

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

© 2022 г. П. В. Аракчеев<sup>а</sup>, В. Л. Безделов<sup>а</sup>, Е. В. Бурый<sup>а,\*</sup>, А. И. Данилов<sup>б</sup>, С. М. Сапожников<sup>б</sup>, Д. А. Семеренко<sup>а</sup>, И. Ю. Ударов<sup>а</sup>, А. Л. Шлеменков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1*

<sup>б</sup> *Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха  
Россия, 113342, Москва, ул. Введенского, 3*

*\*e-mail: buryi@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 03.04.2022 г.

Сформулированы основные проблемы измерения пространственного распределения интенсивности излучения мощных импульсных полупроводниковых лазеров и представлены технические решения для проведения таких измерений в широком диапазоне температур. Продемонстрированы особенности визуализации полученных результатов, сделан вывод о том, что анализ параметров зарегистрированных распределений позволяет определять влияние температуры на развитие генерационных процессов в полупроводниковых лазерах и принимать решения о возможных областях применения исследуемых излучателей в оптико-электронных приборах.

DOI: 10.31857/S0032816222050019

### ВВЕДЕНИЕ

При измерении параметров поля излучения полупроводникового лазерного диода (ЛД) исследователи обычно ограничивались получением оценок расходимости пучка лазерного излучения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [1, 2]. Этих параметров было достаточно для принятия решения о применении излучателя в соответствующих различных оптико-электронных устройствах.

Создание оптоэлектронных приборов – излучателей, содержащих линейные и прямоугольные массивы ЛД (а также массивы других конфигураций), – принципиально изменило совокупность необходимых оценок параметров поля излучения. Параметров расходимости излучения в двух плоскостях уже недостаточно: тело свечения излучателей имеет максимальный поперечный размер в несколько десятков миллиметров, результирующее поле излучения представляет собой результат сложения полей множества ЛД, параметры которых зависят как от тока накачки, так и от температуры излучателя. Вследствие этого возникла необходимость измерения интенсивностей результирующего поля излучения в различных точках пространства и по-

строения 3D-моделей этого поля при различных температурах излучателя.

### ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерение интенсивностей поля излучения дальней зоны целесообразно осуществлять в сферической системе координат, регистрируя интенсивности поля  $N$  точечными фотодетекторами, расположенными на окружности радиуса  $R$  в плоскости  $P$  (рис. 1). Угол  $\Delta\beta$  выбирается таким, чтобы обеспечить требуемое пространственное разрешение в плоскости  $P$ . Последовательный поворот плоскости  $P$  вокруг оси  $OZ$  на угол  $\alpha$  позволяет получить оценки интенсивностей формируемого излучателем поля на сферической поверхности радиуса  $R$ . Очевидно, что величина  $R$  должна превышать расстояние, на котором находится граница между дальней и ближней зонами поля излучения [3].

При больших значениях  $R$ , превышающих 0.5 м, реализация предлагаемого способа регистрации оказывается технически трудно осуществимой. Выполнение измерений требует использования защитного купола, который должен поглощать мощное лазерное излучение для исключения влияния

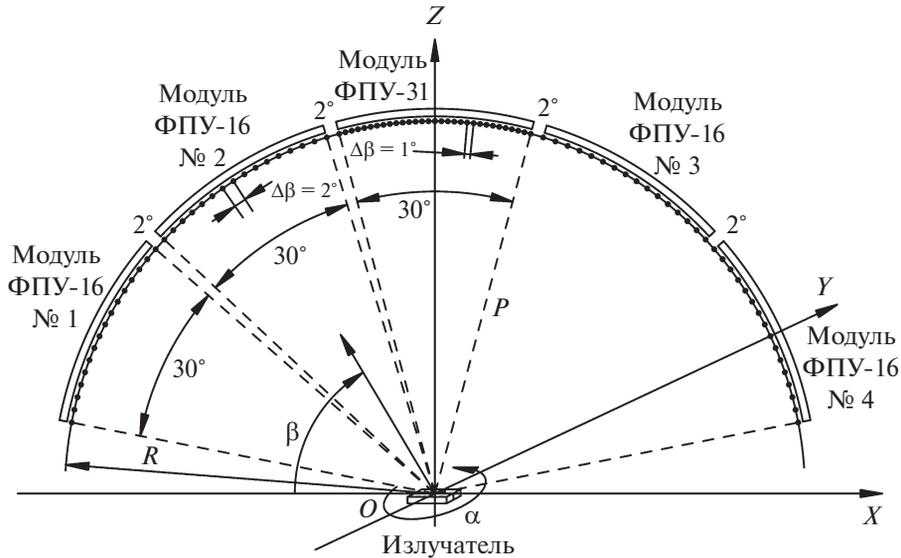


Рис. 1. Размещение фотодетекторов на плоскости  $P$ , положение которой определено в сферической системе координат.

