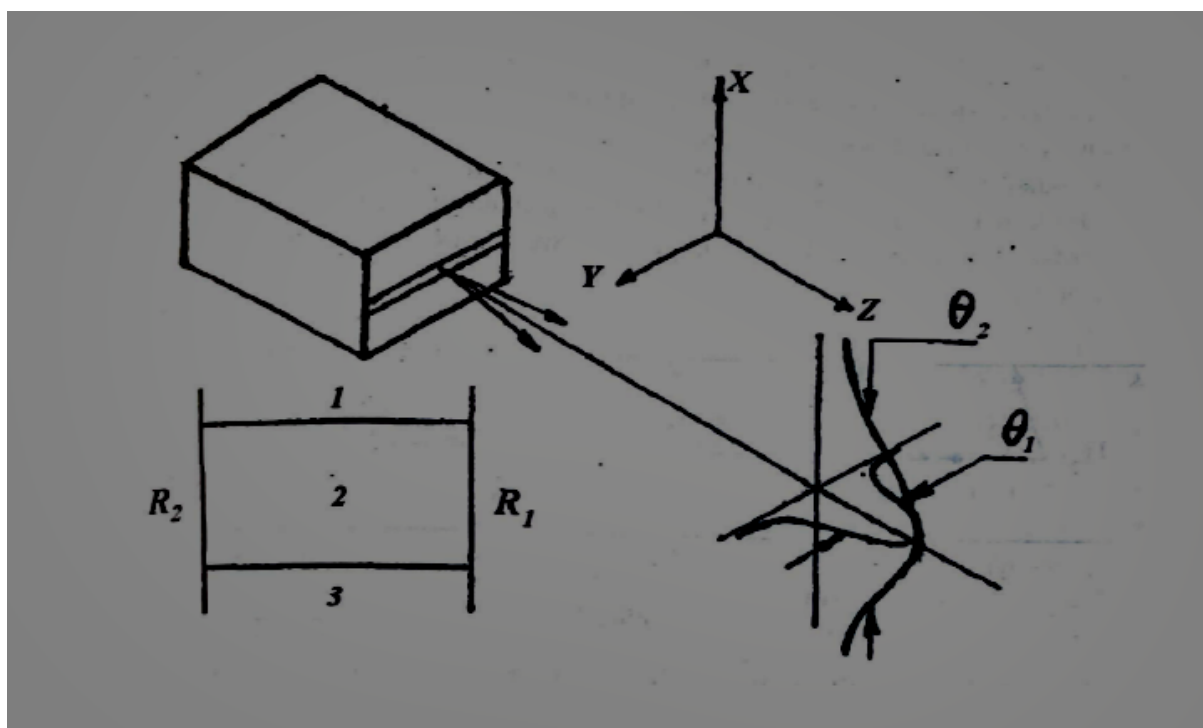


Рис. 1: Пространственные характеристики излучения полупроводникового инжекционного лазера

На рисунке 1 представлена схема полупроводникового инжекционного лазера. Полупроводниковый инжекционный лазер состоит из p - n перехода, активной области и резонатора.

При подаче прямого напряжения электроны из n -области и дырки из p -области инжектируются в активную область, где происходит их рекомбинация с испусканием фотонов. В качестве резонатора обычно используются сколотые грани кристалла.

