

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 621. 375

В.В. Близнюк

*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: [4059541@mail.ru](mailto:4059541@mail.ru), [BlizniukVV@mail.ru](mailto:BlizniukVV@mail.ru)*

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ДИАГНОСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В СВОБОДНОЕ  
ПРОСТРАНСТВО**

**АННОТАЦИЯ**

Рассмотрена конструкция измерительной установки, обеспечивающей одновременные измерения энергетических, пространственно-энергетических и поляризационных параметров излучения с большой расходимостью.

**ЛАЗЕРНЫЙ ДИОД, ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ, ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МОДА, СТЕПЕНЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ, УДВОЕНИЕ ЧАСТОТЫ**

**ВВЕДЕНИЕ**

При реализации оптических методов исследования потоков возникает потребность в малогабаритных источниках одномодового лазерного излучения в сине-зеленой области спектра. Характерной особенностью диаграммы направленности одномодового лазера (под которым, как правило, понимают лазер, генерирующий на фундаментальной моде) является доминирование одного лепестка, в котором сосредоточена практически вся энергия излучения.

В настоящее время в качестве таких источников используются твердотельные лазеры с диодной накачкой, основная частота генерации которых удваивается с использованием помещенных внутри резонатора нелинейных кристаллов с регулярной доменной структурой. Чаще всего используются кристаллы ррLN ( $\text{LiNbO}_3$ ), ррКТР и ррSLT [1]. Так, излучение на длине волны 0,532 мкм представляет собой вторую гармонику основной линии 1,064 мкм Ne:YAG лазера, на длине волны 0,457 мкм – вторую гармонику основной линии 0,914 мкм Ne:YVO<sub>4</sub> лазера [1].

Для накачки неодимовых лазеров используются мощные (до 8 Вт) полосковые лазерные диоды на основе квантоворазмерных гетероструктур раздельного ограничения (далее – ЛД) с длиной волны излучения 808 нм и волоконным выходом [2]. При прохождении по волокну многомодового излучения ЛД на его выходе формируется лазерный пучок, коэффициент распространения которого  $M^2$  варьируется в диапазоне от 40 до 50. Этот пучок фокусируется на кристалл неодимового лазера длиной не более 1 мм. Для минимизации рассогласования перетяжек излучения накачки и резонатора твердотельного лазера его длина не превышает 10 мм. Благодаря этому обеспечивается не только большая (до 300 мВт) мощность излучения, но и высокое качество лазерного пучка неодимового лазера. В частности, возможны реализация одномодового режима генерации неодимового

лазера, а при использовании стабилизации частоты по полосе пропускания интерферометра Фабри-Перо – создание одночастотного лазера.

При создании одномодовых и, в особенности, одночастотных неодимовых лазеров остро стоит вопрос о повышении эффективности диодной накачки. Этот вопрос необходимо рассматривать с учетом двух факторов. Во-первых, кристаллы неодимового лазера анизотропные и поэтому поглощение излучения накачки сильно зависит от степени поляризации излучения накачки. Наибольшей эффективности диодной накачки удастся достичь, когда излучение ЛД линейно поляризовано. Из этого следует, что определению состояния поляризации ЛД должно уделяться особое внимание. Во-вторых, излучение ЛД в свободное пространство имеет большую расходимость, что обуславливает необходимость использования достаточно сложной оптической системы его согласования с входом оптического волокна. Условие наилучшего согласования выполняется, когда излучение ЛД является поперечно-одномодовым. Что актуализирует задачу определения режима генерации ЛД.

Нарушение одномодового режима генерации неодимового лазера вследствие нестабильности состояния поляризации и модового состава излучения ЛД приводит к существенному ухудшению параметров лазера, а значит, и условий функционирования лазерных измерительных систем. Поэтому при диагностике таких систем во время проведения пуско-наладочных, регламентных и ремонтных работ особое внимание уделяется анализу основных параметров ЛД – мощности, модовой структуры и степени поляризации. В ходе регламентных и ремонтных работ этот анализ должен проводиться в предельно сжатые сроки, что возможно только при комплексной диагностике параметров излучения ЛД. Используя результаты анализа, можно определить функциональное состояние гетероструктуры ЛД, а значит, и прогнозировать его срок службы – важнейший технико-экономический параметр.

