

УДК 60

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЕК ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs

© В. М. Гармаш, К. А. Воронова¹*Статья поступила 14 октября 2014 г.*

В качестве компактных мощных источников излучения для накачки твердотельных лазеров широко используются линейки лазерных диодов на основе GaAs (ЛЛД), излучающие на длине волны 940 нм. Разработан метод исследования распределения интенсивности излучения между отдельными диодами ЛЛД, позволяющий проследить, каким образом каждый отдельный диод линейки влияет на суммарную интенсивность светового пучка ЛЛД. Существует специальное программное обеспечение CMOS-1300, которое по полученным с помощью цифровой камеры снимкам ближнего поля дает возможность строить количественные картины распределения интенсивности излучения ЛЛД — интегральные профили интенсивности. Интегральный профиль интенсивности излучения иллюстрирует относительное распределение интенсивности излучения по отдельным диодам. Данный способ излучения линеек лазерных диодов является информативным методом исследования коллективного поведения лазерных диодов в линейке.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов; полупроводниковый лазер; лазерное излучение; лазерный диод; интенсивность излучения; интегральный профиль интенсивности; исследование интенсивности; ближнее поле.

В качестве компактных мощных источников излучения для накачки твердотельных лазеров широко используются линейки лазерных диодов на основе GaAs (ЛЛД), излучающие на длине волны 940 нм [1–3]. В настоящее время ведется работа по усовершенствованию полупроводниковых лазеров с целью увеличения мощности и эффективности данных приборов. Все существующие методы измерения мощности светового импульса ЛЛД, работающих в импульсном режиме, дают интегральную величину мощности ЛЛД [4]. Это крайне затрудняет выделение отдельных диодов и определение их вклада в общую картину.

Цель данной работы — разработка метода исследования распределения интенсивности излучения между отдельными диодами ЛЛД. Данный способ позволит проследить, каким образом каждый отдельный диод линейки влияет на суммарную интенсивность светового пучка ЛЛД.

Лазерные диоды одной линейки имеют разные пороги лазерной генерации, т.е. при одном значении тока накачки диоды излучают с различной интенсивностью. Это приводит к тому, что отдельные диоды линейки, которые излучают с большей интенсивностью, чем остальные, локально перегреваются и быстро выходят из строя (выгорают). В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по наблюдению ближнего поля ЛЛД. Существует специальное программное обеспечение CMOS-1300, которое позволяет по полученным с помощью цифро-

вой камеры снимкам ближнего поля строить количественные картины распределения интенсивности излучения ЛЛД — интегральные профили интенсивности. Они позволяют определить оптимальные токи накачки, при которых все диоды ЛЛД излучают с приблизительно одинаковой интенсивностью. Выбор оптимальных режимов накачки ЛЛД сможет продлить их сроки службы и при этом получить высокие значения мощности световых импульсов.

Режимы работы линейки лазерных диодов. При разработке метода были выбраны две линейки лазерных диодов из пятидесяти аналогичных, которые имели одинаковые конструкции и длину волны излучения. ЛЛД включали в себя по 75 лазерных диодов, излучавших на длине волны 940 нм, длина излучающей стороны ЛЛД составляла 1 см. Линейки лазерных диодов были разделены на участки по 15 лазерных диодов с глубоким слоем диэлектрика. Разделение излучающей структуры глубокими канавками, заполненными слоем диэлектрика, на группы по 15 диодов обусловлено тем, что при достаточно большой длине (1 см) излучающей стороны ЛЛД за счет выделения тепла в ней возникают механические напряжения из-за разницы коэффициентов термического расширения структуры ЛЛД и пластины из сплава медь — вольфрам, к которой она припаяна. Разделение ЛЛД для уменьшения механических напряжений глубокими канавками на участки по 15 лазерных диодов позволяет уменьшить деформации и вероятность растрескивания ЛЛД при нагревании в процессе работы.