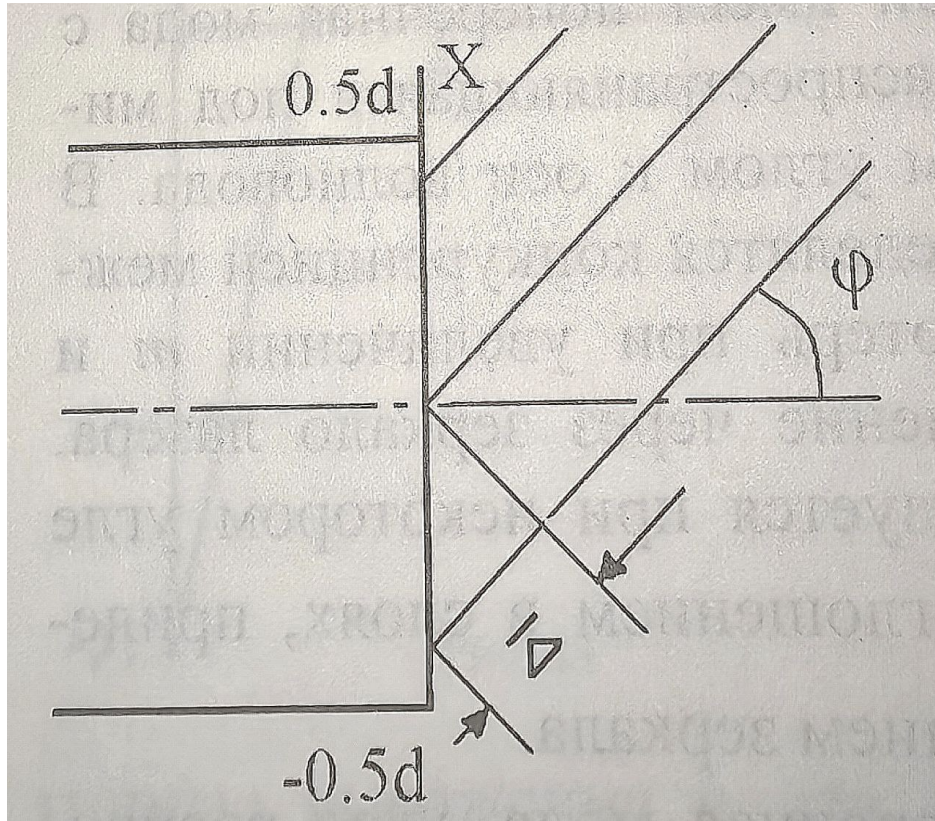


Рис. 2: Излучение, выходящие из активного слоя под углом ϕ .

Диаграмма направленности излучения полупроводникового лазера возникает из-за дифракции света, покидающего активную область (рисунок 2).

В направлении, перпендикулярном p - n переходу (высота активной области мала), излучение сильно расходится. В направлении, параллельном p - n переходу (ширина активной области больше), расходимость излучения меньше. В результате диаграмма направленности лазера имеет эллиптическую форму: пучок узкий в одной плоскости и широкий в другой (смотрите рисунок 1).

Найдём сумму волн, исходящих из активного слоя в направлении ϕ (формула 1).

$$S = \int_{-d/2}^{d/2} E(x) e^{ikx \sin(\phi)} dx \quad (1)$$

Распределение напряжённости поля в волноводе описывается функциями вида $E(x) \sim \sin(qx)$ или $E(x) \sim \cos(qx)$, в зависимости от типа моды электромагнитного поля. Подставим $E(x)$ в выражение 1 и проинтегрируем (формулы 2 и 3).

$$S(\varphi) \sim \frac{\cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\lambda(m+1)}{2d}\right)^2 - \sin^2 \varphi} - \text{четные моды} \quad (2)$$

$$S(\varphi) \sim \frac{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\lambda(m+1)}{2d}\right)^2 - \sin^2 \varphi} - \text{нечетные моды} \quad (3)$$

Возведя выражения 3 и 2 в квадрат получаем энергетическую диаграмму направленности излучения. Анализируя выражение 2 можно получить связь между шириной активного слоя и угловой шириной диаграммы направленности на уровне 0.6 при $m = 0$:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\phi_{0.6})} \quad (4)$$

Методика

Оборудование

- Полупроводниковый инжекционный лазер
- Фотоприёмник
- Генератор импульсов
- Светодиод
- Узкополосный усилитель
- Блок питания
- Вращательный привод
- Транспорт