Технология ЛД хорошо отработана, что позволяет их производителям гарантировать большой срок службы – несколько десятков тысяч часов. Однако на практике он может быть значительно меньше, что объясняется многими причинами, в частности, условиями эксплуатации. Однако срок службы ЛД во многом определяет срок службы лазерных измерительных систем. Поэтому прогнозирование этого параметра ЛД является актуальной, практически важной задачей.

Установлено, что наиболее точное прогнозирование срока службы мощных ЛД осуществляется путем измерений их мощности, модовой структуры и степени поляризации в надпороговом режиме генерации, когда излучение ЛД является одномодовым [3]. С учетом условий диагностики ЛД необходимо обеспечивать быстрое измерение этих параметров.

Целью данной работы является рассмотрение конструкции оптико-электронного комплекса (далее – ОЭК), базирующегося на методиках быстрых измерений основных параметров ЛД.

## **ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ БЫСТРОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ**

**Анализ пригодности наиболее часто используемых методов и методик измерений модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД для создания на их базе быстродействующих рабочих средств, обеспечивающих такие измерения**

Методы и методики измерений мощности, модовой структуры и степени поляризации направленного (с малой расходимостью) лазерного излучения и требования, предъявляемые к средствам измерений этих параметров, регламентированы стандартами [4-8]. В настоящее время вопрос метрологического обеспечения диагностики лазерного излучения с малой расходимостью решен. Разработана эталонная база и успешно

применяются в повседневной метрологической практике рабочие средства измерений, полностью удовлетворяющие требованиям международных стандартов.

Совсем другая ситуация сложилась в области метрологии сильно расходящегося излучения ЛД.

В настоящее время единственным аттестованным в качестве рабочего средства измерений средней мощности такого излучения является интегрирующая сфера [4]. Погрешность интегрирующей сферы, гарантируемая фирмами-изготовителями, равна 5 – 10% [9]. Следует отметить, что это значение превышает регламентированный в [5] предел допустимого значения основной относительной погрешности  $\Delta_0 = 1,5 - 4 \%$ , установленный для рабочего средства измерений средней мощности непрерывного лазерного излучения. Время измерений мощности излучения с использованием интегрирующей сферы определяется способом его введения в сферу. Оно варьируется от нескольких секунд, если для ввода излучения ЛД используется оптическое волокно, до нескольких минут, если сильно расходящееся излучение ЛД напрямую вводится в интегрирующую сферу.

Для определения модовой структуры излучения ЛД (под которым, как правило, понимают решение вопроса, является или не является оно поперечно-одномодовым) проводится анализ его диаграмм направленности в плоскости *p-n*-перехода (далее – горизонтальной плоскости) и в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу (далее – вертикальной плоскости). Диаграммы измеряются в каждой из плоскостей с использованием неподвижного фотоприемника с малой апертурой путем быстрого (в течение нескольких секунд) поворота ЛД на  $180^\circ$  вокруг оси, лежащей в плоскости его выходного зеркала. Оптимальным является расположение входной апертуры фотоприемника на оптической оси измерительной установки.

Согласно наиболее распространенной методике определения модового состава излучения ЛД в свободное пространство, считается, что если диаграммы направленности хорошо аппроксимируются гауссовыми кривыми, то имеет место одномодовый режим генерации [10]. Однако из-за отсутствия критерия количественного анализа диаграмм направленности такая методика позволяет дать только качественную оценку модовой структуры, что исключает возможность создания на ее базе рабочего средства измерений.

Количественный анализ модовой структуры излучения ЛД в свободное пространство с использованием диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости дан в [11]. Для этого разработан алгоритм определения коэффициента распространения лазерного пучка  $M^2$ , учитывающий большую расходимость излучения. Однако этот алгоритм базируется на продолжительных прецизионных измерениях распределения интенсивности по пятну излучения на выходном зеркале ЛД с использованием дорогостоящего оборудования и сложной обработке результатов измерений. Все это не только значительно усложняет задачу создания сравнительно недорогих рабочих средств измерений, но и исключает возможность проведения быстрых измерений модового состава сильно расходящегося излучения.

Выпускаемые фирмой COHERENT измерители коэффициента  $M^2$  характеризуются высоким быстродействием, но область их использования ограничена диагностикой лазерных пучков с малой расходимостью [12].

Таким образом, приходится констатировать, что в настоящее время не существует методик быстрого определения модовой структуры излучения ЛД в свободное пространство, на базе которых возможно создание быстродействующих рабочих средств измерений модового состава сильно расходящегося лазерного излучения.

