

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА В СВОБОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО

OPTOELECTRONIC SYSTEM TO MEASURE BASIC PARAMETERS OF THE RADIATION OF THE LASER DIODE IN A FREE SPACE

*V. Bliznyuk
N. Berezovskaya
V. Parshin
A. Tarasov*

Annotation

It is shown the possibility of fast simultaneous measurement mode structure and the degree of polarization of the laser diode. It was established that for such measurements it is necessary to use methods based on the definition of explicit function describing a diagram of the laser diode radiation pattern in the vertical plane. It is shown the overall design of opto-electronic complex for fast measurements of the power, the mode structure and the degree of polarization of the laser diode.

Keywords: laser diode, fundamental mode, directional radiation pattern, the near-field zone, the far-field zone.

*Близнюк Владимир Васильевич
Доцент, к.т.н., Национальный
исследовательский университет "МЭИ"
Березовская Наталия Витальевна
Аспирант, Национальный
исследовательский университет "МЭИ"
Паршин Василий Алексеевич
Студент, Национальный
исследовательский университет "МЭИ"
Тарасов Александр Евгеньевич
Ст. преподаватель, Национальный
исследовательский университет "МЭИ"*

Аннотация

Показана возможность проведения быстрых одновременных измерений модовой структуры и степени поляризации излучения лазерного диода. Установлено, что для проведения таких измерений необходимо использовать методики, основанные на определении в явном виде функции, описывающей диаграмму направленности излучения лазерного диода в вертикальной плоскости. Приведена общая концепция построения оптико-электронного комплекса для быстрых измерений мощности, модовой структуры и степени поляризации излучения лазерного диода.

Ключевые слова:

Лазерный диод, фундаментальная мода, диаграмма направленности излучения, ближняя зона поля, дальняя зона поля.

Введение

Важнейшими параметрами, характеризующими функциональные возможности и состояние гетероструктуры полоскового лазерного диода с квантовыми ямами (далее – ЛД), являются мощность, модовая структура и степень поляризации его излучения. В условиях серийного производства ЛД особое внимание уделяется проблеме повышения скорости измерений этих параметров. Одним из возможных решений этой проблемы является использование для диагностики излучения ЛД многофункционального средства измерений.

При разработке такого средства измерений приходится учитывать специфику излучения ЛД – его большую расходимость.

В настоящее время единственным стандартизованным средством измерения мощности сильно расходящегося лазерного излучения является интегрирующая сфера [1]. Согласно техническим характеристикам интегрирующей сферы, в нее попадают все лучи, которые распространяются относительно оси лазерного пучка под углом не более 40° [2]. Принимая во внимание тот факт, что даже в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу (далее – вертикальной плоскости) интенсивность излучения ЛД, распространяющегося под углом 40° к оси лазерного пучка, не превышает 0,2% от максимального значения, можно констатировать, что практически все диагностируемое излучение попадает в интегрирующую сферу.

Погрешность интегрирующей сферы, гарантируемая фирмами-изготовителями, равна 5 - 10% [2].

Модовая структура излучения ЛД определяется с достаточно высокой скоростью путем измерений и анализа его диаграмм направленности в плоскости p - n -перехода (далее – горизонтальной плоскости) и в вертикальной плоскости. В том случае, когда нормированные угловые зависимости интенсивности излучения в этих плоскостях можно хорошо аппроксимировать гауссовыми кривыми, считают, что имеет место поперечно-одномодовый режим генерации ЛД [3,4]. Строгий анализ модовой структуры излучения ЛД проведен в [5] путем определения коэффициента распространения лазерного пучка M^2 . Однако нахождение этого коэффициента связано со сложными измерениями ближнего поля излучения ЛД, трудно реализуемыми в условиях промышленного производства. Что касается выпускаемых фирмой COHERENT измерителей коэффициента M^2 , то область их использования ограничена диагностикой лазерных пучков с малой расходимостью [6].

Целью настоящей работы является разработка оптико-электронного комплекса для быстрых измерений мощности, модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД путем объединения в нем интегрирующей сферы с фотоэлектрическими преобразователями лазерного излучения и поляризационными призмами, расположенными определенным образом в периферийной области пучка.