Экспериментальная установка

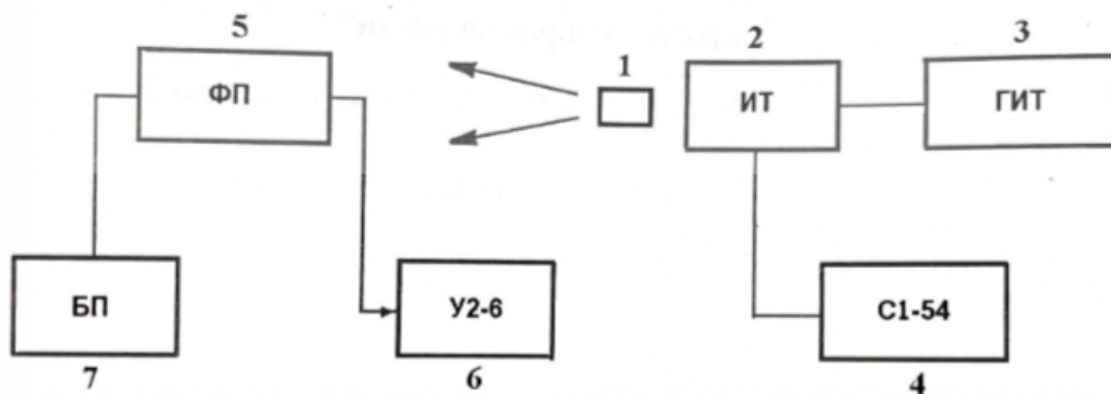


Рис. 3: Блок - схема экспериментальной установки

Блок - схема экспериментальной установки изображена на рисунке 3. Излучение исследуемого лазера(1) фиксируется при помощи фотоприёмника(5). Лазер установлен на вращающемся приводе. Угол поворота лазера фиксируется при помощи транспорта.

Для «отсечения» внешней засветки используется следующая методика:

- Накачка лазера осуществляется меандром некоторой частоты ω . Для получения меандра используется генератор импульсов(3).

- Сигнал фотоприёмника проходит через узкополосный фильтр(6), центральная частота которого совпадает с частотой меандра w .

Обработка экспериментальных данных

Диаграмма направленности излучения лазера при токе накачки 65мкА

При токе накачки $J_p = 65\text{мкА}$ сняли диаграммы направленности излучения лазера в двух плоскостях - параллельной активному слою (ZY) и перпендикулярной активному слою(XZ). Экспериментальные данные могут быть найдены в приложении(таблицы 2 и 1). Полученные в ходе эксперимента кривые изображены на рисунках 4 и 5.