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; e-mail: garmash1@mail.ru; Xeniamartynova@yandex.ru

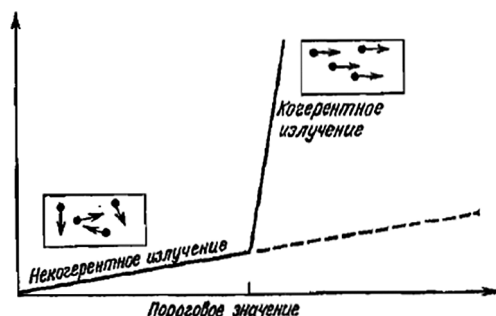


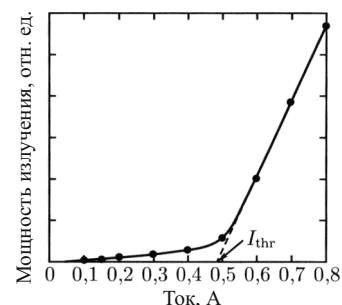
Рис. 1. Схема поведения лазера в докритической и сверхкритической областях (по оси абсцисс — мощность накачки, по оси ординат — мощность излучения) [6]

Перед исследованием интенсивности излучения предварительно была измерена средняя мощность световых импульсов, чтобы определить, в каких пределах токов накачки предстоит исследовать данную зависимость, и главное определить область перехода из режима люминесценции в режим генерации — пороговый ток накачки.

Пороговый ток полупроводникового лазерного диода $I_{\text{п}}$ определяет тот уровень возбуждения, начиная с которого в активном элементе лазерного диода устойчиво поддерживается генерация лазерного излучения. На рис. 1 [6] показано поведение лазерного излучения в докритической и сверхкритической областях. Когда мощность излучения ниже порогового значения, говорят о некогерентном излучении (люминесценции). Если мощность излучения превышает пороговое значение, то начинает возникать когерентное излучение и тогда полупроводниковый лазер работает в режиме лазерной генерации. На графике ватт-амперной характеристики пороговый ток накачки определяется аппроксимацией ее рабочего участка на ось токов. Определенный таким образом пороговый ток накачки имеет неопределенное значение, усредненное для всех диодов ЛЛД. Исходя из этого можно приблизительно определить диапазон рабочих токов накачки, но нельзя утверждать о переходе в режим лазерной генерации отдельных диодов ЛЛД.

Кроме того, пороговый ток накачки характеризует протекание переходного процесса. Речь идет о процессе перехода лазерных диодов из режима спонтанного излучения в режим лазерной генерации. Следует заметить, что, как и любой другой переходный процесс, переход данной системы из режима люминесценции в режим генерации начинается только по достижении внешним воздействием определенных критических значений, в данном случае — критических значений амплитуды тока накачки. Далее начинается переходный процесс, скорость протекания которого для лазерных диодов одной линейки различна. Это приводит к тому, что лазерные диоды одной ЛЛД вступают в режим лазерной генерации не одновременно, а при различных токах накачки.

Рис. 2. Типичная ватт-амперная характеристика полупроводникового лазера (I_{thr} — пороговый ток накачки полупроводникового лазера) [16]



Рассмотрим подробнее процесс перехода ЛЛД из режима люминесценции в режим генерации. С увеличением тока накачки отдельные диоды ЛЛД начинают постепенно переходить из режима люминесценции в режим генерации. В самом начале процесса с повышением тока накачки в режим генерации переходит один лазерный диод. Типичная ватт-амперная характеристика одиночного лазерного диода (полупроводникового лазера) представлена на рис. 2 [16].

При дальнейшем повышении тока накачки в режим генерации начинает постепенно переходить все большее число диодов. И, наконец, в режим генерации переходит последний лазерный диод, тогда процесс перехода ЛЛД из режима люминесценции в режим генерации можно считать оконченным.