на результаты измерений излучения, рассеянного сторонними предметами в окружающем пространстве, а также обеспечивать защиту персонала.

Вместе с тем этот защитный купол должен оказывать минимальное влияние на результаты измерений, т.е. иметь малые коэффициенты отражения и рассеяния для “скользящих” лучей.

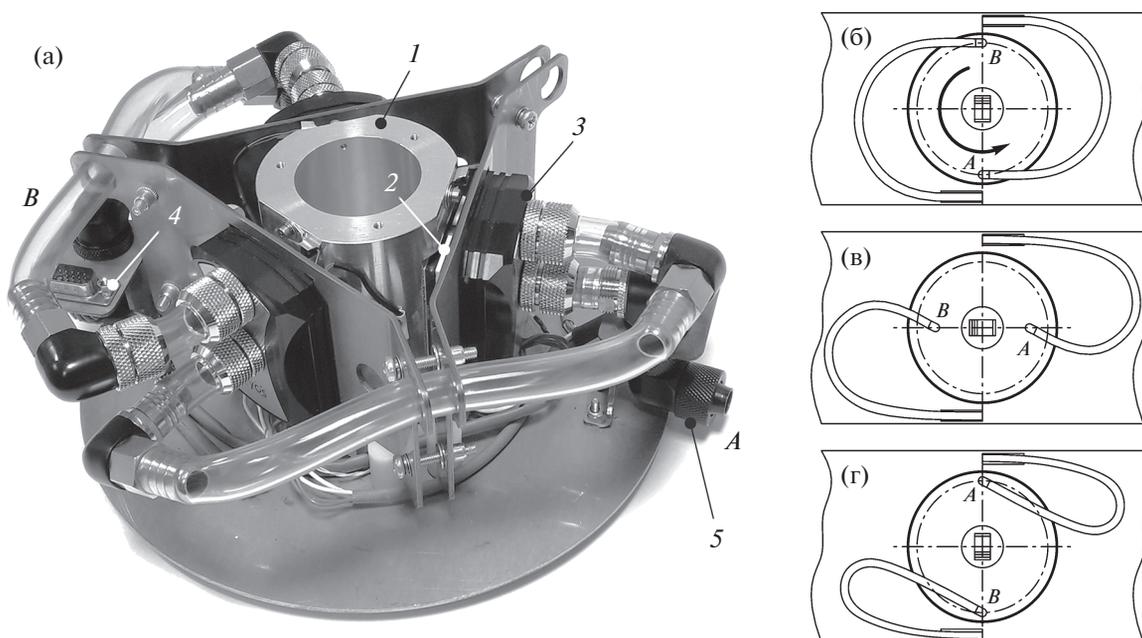
Вращение излучателя вокруг оси  $OZ$ , при том что регистрирующие его излучение фотодетекторы остаются неподвижными, позволяет вместо купола использовать защитный кожух существенно меньших размеров и объема. Такое решение облегчает проведение исследований при пониженной температуре излучателя, когда на его выходном защитном стекле возможно образование конденсата водяного пара. Для предотвращения этого процесса в окрестность выходного окна излучателя подается поток осушенного газа, например азота, полученного путем испарения его жидкой фазы в сосуде Дьюара.

Минимизация ошибок измерения, обусловленных отражением мощного лазерного излучения от боковых поверхностей защитного кожуха, достигалась путем их покрытия водоземulsionной краской “Пенталкид чернено-черная глубокоматовая” (изготовитель Завод индустриальных эмалей АЛЪП ЭМАЛЬ). Применение этой краски позволило снизить интенсивности рассеянных “скользящих” световых потоков (при угле падения  $\geq 80^\circ$ ) до значений, не превышающих 1% от интенсивности падающего потока. Полученные значения не достигли известных рекордных [4]. Однако они свидетельствуют о том, что в этом случае обеспечивается возможность выполнения

измерений с гарантированной относительной погрешностью менее 5%.

Для реализации такой достаточно простой схемы построения измерителя требуется осуществлять регистрацию полей с существенно различающимися средними величинами интенсивности. Применение нейтральных светофильтров для контролируемого ослабления излучения в непосредственной близости от тела свечения ЛД невозможно как из-за возникающих искажений структуры поля в результате преломления лучей лазерного пучка при прохождении через границу раздела материал светофильтра—воздух и пространственной неоднородности коэффициента поглощения этого материала, так и из-за френелевского отражения лучей широкоугольного пучка. Такие светофильтры можно устанавливать только на малом расстоянии от чувствительной площадки фотодетектора. В этом случае указанные факторы практически не будут влиять на результаты измерений. Вместе с тем коэффициент передачи каждого фотоприемника должен быть учтен для обеспечения необходимого линейного диапазона регистрации сигнала.