Повышенный интерес к быстрым измерениям поляризационных параметров излучения ЛД с использованием широкодиапазонной фазовой пластины подтверждается разработкой методики и автоматизированного средства таких измерений [13]. Однако, как показывают проведенные нами в [14] исследования состояния поляризации излучения ЛД, их контраст практически всегда больше 0,9, из чего, согласно [8], следует, что излучение линейно поляризовано. В таком случае измерения параметров Стокса являются избыточными и

возможно создание быстродействующего рабочего средства измерений степени поляризации ЛД с использованием линейного поляризатора.

### Методика быстрого определения модовой структуры сильно расходящегося лазерного излучения

Проведенный выше обзор разработанных к настоящему времени методик модовой структуры сильно расходящегося лазерного излучения позволяет заключить, что быстрый количественный анализ диаграмм направленности сильно расходящегося лазерного излучения возможен только в том случае, когда функции, описывающие их, могут быть представлены в явном виде. Нахождение функции, описывающей двумерную диаграмму направленности излучения ЛД в явном виде, не представляется возможным из-за астигматизма лазерного пучка. Однако влияние астигматизма пучка на диагностику ЛД можно исключить, если рассматривать его поле излучения отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскости и прилегающих к ним тонких слоях пространства.

В [16] показано, что, в случае генерации ЛД на фундаментальной моде, функция, описывающая диаграмму направленности излучения в вертикальной и горизонтальной плоскости, имеет следующий вид:

$$f^{\perp,\parallel}(\theta) = G^2(\theta^{\perp,\parallel}) \exp\left\{-\frac{\ln[2G^2(\theta_{1/2}^{\perp,\parallel})]}{\sin^2(\theta_{1/2}^{\perp,\parallel})} \sin^2(\theta^{\perp,\parallel})\right\} = G^2(\theta^{\perp,\parallel}) \exp\{-A^2 z^2\}, \quad (1)$$

где квадрат углового фактора Гюйгенса [17]

$$G^2(\theta^{\perp,\parallel}) = \left( \frac{m^2 + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta^{\perp,\parallel})}}{m^2 \cos^2(\theta^{\perp,\parallel}) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta^{\perp,\parallel})}} \right)^2 \cos^2(\theta^{\perp,\parallel}), \quad (2)$$

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

$$A^2 = \frac{\ln[2G^2(\theta_{1/2}^{\perp,\parallel})]}{\sin^2(\theta_{1/2}^{\perp,\parallel})}; \quad (3)$$

$$z^2 = \sin^2(\theta^{\perp,\parallel}), \quad (4)$$

где  $z$  – абсцисса точки гауссовой кривой  $\varphi_g(z) = \exp(-A^2 z^2)$  в декартовой системе координат.

Ограничимся рассмотрением функции, описывающей диаграмму направленности одномодового излучения в вертикальной плоскости. Из (3) видно, что для задания в явном виде этой функции достаточно определить угол расходимости излучения ЛД  $\theta_{1/2}^{\perp}$ , где  $\theta_{1/2}^{\perp}$  – половина полного угла расходимости излучения в вертикальной плоскости  $\theta_{1/2}^{\perp \text{trad}}$ . (Угол  $\theta_{1/2}^{\perp \text{trad}}$  измеряется по традиции, сложившейся в полупроводниковой квантовой электронике, на половинной высоте от максимальной интенсивности (рис.1)).

Действительно, зная угол  $\theta_{1/2}^\perp$ , путем подстановки в (2) вместо переменного  $\theta^\perp$  значения  $\theta_{1/2}^\perp$ , можно определить параметр  $G^2(\theta_{1/2}^\perp)$ , а значит и параметр  $A^2$ . При этом крайне важно, что угол  $\theta_{1/2}^\perp$  может быть быстро определен по нормированной к единице диаграмме направленности на уровне 0,5 (рис.1), а значит, может быть быстро определен и явный вид функции, описывающей диаграмму направленности излучения в вертикальной плоскости.