ЛЛД может рассматриваться как определенное множество лазерных диодов, каждый из которых характеризуется своим конкретным значением порогового тока накачки. Поэтому пороговый ток накачки, имеющий место для одного лазерного диода, неприемлем для того, чтобы характеризовать всю ЛЛД. Поэтому окончанием переходного процесса из режима люминесценции в режим генерации следует считать такое значение тока накачки, при котором в режим лазерной генерации вступает последний лазерный диод данной конкретной ЛЛД.

Следовательно, порогом ЛЛД является окончание процесса генерации множества лазерных диодов данной линейки. Чтобы говорить о пороговом токе ЛЛД, необходимо ввести величину, усредненную по всем диодам данной конкретной линейки. В принципе ЛЛД может характеризоваться усредненным значением пороговых токов накачки отдельных диодов для данной конкретной линейки.

Наиболее полную информацию о параметрах излучения дает зависимость мощности излучения от величины тока накачки — ватт-амперная характеристика ВтАХ (рис. 3). По этой характеристике можно судить о пороговом токе накачки $I_{\text{п}}$, дифференциальной квантовой эффективности, предельном токе накачки, максимально полученной энергии, мощности импульса лазерного излучения. Для этого была измерена и построена ватт-амперная характеристика для ЛЛД № 1 (см. рис. 3) в соответствии с методикой, описанной в работе [4]. График ватт-амперной характеристики аппроксимирован прямой до пересечения

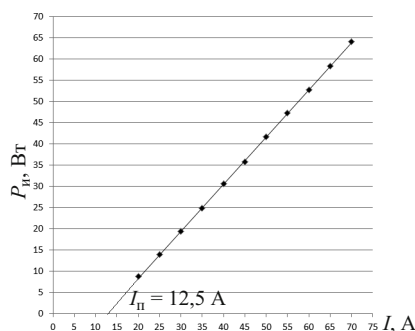


Рис. 3. ВтАХ ЛЛД № 1

с осью токов, точка пересечения указывает на пороговое значение токов накачки.

Чтобы определить мощность лазерного излучения, для начала была измерена средняя энергия импульса излучения при комнатной температуре $t = 20^\circ\text{C}$ при помощи измерителя энергии импульсов лазерного излучения Ophir при частоте следования импульсов $F_{\text{и}} = 20$ Гц и длительности импульса $\tau = 100$ мкс. Корпус с испытываемым образцом ЛЛД закрепляли на охлаждающей медной пластине и устанавливали на рейтер. Измерительную головку измерителя энергии импульсов Ophir закрепляли напротив излучающей площадки образца ЛЛД на расстоянии 3–5 мм. Затем на генераторе импульсного тока (ГИТ) устанавливали параметры импульса тока накачки: длительность импульса — 100 ± 5 мкс; частота импульса — $20 \pm 0,1$ Гц; амплитуда импульса тока — $20 \pm 0,1$ А.

Далее включали ток накачки на ГИТ. Ручкой регулятора силы тока устанавливали амплитуду импульса тока накачки. Первое измерение энергии импульса излучения проводили при токе 20 А. После того как установился ток накачки, на дисплее измерителя энергии Ophir фиксировалось значение энергии импульса излучения в Джоулях.

Измерения повторяли при различных значениях тока накачки в интервале рабочих токов от 20 до 70 А с шагом 5 А. Мощность лазерного излучения вычисляли по формуле

$$P_{\text{и}} = E_{\text{и}}/\tau,$$

где $E_{\text{и}}$ — энергия импульса излучения; τ — длительность импульса излучения.

В результате была получена ватт-амперная характеристика для ЛЛД № 1 (см. рис. 3).

Линейная область ВтАХ — это область, где выходная мощность линейно зависит от тока накачки. Желательно работать именно в ней вследствие непредсказуемости поведения прибора в нелинейной области. После того как для исследуемой ЛЛД аппроксимацией рабочего участка ватт-амперной характеристики на ось токов был определен пороговый ток накачки, начали эксперимент по наблюдению ближнего поля излучения ЛЛД.