Включение интегрирующей сферы в состав многофункционального оптико-электронного комплекса при отсутствии жестких требований к его габаритам не является сложной технической задачей. Поэтому основное внимание в работе уделяется той части комплекса, которая базируется на разработанных нами методиках быстрых измерений модовой структуры и степени поляризации излучения.

Методика быстрого определения модовой структуры лазерного излучения

Определение модовой структуры излучения ЛД сводится, как правило, к решению вопроса, является или не является оно одномодовым. Для ответа на этот вопрос необходим количественный анализ диаграммы направленности излучения. Диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости определяются экспериментально с использованием методики, изложенной в [9]. Проведение быстрого анализа возможно только в том случае, когда функция, описывающая ее, может быть представлена в явном виде. Нахождение функции, описывающей двумерную диаграмму направленности излучения ЛД в явном виде, не представляется возможным из-за астигматизма лазерного пучка. Однако астигматизм пучка можно исключить, если рассматривать поле излучения ЛД отдельно в вертикальной и го-

ризонтальной плоскости и прилегающих к ним тонких слоях пространства.

В [10] показано, что, в случае генерации ЛД на фундаментальной моде, функция, описывающая диаграмму направленности излучения в вертикальной плоскости, имеет следующий вид:

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp(-A^2 z^2), \tag{1}$$

где $G^2(\theta^\perp)$ – квадрат углового фактора Гюйгенса [11]:

$$G^2(\theta^\perp) = \left[(m^2 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp}) / m^2 \cos \theta^\perp + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp} \right]^2 \cos \theta^\perp, \tag{2}$$

где $m = 1$ для ТЕ-мод или $m = n$ для ТМ-мод, а n – показатель преломления волновода;

$$A^2 = \frac{\ln \left[2G^2(\theta_{1/2}^\perp) \right]}{\sin^2 \theta_{1/2}^\perp}; \tag{3}$$

$$Z^2 = \sin^2 \theta^\perp; \tag{4}$$

$G^2(\theta_{1/2}^\perp)$ – квадрат углового фактора при $\theta = \theta_{1/2}^\perp$,

рассчитываемый по формуле [2];

$\theta_{1/2}^\perp$ – половинный угол расходимости излучения в вертикальной плоскости; z – абсцисса точки гауссовой кривой

$$\varphi_g(z) = \exp(-A^2 z^2)$$

в декартовой системе координат.

Из (3) следует, что функция, описывающая диаграмму направленности излучения в вертикальной плоскости, однозначно задается в явном виде, если определен угол расходимости излучения ЛД $\theta_{1/2}^\perp$

Этот угол быстро определяется по хорошо разработанной методике. Благодаря этому существенно упрощается расчет мощности излучения, падающего на j -ый фотодиод, нормаль к приемной поверхности которого направлена под углом: θ_j^\perp

$$P_{\text{пад ФД}}(\theta_j) = I(0) \int_{\theta_{\min j}}^{\theta_{\max j}} \int_{-\alpha_{\text{ФД}}}^{\alpha_{\text{ФД}}} f^\perp(\theta, 0) da \sin \theta d\theta, \tag{5}$$

где $I(0)$ – осевая сила излучения ЛД; $f^\perp(\theta, 0)$ – функция, описывающая диаграмму направленности излучения ЛД в вертикальной плоскости; $\theta_{\min}, \theta_{\max}, [-\alpha_{\text{ФД}}]$ и $\alpha_{\text{ФД}}$ – полярные и азимутальные углы границ приемной площадки фотодиода;

θ и α – текущие сферические координаты – полярный и азимутальный угол.

В том случае, когда угловые апертуры двух фотодиодов равны, а сами фотодиоды расположены под разными углами

$$\theta_j^\perp \text{ и } \theta_{j+1}^\perp$$

к оптической оси измерительной системы отношение мощностей излучения, падающего на них, определяется формулой:

$$\frac{P_{\text{пад ФД}}(\theta_j)}{P_{\text{пад ФД}}(\theta_{j+1})} = \frac{\int_{\theta_{\text{min } j}}^{\theta_{\text{max } j}} \int_{-\alpha_{\text{ФД}}}^{\alpha_{\text{ФД}}} f^\perp(\theta, 0) da \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{\text{min } j+1}}^{\theta_{\text{max } j+1}} \int_{-\alpha_{\text{ФД}}}^{\alpha_{\text{ФД}}} f^\perp(\theta, 0) da \sin \theta d\theta} \quad (6)$$

Если отношение измеренных мощностей излучения, падающего на фотодиоды, равно правой части соотношения, имеет место одномодовый режим генерации.