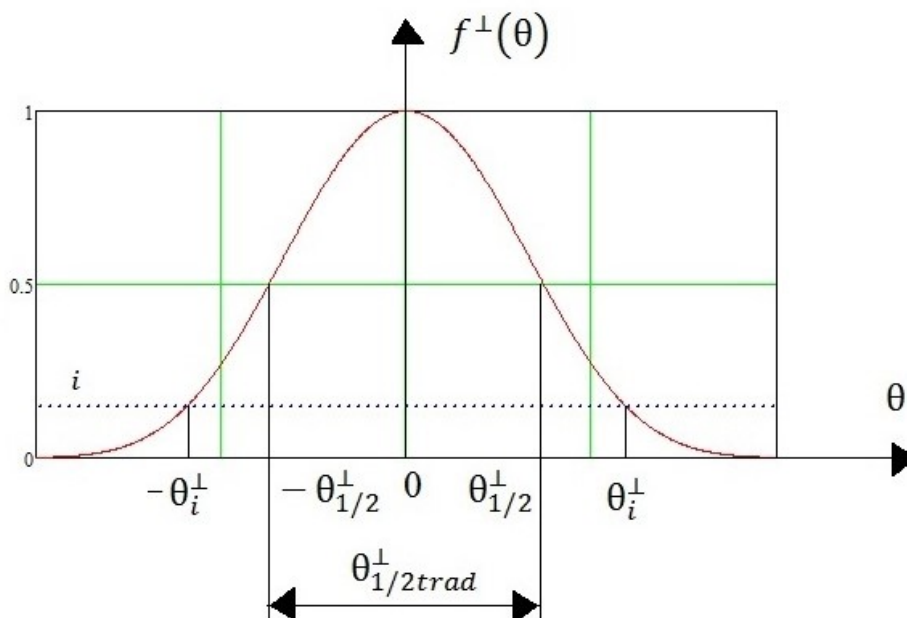


Рис. 1. Определение угла расходимости излучения ЛД в вертикальной плоскости в случае, когда его диаграмма направленности симметрична относительно оптической оси измерительной установки:  $\theta_i^\perp$  и  $\theta_{1/2}^\perp$  – аргументы функции  $f^\perp(\theta)$ , при которых ее значения равны  $i$  и 0,5 соответственно;  $\theta_{1/2}^\perp \text{trad}$  – полный угол расходимости излучения при  $f^\perp(\theta) = 0,5$

Благодаря заданию в явном виде функции, описывающей диаграмму направленности излучения в вертикальной плоскости, существенно упрощается расчет мощности излучения, падающего на  $j$ -ый фотодиод, нормаль к приемной поверхности которого направлена под углом  $\theta_j^\perp$  к оси пучка:

$$P_{\text{падФД}}(\theta_j) = I(0) \int_{\theta_{\min_j}^\perp}^{\theta_{\max_j}^\perp} \int_{-\alpha_{\text{ФД}}}^{\alpha_{\text{ФД}}} f^\perp(\theta, 0) d\alpha \sin(\theta) d\theta, \quad (5)$$

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;  $\theta$  и  $\alpha$  – текущие сферические координаты – полярный и азимутальный угол.

В том случае, когда угловые апертуры двух фотодиодов равны, а сами фотодиоды расположены под разными углами  $\theta_j^\perp$  и  $\theta_{j+1}^\perp$  к оптической оси измерительной системы отношение мощностей излучения, падающего на них, определяется формулой:

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

Если отношение измеренных мощностей излучения, падающего на фотодиоды, равно правой части (6), имеет место одномодовый режим генерации.

Согласно (1) диаграмма направленности излучения одномодового ЛД должна быть симметричной относительно оси лазерного пучка. При симметричной диаграмме направленности для реализации рассматриваемой методики быстрого определения модового состава излучения ЛД в свободное пространство достаточно использовать четыре идентичных фотодиода, попарно расположенных симметрично оптической оси ОЭК под одинаковыми углами  $\theta_j^{\perp}$  или  $\theta_{j+1}^{\perp}$ .

Если при использовании такой конфигурации фотодиодов обнаруживается, что диаграмма направленности не симметрична, то это сигнализирует о нарушении режима генерации ЛД на фундаментальной моде.

### Методика быстрого измерения степени поляризации лазерного излучения

Выше отмечалось, что диафрагма, установленная перед фотодиодом, используемым при измерениях диаграмм направленности излучения ЛД, должна находиться на оптической оси ОЭК. Таким образом, единственной возможностью одновременных измерений модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД остается расположение элементов ОЭК, предназначенных для измерения поляризационного параметра, под некоторыми углами 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 ОЭК [14]. 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 [14]. 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 [8], регламентирующий методы измерений степени поляризации излучения, в том числе сильно расходящегося. Однако анализ состояния поляризации такого излучения, согласно [8], 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.