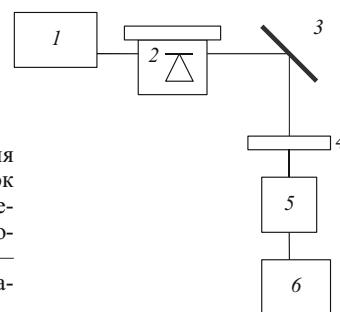


Рис. 4. Схема наблюдения ближнего поля ЛЛД: 1 — блок накачки ЛЛД; 2 — ЛЛД в измерительной головке; 3 — светоделительная пластинка; 4 — светофильтр; 5 — цифровая камера CMOS; 6 — ЭВМ

На рис. 4 представлена блок-схема проведения эксперимента по наблюдению ближнего поля ЛЛД.

Эксперимент проводился в следующем порядке: собирали схему в соответствии с рис. 4; приборы включали согласно их инструкции по эксплуатации и прогревали в течение 5 мин; подключали ЛЛД, соблюдая полярность; излучение ЛЛД направляли на светоделительную пластину так, чтобы отраженный луч попадал в объектив инфракрасной камеры и на мониторе персонального компьютера (ПК) отображалась картина ближнего поля излучения; плавно изменяя ток накачки ЛЛД, фиксировали при помощи программного обеспечения CMOS-1300 картины ближнего поля излучения на установленном токе накачки; ток накачки выводился до нуля; при помощи программы CMOS-1300 изображения картин ближнего поля излучения преобразовывались в графики распределения интенсивности излучения (интегральные профили).

Измерение проводили вдоль оси, перпендикулярной плоскости $p-n$ -перехода, где излучение имело распределение, близкое к одномодовому.

Исследование ближнего поля ЛЛД проводили с помощью цифровой камеры CMOS-1,3 М/10V и с использованием светоделительной пластины, которая служила для ослабления излучения ЛЛД с целью приведения в соответствие интенсивности лазерного излучения с динамическим диапазоном камеры. Цифровую камеру CMOS-1,3 М/10V подсоединяли к ПК. ЛЛД излучала в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 20 Гц и длительностью одного импульса 100 мкс. Перед началом измерений первым, самым минимальным было значение тока, при котором излучение ЛЛД на картинах ближнего поля визуально отличалось от фона. Излучение ЛЛД направлялось при помощи фокусирующей линзы в камеру. На мониторе ПК наблюдали распределение интенсивности лазерного излучения поверхности ЛЛД. Далее при помощи программного обеспечения CMOS-1300 обрабатывали информацию, поступающую с камеры CMOS-1,3 М/10V. После того как изображение ближнего поля ЛЛД было зафиксировано и сохранено программой в формате как цифрового изображения, так и численных данных, ток накачки увеличивали на 5 А и повторяли описанную процедуру вновь. Изменяя значения тока от меньшего к большему избегали перегрева активной области ЛЛД.

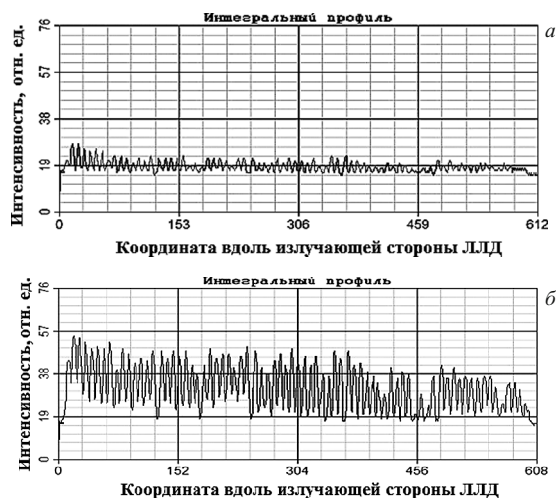


Рис. 5. Интегральный профиль интенсивности для ЛЛД № 1, зафиксированный при токе накачки, равном 11 А (режим люминесценции) (а) и 13 А (режим лазерной генерации) (б)

По описанной схеме был исследован диапазон токов накачки от 10 до 40 А с шагом измерения 5 А. Для каждого значения тока получена картина ближнего поля в формате цифрового изображения и численные данные, которые характеризовали распределение интенсивности излучения линейки по отдельным диодам — интегральные профили интенсивности. На рис. 5 представлен пример интегрального профиля для ЛЛД (ЛЛД № 1), излучающей в режимах люминесценции и лазерной генерации соответственно.