Коммутация фотодетекторов, размещенных в различных точках пространства, выполняемая синхронно с моментами времени формирования импульсов тока накачки ЛД, сокращает число каналов связи, по которым передаются аналоговые сигналы в модули цифровой обработки сигналов (ЦОС). Группы из  $M$  одновременно используемых для регистрации излучения фотодетекторов реконфигурируются так, чтобы регистрировать интенсивности в тех областях, угловые координаты которых различаются на величину шага разме-



**Рис. 2.** а – вращающийся модуль термостабилизации (1 – теплопровод, 2 – термоэлектрический охладитель, 3 – теплообменник, 4 – разъем подключения кабеля электропитания термоэлектрических охладителей и терморезисторов, 5 – поворотный штуцер); б–г – схемы положений шлангов теплоносителя и совмещенных с ними кабелей электропитания термоэлектрических охладителей этого модуля в исходном состоянии при  $\alpha = 0^\circ$  (б),  $90^\circ$  (в),  $180^\circ$  (г). А – вход потока теплоносителя; В – выход.

шения  $\Delta\beta$  фотодетектора. Число  $K$  таких конфигураций определяется соотношением  $M(K - 1) + (M - 1) = N$  (в лабораторном образце реализованы 7 групп по  $M = 12$  фотодетекторов в каждой, центральная группа содержит 11 фотодетекторов в силу симметрии относительно вертикальной оси, число конфигураций  $K = 8$ ). Соответственно цикл измерений отсчетов интенсивности при выбранной величине угла поворота  $\alpha$  излучателя заканчивается после формирования  $K$ -го импульса тока накачки.

Еще одно важное требование – защита каналов регистрации интенсивности излучения от воздействия помех, источником которых являются импульсы тока накачки. Характерная амплитуда этих импульсов, формируемых генератором импульсов тока, от 50 до 150 А, а падение напряжения на нагрузке может составлять несколько десятков вольт.

### РЕАЛИЗАЦИЯ АППАРАТУРЫ

При реализации описанного кинематического решения необходимо обеспечить термостабилизацию вращающегося излучателя. Значение температуры должно устанавливаться и поддерживаться с погрешностью не хуже  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  в значительных пределах – от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Для выполнения этих требований используются три термоэлектрических охладителя, установленных

на боковой поверхности теплопровода (рис. 2). “Горячие” поверхности этих элементов охлаждаются медными микроканальными теплообменниками Cuplex Kryos [5], в которых циркулирует теплоноситель на основе пропиленгликоля ЭКО-30. Поток теплоносителя последовательно проходит через теплообменники для обеспечения равенства потоков теплоносителя в каждом из них.

Температура теплопровода (рис. 2а) непрерывно контролируется тремя терморезисторами, которые включены в цепи обратной связи трех каналов регулирования токов термоэлектрических охладителей. Такая структура системы термостабилизации обусловлена тем, что температура теплоносителя изменяется после прохождения каждого теплообменника и различаются функции холодопроизводительности каждого термоэлектрического охладителя. Поэтому при использовании одного канала регулирования, объединяющего все термоэлектрические охладители, поле температур теплоотвода оказывается менее однородным, чем при использовании независимых каналов регулирования.

Этот вывод косвенно подтвержден результатами работы [6]. Тепловой поток, формируемый окружающей средой при температуре воздуха  $25^\circ\text{C}$  и температуре теплопровода  $-10^\circ\text{C}$ , оценен в 36 Вт (без выделения тепла излучателем суммарная потребляемая мощность цепями питания трех термоэлектрических охладителей при под-