В качестве поляризационного параметра в [8] был введен контраст  $K$ , значение которого определяется по формуле:

$$K = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{max}}$  и  $P_{\text{min}}$  – соответственно максимальное и минимальное значение мощности лазерного излучения, прошедшего через линейный поляризатор. Согласно [8], 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. Это позволяет обеспечить высокую скорость измерений степени поляризации за счет одновременных измерений значений  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  путем размещения в периферийной части лазерного пучка двух элементов измерительной схемы, каждый из которых состоит из фотодиода с установленной перед ним поляризационной призмой.

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

#

На рис. 2 приведена блок-схема ОЭК, обеспечивающего быстрые измерения модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД в вертикальной плоскости. Ее прототипом в части измерений диаграмм направленности излучения является схема установки, приведенная в [15].

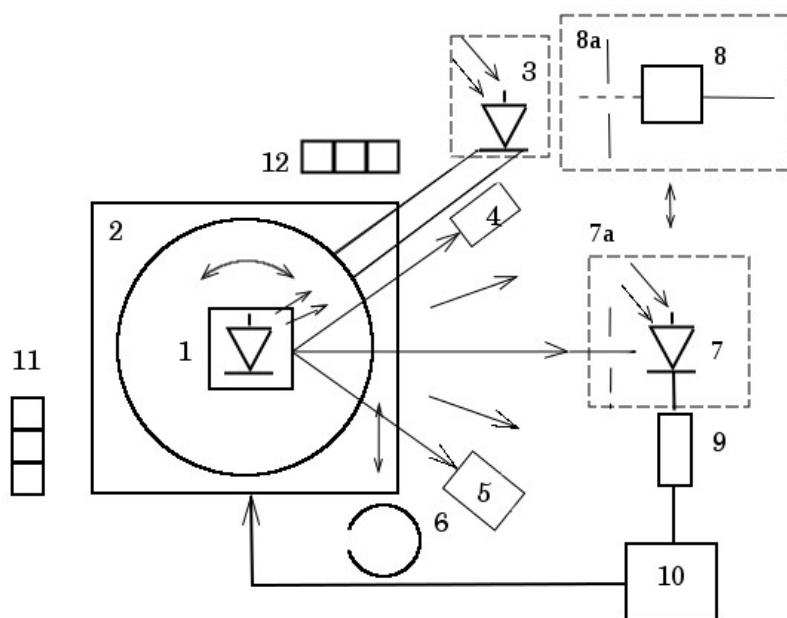


Рис. 2. Схематическое изображение оптико-электронного комплекса для быстрых измерений модовой структуры и степени поляризации лазерного излучения: 1 – диагностируемый ЛД; 2 – поворотный столик, закрепленный на валу шагового двигателя; 3 – приемник-свидетель; 4 и 5 – фотодиодные блоки с шестью фотодиодами и двумя поляризационными призмами; 6 – интегрирующая сфера; 7 – фотодиод с диафрагмой 7a; 8 – планарный первичный измерительный преобразователь ПИП с диафрагмой 8a; 9 – АЦП; 10 – компьютер; 11 и 12 – водяные уровни для совмещения базовой оптической плиты с горизонтальной плоскостью

Диагностируемый лазерный диод 1 находится в державке юстировочного узла, который жестко соединен с поворотным столиком 2. Поворот столика осуществляется шаговым двигателем (на рисунке не показан).

Юстировочный узел развязан от столика и предназначен для компенсации рассогласования осей симметрии корпуса ЛД и лазерного пучка. Излучение, распространяющееся в вертикальной плоскости в периферийной области лазерного пучка, падает на приемную поверхность приемника-свидетеля 3, корпус которого жестко зафиксирован относительно поворотного столика. Этот приемник позволяет непрерывно 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 8a, 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 закрепленным на нем ЛД таким образом, что ось диаграммы направленности снова направляется 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 входят два фотодиода, установленные под углами  $\theta_j^\perp$  и  $\theta_{j+1}^\perp$  к оптической оси измерительной системы, а также фотодиод с установленной перед ним поляризационной призмой. Углы, под которым установлены диафрагмы, ограничивающие апертуры поляризационных призм, равны и определяются как среднее арифметическое значений углов  $\theta_j^\perp$  и  $\theta_{j+1}^\perp$ . Плоскости пропускания призм, размещенных в блоках 5 и 6 симметрично оптической оси ОЭК, скрещены, что позволяет одновременно измерять  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  и таким образом быстро определять контраст, используя (7).