Интегральный профиль интенсивности излучения иллюстрирует относительное распределение интенсивности по отдельным диодам. Исходя из этого можно представить картину распределения электрического тока по отдельным диодам. Испускание света является следствием рекомбинации электронно-дырочных пар (свободных носителей заряда), а значит, распределение интенсивности на интегральном профиле такое же, как электронно-дырочных пар, способных рекомбинировать. Особенность излучающей гетероструктуры данных ЛЛД такова, что электрический ток подводится через контакты к n -области, за счет этого концентрация электронов в этой области под действием тока накачки растет, но при этом концентрация дырок в p -области остается постоянной и определяется свойствами данного полупроводникового материала. Интенсивность излучения тем больше, чем выше концентрация носителей того и другого знака. Таким образом, в данном случае интенсивность излучения определяется концентрацией дырок, а значит, свойствами данного полупроводникового материала. Именно концентрация дырок определяет число рекомбинирующих электронно-дырочных пар, а значит, и число испускаемых фотонов. Из этого следует, что по сути интегральный профиль иллюстрирует относительное распределение дырок в конкретном полупроводниковом материале.

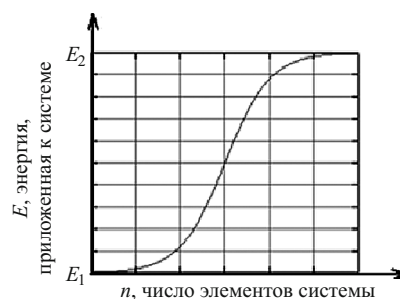


Рис. 6. Логистическая функция

Исследование распределения тока накачки по отдельным лазерным диодам. Далее рассмотрим, по какому закону распределяется подводимый ток накачки между отдельными диодами ЛЛД, которая представляет собой термодинамически закрытую систему, состоящую из конечного числа элементов — лазерных диодов. Такая система взаимодействует с окружающей средой только посредством обмена энергией, но не веществом. Приложим к системе внешнее воздействие (электрический ток), в результате которого суммарная энергия системы возрастет на определенную величину. Все элементы системы под внешним воздействием стремятся перейти в состояние с максимально возможной энергией при данной величине воздействия на них. Построим распределение всех элементов системы (ЛЛД) по величине их энергии (интенсивности излучения) при заданной величине внешнего воздействия. В результате получим логистическую функцию (рис. 6), которая описывает переход элементов закрытой системы с конечным их числом из одного состояния с потенциальной энергией E_1 в другое — с потенциальной энергией E_2 . Однако энергия отдельных элементов системы оказывается различной.

Энергия, приложенная к системе ЛЛД в виде того или иного внешнего воздействия, распределяется между элементами системы по определенному закону, который описывается логистической функцией

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}},$$

где независимая переменная x представляет собой номер элемента системы.

Построим распределение всех элементов системы (лазерных диодов) по величине их интенсивности излучения при заданной величине амплитуды тока накачки (рис. 7). Полученные кривые по форме отвечают логистической кривой. Причем это сходство сохраняется для любых величин внешнего воздействия (амплитуды тока накачки). Логистическая функция показывает, как энергия внешнего воздействия, приложенная к закрытой системе, распределяется между элементами, т.е. как распределяется ток накачки между лазерными диодами одной ЛЛД.