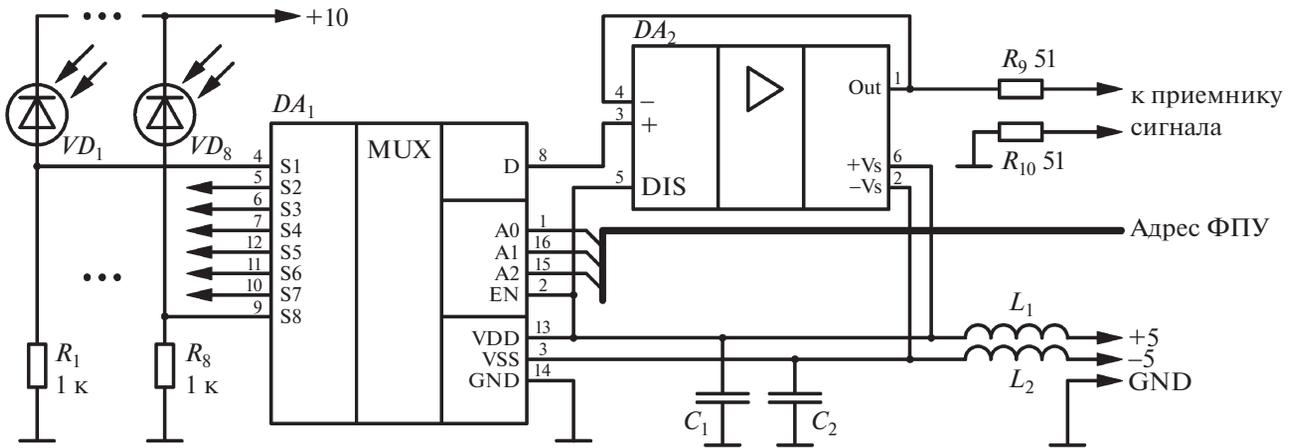


Рис. 3. Электрическая схема узла фотодиодов модулей ФПУ-16 и ФПУ-31.  $VD_1$ – $VD_8$  – BPW34;  $DA_1$  – ADG1208;  $DA_2$  – ADA4897-1;  $C_1, C_2$  – 0.1 мкФ;  $L_1, L_2$  – BLM18EG601.

держании этой температуры постоянной составила 75 Вт, а при выделении 10 Вт тепла энергопотребление возросло до 135 Вт).

Оценки реализуемой температуры излучателя при выделении им теплового потока величиной  $\leq 5$  Вт показали, что она лежит в диапазоне значений от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$  при температуре воздуха  $+25^\circ\text{C}$  и температуре хладагента  $-10^\circ\text{C}$ .

Поток теплоносителя проходит через два угловых поворотных сочленения, что позволяет поворачивать излучатель на угол  $\pm 120^\circ$  без существенной деформации подводящего и отводящего теплоноситель шлангов (рис. 2б) и при незначительном моменте сил, тормозящих вращение подвижного узла. Его вращение осуществляется шаговым двигателем с червячной передачей. Итоговая погрешность установки положения этого узла составляет  $\pm 0.1^\circ$ , что вполне достаточно для регистрации отсчетов поля интенсивностей излучателя с высоким пространственным разрешением.

Регистрация излучения осуществляется  $N = 95$  кремниевыми фотодиодами с площадью фоточувствительной площадки каждого  $7.5 \text{ мм}^2$ . Фотодиоды смонтированы на печатных платах таким образом, что в центральном секторе, в котором установлен модуль фотоприемного устройства (ФПУ), содержащий 31 фотодиод, коммутатор и согласующие каскады, угол между осями фотодиодов составляет  $1^\circ$ , а в боковых секторах, в которых установлены модули ФПУ с 16 фотодиодами, этот угол равен  $2^\circ$  (см. рис. 1). Такое размещение модулей ФПУ позволяет регистрировать форму диаграммы направленности излучателя с большим разрешением в ее центральной части – области, где, как правило, наблюдаются наиболее значимые отклонения отсчетов диаграммы направленности от средних значений для различных экземпляров излучателей и требуется их детальная регистрация.

Импульсы напряжения, формируемые на нагрузках фотодетекторов (рис. 3), коммутируются и усиливаются, после чего регистрируются в модулях ЦОС (рис. 4). Передача дифференциальных пар аналоговых сигналов по двухпроводным линиям позволяет получать удовлетворительное отношение сигнал/помеха, при том что длина этих линий в конструкции измерителя (рис. 5) достигает 1.8 м, а импульсы тока накачки излучателя имеют амплитуду до 150 А. В каждом модуле ЦОС, построенном на основе программируемой логической интегральной схемы Xilinx серии Spartan-6, предусмотрена трехступенчатая регулировка коэффициента передачи сигнала, регистрируемого приемником с линии (реализованы соотношения амплитуд входных и выходных сигналов 1:1, 1:8 и 1:64), и осуществляется компенсация постоянного уровня напряжения в этом сигнале. Для этого в интервалах времени длительностью  $\geq 10$  мс между моментами формирования импульсов тока накачки поочередно, при формировании соответствующих адресов ФПУ, в каждом модуле ЦОС осуществляется измерение величин постоянного смещения, которые запоминаются и используются для формирования цифроаналоговыми преобразователями компенсационных напряжений при регистрации излучения. Тем самым согласуются динамические диапазоны аналого-цифрового преобразователя и сигналов, поступающих от модулей ФПУ.