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. Затем ПИП возвращается на прежнее место, то есть на оптическую ось ОЭК.

Во время измерений диаграмм направленности контроль положения ее оси осуществляется с помощью выходных сигналов фотодиодов, расположенных в фотодиодных блоках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность проведения быстрых одновременных измерений модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД. Установлено, что для проведения таких измерений необходимо использовать методики, основанные на определении в явном виде функций, описывающих диаграммы направленности излучения ЛД в вертикальной и горизонтальной плоскости. Изложена общая концепция построения оптико-электронного комплекса для быстрых измерений мощности, модовой структуры и степени поляризации излучения ЛД, основанная на этих методиках. Рассмотрена конструкция комплекса, в которой объединены интегрирующая сфера, а также расположенные под определенными углами к оптической оси ОЭК фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения и поляризационные призмы. Сконструированное средство измерений позволяет проводить быструю диагностику излучения ЛД, тем самым осуществляя экспресс контроль режима накачки неодимового лазера, используемого в качестве генератора одномодового излучения. Такой контроль позволяет создавать качественные источники одномодового и одночастотного лазерного излучения в сине-зеленой области спектра путем удвоения основной частоты генерации неодимового лазера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилов А.М., Гончаров А.Н., Бонерт А.Э. Твердотельный лазер на длине волны 914 нм с узкой линией генерации для стандартной частоты на основе холодных атомов магния // Вестник НГУ. Серия физика. 2009. Т.4, выпуск 3. С. 4 -11.



2. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Булашевич К.А., Хохлев О.В., Карпов С.Ю. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. 1. Термические механизмы ограничения выходной мощности // Научное приборостроение. 2012, Т. 22, №3. С.78-86.
3. Bliznyuk V.V., Berezovskaya N.V., Brit M.A., Koval O.I., Parshin V.A., Rzhанov A.G. Experimental Study of the Characteristics of High-Power Laser Diode Radiation in the Above-Threshold Mode for Degradation Analysis // Physics of Wave Phenomena. 2017. V. 25, № 2. PP. 1-6.
4. ГОСТ Р ИСО 11554-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.
5. ГОСТ 8.275-2013. Государственная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.
6. ГОСТ Р ИСО 11146-2-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 2. Астигматические пучки. М.: Стандартинформ, 2009. 25 с.
7. ГОСТ Р ИСО 13694 – 2011 Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений распределения плотности мощности (энергии) лазерного пучка. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.
8. ГОСТ Р ИСО 12005 – 2013 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Поляризация. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
9. Проспект продукции фирмы OPHIRO. 2014. [www.ophiropt.com](http://www.ophiropt.com). 126 с.
10. 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 квантово-размерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs, легированных углеродом // Квантовая электроника. 2009. Т.39, № 1. С. 18-20.
11. 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. 2002. Т.32, № 12. С. 1099-1104.
12. Проспект продукции фирмы COHERENT. 2014. [www.Coherent.com](http://www.Coherent.com). 144 с.
13. Дьячков Н.В., Богатов А.П. Измерение параметров Стокса излучения полупроводниковых лазеров // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 10. С. 869-874.
14. Близинок В.В., Березовская Н.В., Паршин В.А., Тарасов А.Е. Оптико-электронный комплекс для измерений основных параметров лазерного диода в свободное пространство // Естественные и технические науки. 2016. № 8. С. 29-33.
15. 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. 2000. Т. 30, № 5. С. 401-405.
16. Bliznyuk V. V., Berezovskaya N. V., Parshin V. A., Tarasov A. E. 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. PP. 85-86.
17. Thompson G.H.B. Physics of semiconductor laser devices. N.Y.: J. Wiley and Sons, 1980. PP. 185 – 186.

V.V. Bliznyuk

*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail:4059541@mail.ru*

**MULTIFUNCTION OPTO-ELECTRONIC COMPLEX FOR DIAGNOSTIC OF  
THE RADIATION LASER DIODE IN FREE SPACE**

*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 is shown.*

LASER DIODE, DIRECTIONAL RADIATION PATTERN, FUNDAMENTAL MODE,  
DEGREE OF POLARIZATION, FREQUENCY DOUBLE