Методика быстрого измерения степени поляризации лазерного излучения

Как уже отмечалось выше, разрабатываемый оптико-электронный комплекс должен обеспечивать быстрые измерения мощности, модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД. Наименьшее время измерений этих параметров могло бы быть обеспечено только при одновременном их проведении. Однако измерения мощности с использованием интегрирующей сферы связаны с перекрытием пучка излучения, и поэтому делают невозможными проведение одновременно с ними измерений двух других параметров излучения. Модовая структура излучения ЛД определяется путем измерений и анализа его диаграмм направленности. При этом оптимальные условия проведения таких измерений обеспечиваются при установке фотоприемника на оптической оси комплекса.

Таким образом, единственной возможностью одновременных измерений модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД остается расположение элементов комплекса, предназначенных для измерения поляризационного параметра, под некоторым углом к оптической оси комплекса.

Именно поэтому нами была разработана методика измерений степени поляризации излучения ЛД, основанная на ее измерениях под определенными углами к оптической оси оптико-электронного комплекса [8]. При измерениях степени поляризации по этой методике учитывается, что излучение ЛД состоит из двух некогерентных линейно поляризованных в ортогональных плоскостях ТЕ- и ТМ-компонент. Электрический вектор ТЕ-компоненты излучения параллелен *p-n*-переходу, а значит, перпендикулярен вертикальной плоскости, а электрический

вектор ТМ-компоненты лежит в этой плоскости [12]. Благодаря этому появляется возможность контроля состояния поляризации излучения ЛД в свободное пространство путем измерений его степени поляризации в вертикальной плоскости.

В 2015 году введен в действие документ [13], регламентирующий методы измерений степени поляризации излучения, в том числе сильно расходящегося. Однако анализ состояния поляризации такого излучения, согласно [13], проводится только после его коллимации. К сожалению, использование коллиматора приводит к изменению состояния поляризации излучения ЛД и, как следствие, к увеличению погрешности и даже искажению результатов измерений.

Важным событием было введение в [13] в качестве поляризационного параметра физической величины контраст *K*, значение которого определяется по формуле:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}, \quad (7)$$

где *P*₁ и *P*₂ – максимальная и минимальная мощности излучения, проходящего через линейный поляризатор. Согласно [13], при значениях контраста, превышающих 0,9, диагностируемое излучение линейно поляризовано, а его степень поляризации численно равна контрасту.

Нами установлено, что контраст ЛД практически всегда больше 0,9 [8]. Это позволяет обеспечить высокую скорость измерений степени поляризации за счет одновременной фиксации значений *P*₁ и *P*₂ путем размещения в периферийной части лазерного пучка элементов измерительной схемы, каждый из которых состоит из двух фотодиодов с установленными перед ними поляризационными призмами с взаимно перпендикулярными плоскостями пропускания.

Блок-схема и принцип функционирования оптико-электронного комплекса для быстрых измерений основных параметров излучения ЛД

На рис. 1 приведена блок-схема оптико-электронного комплекса, предназначенного для быстрых измерений модовой структуры (диаграммы направленности) и степени поляризации излучения ЛД в вертикальной плоскости. Ее прототипом является схема установки, приведенная в [9].

Диагностируемый лазерный диод 1 закреплен в юстировочном узле, жестко соединенном с поворотным столиком гониометра 2.

Юстировочный узел позволяет компенсировать несопадение осей симметрии корпуса ЛД и лазерного пучка.