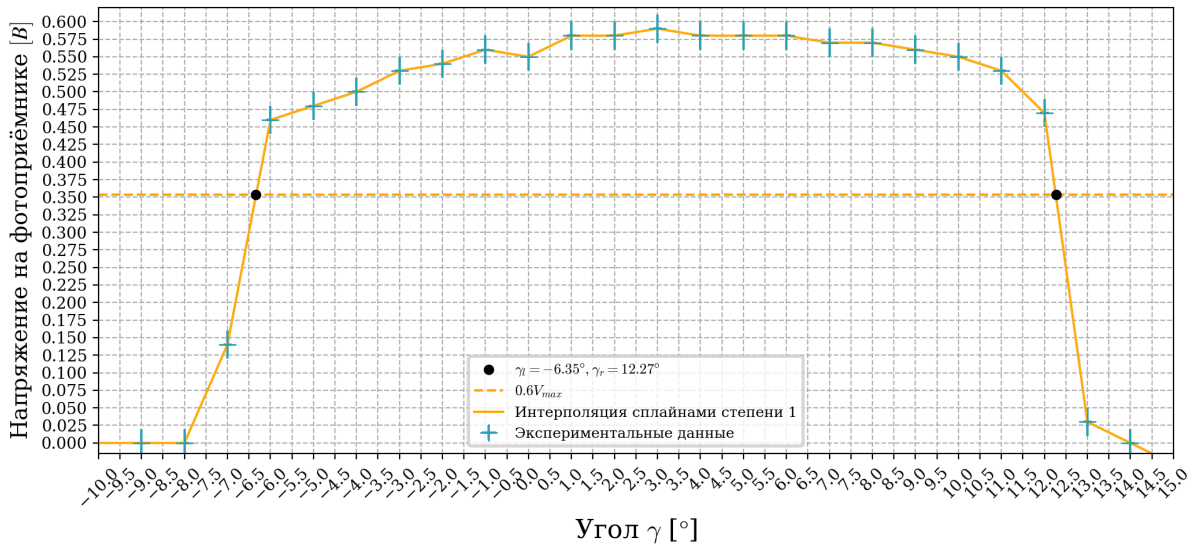


Рис. 4: Диаграмма направленности излучения лазера в плоскости ZY . Ток накачки $J_p = 65\text{мкА}$.

Для нахождения ширины кривой, интерполируем её сплайнами степени 1. Пусть $f(\gamma)$ построенный интерполянт. Задача нахождения ширины экспериментальной кривой свелась к поиску корней уравнения $f(\gamma) = 0.6 \max_{\gamma} f(\gamma)$. Корни уравнения γ_l и γ_r изображены на легендах графиков(рисунки 4, 5).

Ширина кривой позволяет оценить размеры активного слоя лазера(формула 4). Ширина активного слоя(размер вдоль оси Y):

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\gamma_r - \gamma_l)} = \frac{635\text{нм}}{2 \sin(18.62^\circ)} \sim 1\text{мкм}$$

Высота активного слоя(размер вдоль оси X):

$$h = \frac{\lambda}{2 \sin(\gamma_r - \gamma_l)} = \frac{635\text{нм}}{2 \sin(5.7^\circ)} \sim 3.2\text{мкм}$$

Длина волны лазера λ была принята равной 635нм, поскольку это характерная длина волны излучения материала активной среды $InGaP$, часто используемого при изготовлении светодиодов и лазерных указок.

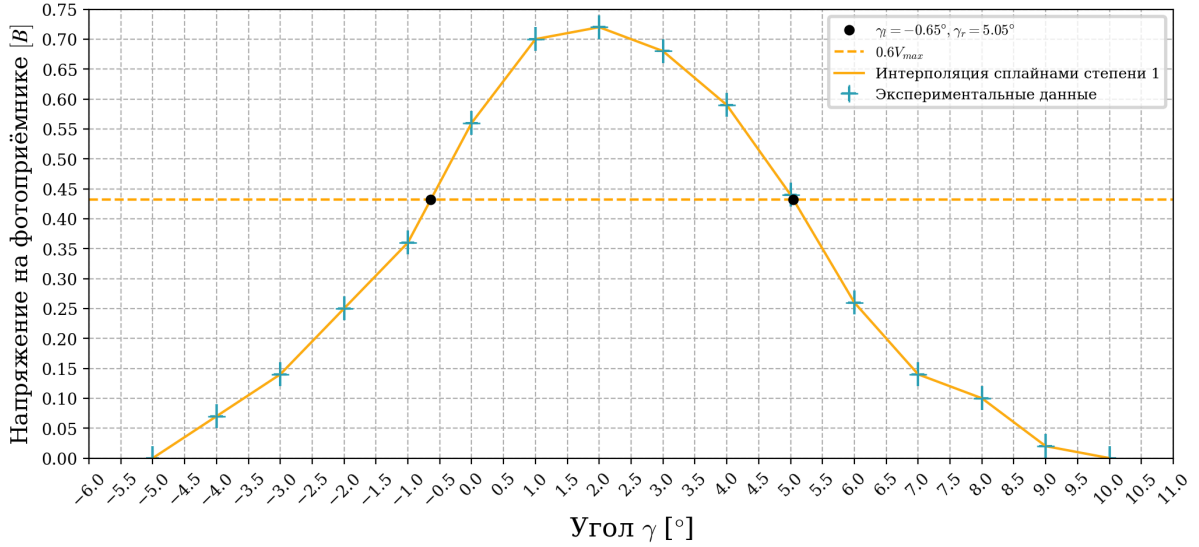


Рис. 5: Диаграмма направленности излучения лазера в плоскости XZ . Ток накачки $J_p = 65\text{мкА}$.