Рассмотрим, каким образом импульсный режим работы ЛЛД формирует интегральные профили, изображенные на рис. 5. Частота повторения импульса тока накачки является фиксированной величиной и составляет 20 Гц. Амплитуда импульса тока накачки — величина переменная, в ходе данного эксперимента изменялась с шагом 0,5 А. Вследствие этого каждый раз при изменении амплитуды тока менялась степень возбуждения полупроводниковой среды — инверсная населенность, которая зависит от силы внешнего воздействия, в данном случае — от амплитуды тока накачки, и возрастала вместе с амплитудой тока накачки на определенную величину. Благодаря этому увеличилось время затухания инверсной населенности полупроводниковой среды (время релаксации), а следовательно — длительность светового импульса. Другими словами, если длительность импульса тока — константа, то длительность (а значит и частота) светового импульса — величина переменная и зависит от амплитуды тока накачки. Другим важным моментом является и то, что конфигурация импульса тока накачки непостоянна (что наблюдали на экране осциллографа), т.е. имеют место мелкие флуктуации формы импульса тока накачки. Таким образом, на интегральном профиле получаем результат наложения различных колебаний интенсивности излучения — на постоянную частоту импульсов тока накачки накладывается переменная частота светового импульса и мелкие флуктуации формы импульсов тока. Все это вместе формирует интегральный профиль интенсивности.

Таким образом, данный метод исследования излучения линеек лазерных диодов является информативным для анализа коллективного поведения лазерных диодов в линейке.

Авторы выражают благодарность С. М. Сапожникову и Е. И. Лебедевой за образцы, предоставленные для исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравцов Н. В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой / Квантовая электроника. 2001. № 8. С. 661 – 677.
2. Базаров В. К. Полупроводниковые лазеры и их применение. — М.: Энергия, 1969 — 56 с.

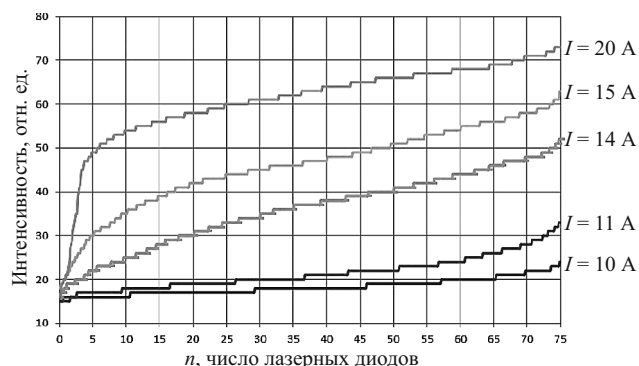


Рис. 7. Распределение лазерных диодов ЛЛД № 1 по величине интенсивности излучения для каждой конкретной величины тока накачки

3. Зверев Г. М., Гуляев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение. — М.: Радио и связь, 1994. — 312 с.
4. ГОСТ Р 51106–97. Лазеры инжекционные, излучатели, решетки лазерных диодов, диоды лазерные. Методы измерения параметров. — М.: Изд-во стандартов. — 12 с.
5. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. — М.: Прогресс, 1986. — 240 с.
6. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. — М.: Мир, 1979. — 276 с.
7. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. — М.: Мир, 1973. — 458 с.
8. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. — М.: Наука, 1983. — 295 с.
9. Грибковский В. П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. — Минск: Наука и техника, 1975. — 231 с.
10. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Под ред. Э. К. Лецкого. — М.: Мир, 1980. — 620 с.
11. Мельниченко А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении: Учеб. — М.: Изд. дом МИСиС, 2009. — 268 с.
12. Гринченко В. Т., Мацыпура В. Т., Снарский А. А. Введение в нелинейную динамику: Хаос и фракталы. — М.: Издательство ЛКИ, 2010. — 280 с.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
14. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 208 с.
15. Звелто О. Принципы лазеров. — М.: Мир, 1990. — 720 с.
16. Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения. Изд. 2-е / Пер. с англ. под ред. В. А. Гергеля. — М.: Физматлит, 2012. — 777 с.