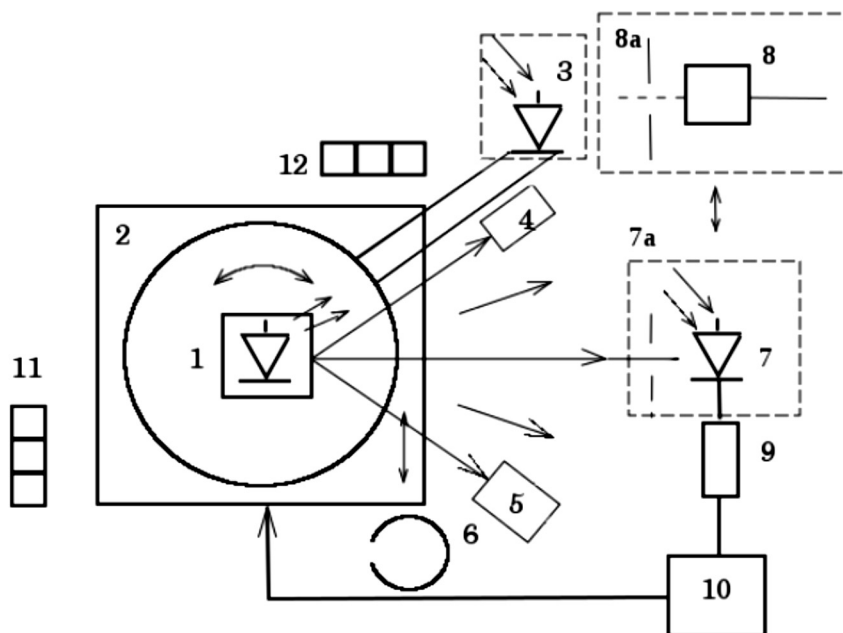


Рисунок 1. Схематическое изображение опико-электронного комплекса для быстрых измерений модовой структуры и степени поляризации лазерного излучения:

- 1 - диагностируемый лазерный диод ЛД; 2 - поворотный столик; 3 - приемник-свидетель;
- 4 и 5 - фотодиодные блоки с поляризационными призмами; 6 - интегрирующая сфера;
- 7 - фотодиод с диафрагмой 7а; 8 - планарный первичный измерительный преобразователь ПИП с диафрагмой 8а;
- 9 - АЦП; 10 - компьютер; 11 и 12 - водяные уровни для совмещения базовой оптической плиты с горизонтальной плоскостью.

Этот узел используется и в случае ухода оси диаграммы направленности излучения, вызванного изменением мощности генерации ЛД. Положение юстировочного узла регулируется сигналом рассогласования, поступающим на шаговые двигатели с выхода системы обработки сигнала координатно-чувствительного планарного первичного измерительного преобразователя (далее – ПИП) 8.

Излучение, распространяющееся в вертикальной плоскости в периферийной области лазерного пучка, падает на приемную поверхность приемника-свидетеля 3, корпус которого фиксирован относительно поворотного столика. Этот приемник позволяет определять нестабильность мощности излучения ЛД и учитывать ее в процессе измерений. Диагностируемый лазерный диод 1, расположен так, что ось диаграммы направленности его излучения проходит через центр диафрагмы 8а, установленной перед коллектором энергии планарного ПИП 8. Такое прохождение излучения через диафрагму обеспечивается за счет координатной чувствительности планарного ПИП. В случае ухода оси диаграммы направленности на выходе ПИП вырабатывается сигнал, по которому определяется ее смещение. Этот сигнал подается на АЦП 9 и далее на управляющую схему, подсоединенную к компьютеру 10. Сигнал с управляющей схемы обеспечивает изменение положения столика с жестко закреплен-

ным на нем ЛД таким образом, что ось диаграммы направленности снова направлена в центр диафрагмы.

За счет этого обеспечивается воспроизводимость условий облучения фотодиодов, находящихся в блоках 4 и 5, которые расположены симметрично оптической оси комплекса. В состав каждого блока входит фотодиод, на который падает излучение ЛД мощностью, рассчитываемой по (5), а также два фотодиода с установленными перед ними поляризационными призмами с взаимно перпендикулярными плоскостями пропускания. Композиции из фотодиодов и поляризационных призм позволяют определять контраст по (7). При этом излучение, падающее на эти фотодиоды, распространяется под некоторым фиксированным углом θ . Зная этот угол, по (1) можно найти значение функции $f^{\pm}(\theta)$, что принципиально важно при измерениях как модовой структуры, так степени поляризации излучения ЛД.