Диаграмма направленности излучения лазера при токе накачки 51мкА

При токе накачки $J_p = 51\text{мкА}$ была получена диаграмма направленности излучения лазера в плоскости ZY . Экспериментальные данные могут быть найдены в приложении (таблица 3). Экспериментально полученная кривая изображена на рисунке 6.

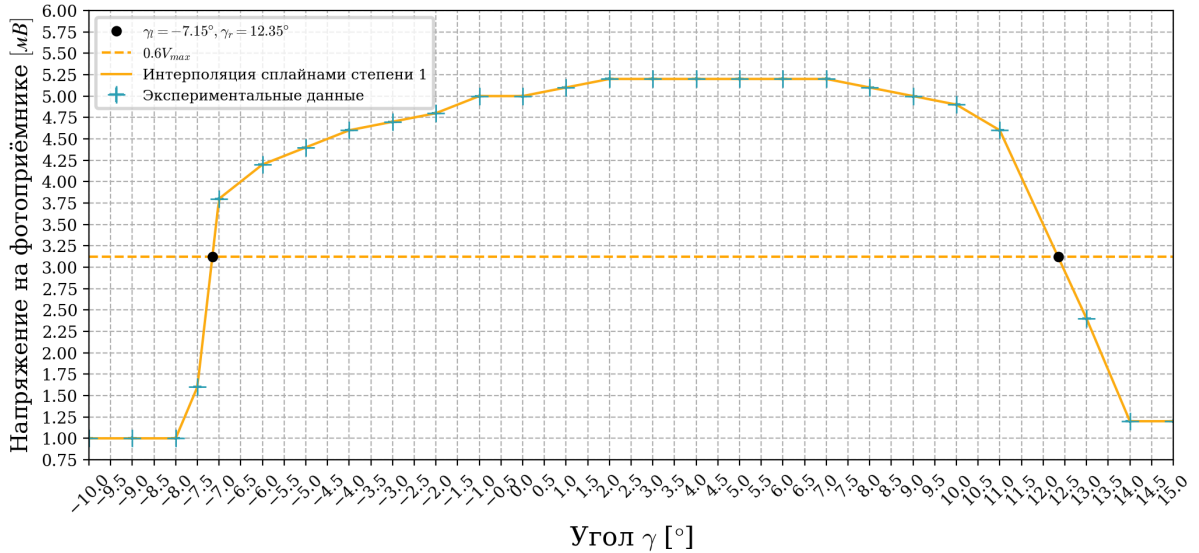


Рис. 6: Диаграмма направленности излучения лазера в плоскости ZY . Ток накачки $J_p = 51\text{мкА}$.

Пользуясь описанной в предыдущем пункте методикой, оценим ширину активного слоя лазера.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\gamma_r - \gamma_l)} = \frac{635\text{нм}}{2 \sin(19.5^\circ)} \sim 0.95\text{мкм}$$

Как видим, ширина полученная в данном пункте практически совпадает с шириной, полученной в предыдущем пункте. Разность между значениями менее 5%.

Диаграмма направленности излучения светодиода

Была получена диаграмма направленности излучения светодиода (рисунках 7). Экспериментальные данные могут быть найдены в приложении (таблица 4).

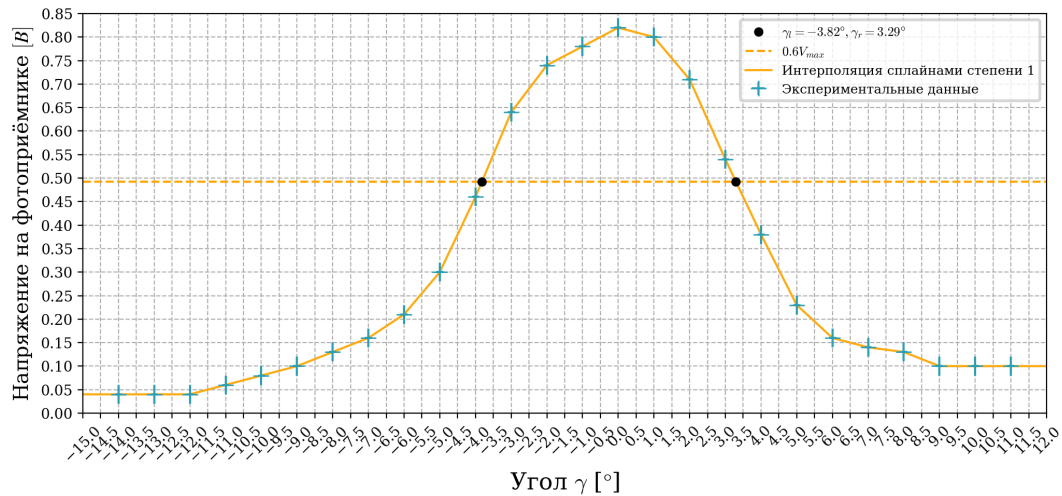


Рис. 7: Диаграмма направленности излучения светодиода

Экспериментальная методика не обеспечивает точного определения геометрических размеров активной области диода. Помимо $p-n$ перехода, светодиод включает рассеивающую «шляпку» и отражатель, которые изменяют пространственное распределение излучения и искажают его диаграмму направленности.

На рисунке 7 показано, что ширина угловой характеристики излучения составляет примерно 7° . Это позволяет оценить ширину излучающей области $p-n$ перехода, которая составляет порядка нескольких микрон.

Модельная диаграмма направленности

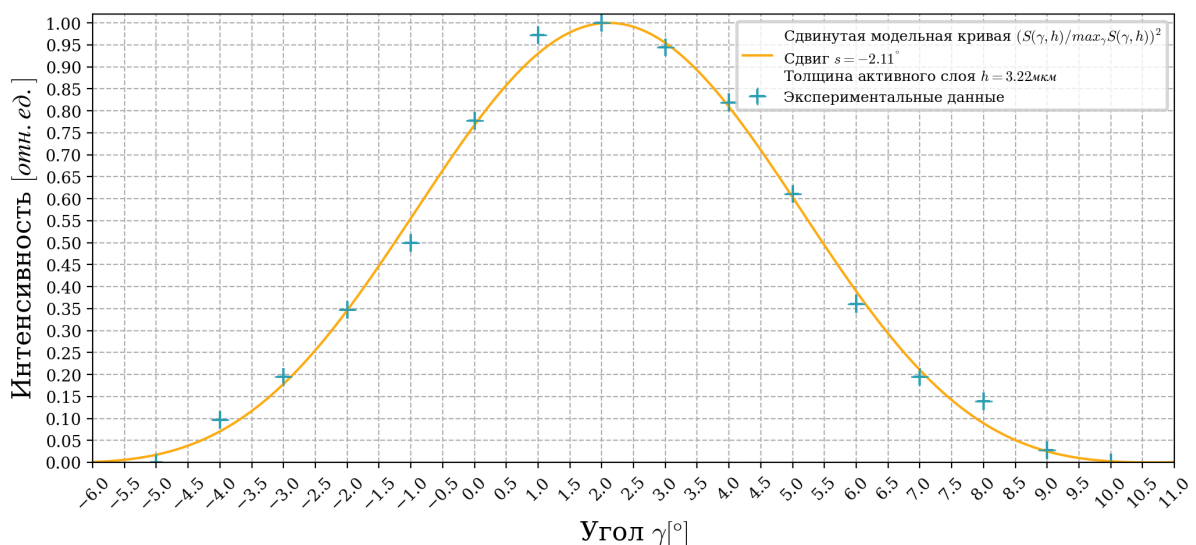


Рис. 8: Приближение экспериментальных данных (таблица 1) модельной кривой.