На время измерений диаграмм направленности излучения ПИП выводится из области измерений и на его место устанавливается фотодиод 7 с расположенной перед ним диафрагмой 7а, апертура которой выбирается из условия обеспечения сканирования ДН с шагом 15 угловых минут.

Если измерение степени поляризации излучения ЛД, падающего на входные апертуры блоков 4 и 5, должно проводиться без нарушений функционирования ЛД, ПИП вместе с установленной перед ним диафрагмой выводится из схемы измерений. При этом контроль положения оси диаграммы направленности осуществляется с помощью выходных сигналов с фотодиодов, расположенных в фотодиодных блоках с поляризационными призмами.

Заключение

Показана возможность проведения быстрых одновременных измерений модовой структуры и степени по-

ляризации излучения ЛД.

Установлено, что для проведения таких измерений необходимо использовать методики, основанные на определении в явном виде функции, описывающей диаграмму направленности излучения ЛД в вертикальной плоскости. Приведена общая концепция построения оптико-электронного комплекса для быстрых измерений мощности, модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД путем объединения в нем интегрирующей сферы с фотоэлектрическими преобразователями лазерного излучения и поляризационными призмами, расположенными определенным образом в периферийной области пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО11554–2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка.
2. Проспект продукции фирмы OPHIR. 2014. www.ophiropt.com. 126 с.
3. Давыдова Е.И., Лагутин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петровский А.В., Сухарев А.В., Успенский М.Б., Шишкин В.А. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантоворазмерных гетероструктур In GaAs/ AlGaAs, легированных углеродом // Квантовая электроника. 2009. Т.39, № 1. С. 18 – 20.
4. Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Рябоштан Ю.А., Мармалюк А.А., Тарасов И.С. Мощные диодные лазеры на основе асимметричных квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения In GaAs/InP // Физика и техника полупроводников. 2009. Т.43, вып.12. С. 1646 – 1648.
5. Поповичев В.В., Давыдова Е.И., Мармалюк А.А., Симаков А.В., Успенский М.Б., Чельный А.А., Богатов А.П., Дракин А.Е., Плисюк С.А., Стратонников А.А. Мощные поперечно-одномодовые полупроводниковые лазеры с гребневой конструкцией оптического волновода // Квантовая электроника. Т.32, № 12. С. 1099 – 1104.
6. Проспект продукции фирмы COHERENT. 2014. www.Coherent.com. 144 с.
7. Дьячков Н.В., Богатов А.П. Измерение параметров Стокса излучения полупроводниковых лазеров // Квантовая электроника, Т. 41, № 10, 2011. – С. 869 – 874.
8. Березовская Н.В., Близняк В.В., Брит М.А., Ефремов В.С., Моисеев А.А., Паршин В.А. Средство измерений степени поляризации излучения одномодового лазерного диода в свободное пространство. Сборник докладов 24-ой международной конференции "Лазеры. Измерения. Информация" Т.1. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. С. 30 – 38.
9. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Коняев В.П. Яркость и филаментация оптического потока мощных квантоворазмерных InGaAs/GaAs – лазеров, работающих в непрерывном режиме // Квантовая электроника, Т. 30, № 5, 2000. – С. 401 – 405.
10. V. Bliznyuk, N. Berezovskaya, V. Parshin, A. Tarasov. Non-standardized measurement methods and measuring instruments for parameters and characteristics of laser diodes radiation and their standardization prospects// Proceedings of the International Academic Forum AMO – SPITSE – NESEFF. – Smolensk: Publishing "Universum". – 2016. P. 85 – 86.
11. Thompson G.H.B. Physics of semiconductor laser devices. N.Y.: J. Wiley and Sons.1980. P. 185 – 186.
12. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах М.: Мир, 1981. Т. 1. 299 с.
13. ГОСТ Р ИСО 12005–2013. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Поляризация.

© В.В. Близняк, Н.В. Березовская, В.А. Паршин, А.Е. Тарасов, (40595141@mail.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