Теоретически, угловое распределение интенсивности есть $S^2(\phi)$. Где S задано формулой 2. Приближим диаграмму направленности, представленной на рисунке 5 модельной кривой. Для этого:

- Нормируем полученные в ходе эксперимента значения напряжения V_i : $J_i = V_i / (\max_i V_i)$. i - номер измерения.
- Определим функцию потерь L , как $L = \sum_i (S^2(\gamma_i, d) / (\max_i S^2(\gamma_i, d)) - J_i)^2$
- Методом Нелдера - Мида определим оптимальный параметр d и оптимальный сдвиг кривой s , при которых функция L достигает минимума.

Результаты оптимизации изображены на рисунке 8. Толщина активного слоя, минимизирующая функцию L , оказалась равной 3.2 мкм. Таким образом, толщина полученная в ходе оптимизации параметров модельной функции совпала с толщиной, рассчитанной по формуле 4.

Вывод

- Удалось оценить геометрические размеры активной области инжекционного полупроводникового лазера.
- Удалось найти порядок размера активной области полупроводникового светодиода.
- Диаграмма направленности излучения в плоскости XZ (перпендикулярной активному слою) с высокой точностью приближается модельной кривой.
- Диаграммы в плоскости ZY (параллельной активному слою) не могут быть приближены модельной кривой. Это связано с тем, что ширина активного слоя близка к длине волны, однако используемая математическая модель не учитывает дифракцию выходного пучка.

Приложение

Угол[°]	Напряжение[V]	Угол[°]	Напряжение[V]
0	0.56	-1	0.36
1	0.7	-2	0.25
2	0.72	-3	0.14
3	0.68	-4	0.07
4	0.59	-5	0
5	0.44	6	0.26
7	0.14	8	0.1
9	0.02	10	0

Таблица 1: Излучение лазера в плоскости XZ . Ток накачки $J_p = 65 \text{ мкА}$.

Угол[°]	Напряжение[V]	Угол[°]	Напряжение[V]
0	0.55	-1	0.56
1	0.58	-2	0.54
2	0.58	-3	0.53
3	0.59	-4	0.50
4	0.58	-5	0.48
5	0.58	-6	0.46
6	0.58	-7	0.14
7	0.57	-8	0
8	0.57	-9	0
9	0.56	10	0.55
11	0.53	12	0.47
13	0.03	14	0

Таблица 2: Излучение лазера в плоскости ZY . Ток накачки $J_p = 65\text{мкА}$.

Угол[°]	Напряжение[mВ]	Угол[°]	Напряжение[mВ]
0	5.0	-1	5.0
1	5.1	-2	4.8
2	5.2	-3	4.7
3	5.2	-4	4.6
4	5.2	-5	4.4
5	5.2	-6	4.2
6	5.2	-7	3.8
7	5.2	-7.5	1.6
8	5.1	-8	1.0
9	5.0	-9	1.0
10	4.9	-10	1.0

Таблица 3: Излучение лазера в плоскости ZY . Ток накачки $J_p = 51\text{мкА}$.

Угол[°]	Напряжение[V]	Угол[°]	Напряжение[V]
0	0.82	-1	0.78
1	0.80	-2	0.74
2	0.71	-3	0.64
3	0.54	-4	0.46
4	0.38	-5	0.30
5	0.23	-6	0.21
6	0.16	-7	0.16
7	0.14	-8	0.13
8	0.13	-9	0.10
9	0.10	-10	0.08
10	0.10	-11	0.06
11	0.10	-12	0.04
12	0.04	-13	0.04
13	0.04	-14	0.04

Таблица 4: Диаграмма направленности излучения светодиода, сила тока $J = 70\text{мкА}$.