Поскольку интенсивность излучения отдельных ЛД от импульса к импульсу может меняться за счет различных квантовых эффектов, предусмотрено выполнение операции усреднения  $L$  получаемых отсчетов интенсивности (обычно число  $L$  выбирается в диапазоне от 3 до 10). Для каждого канала регистрации интенсивности излучения выполняется масштабирование результата в соответствии с матрицей  $\mathbf{W}$  коэффициен-

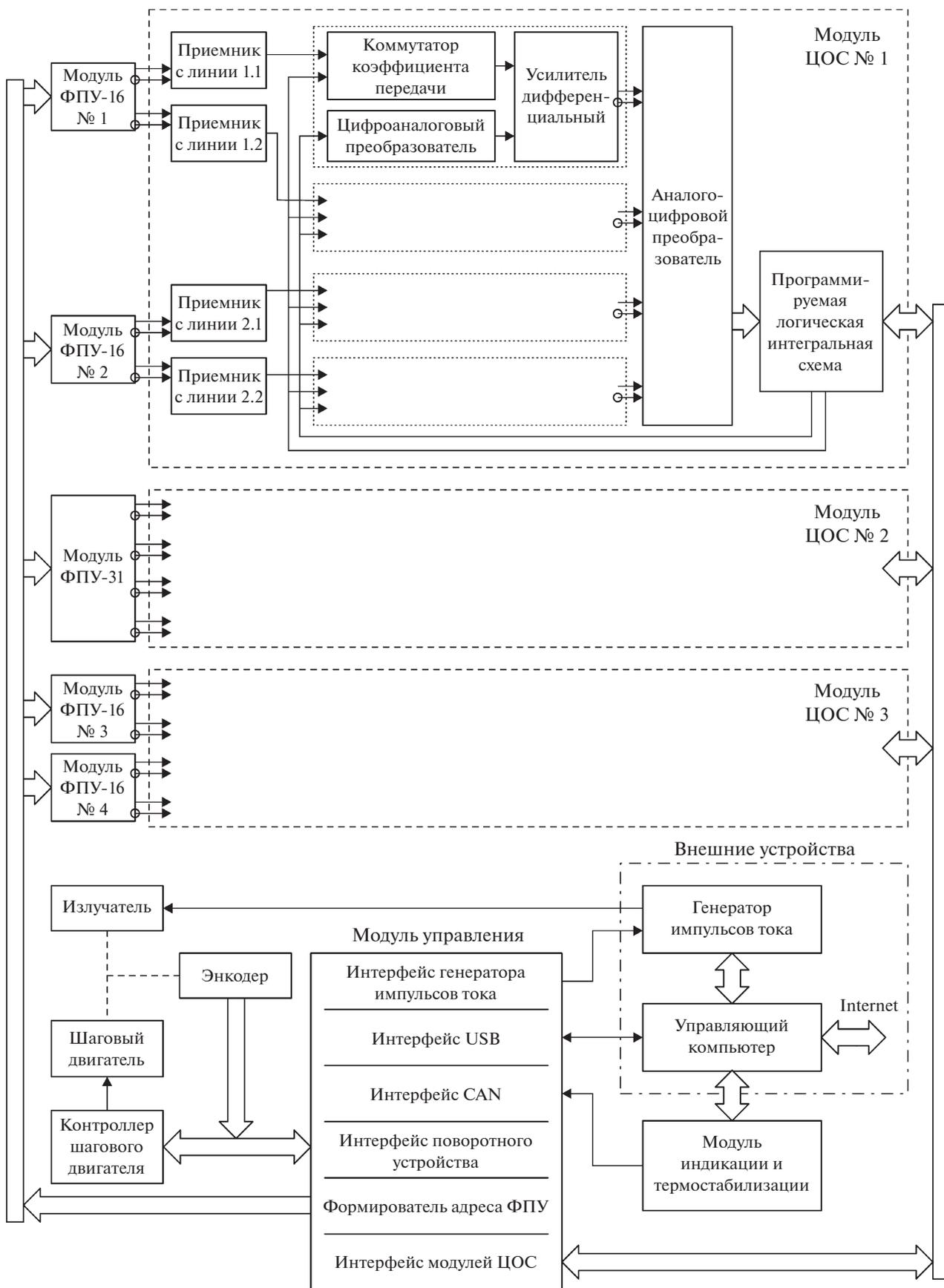


Рис. 4. Функциональная схема измерителя.

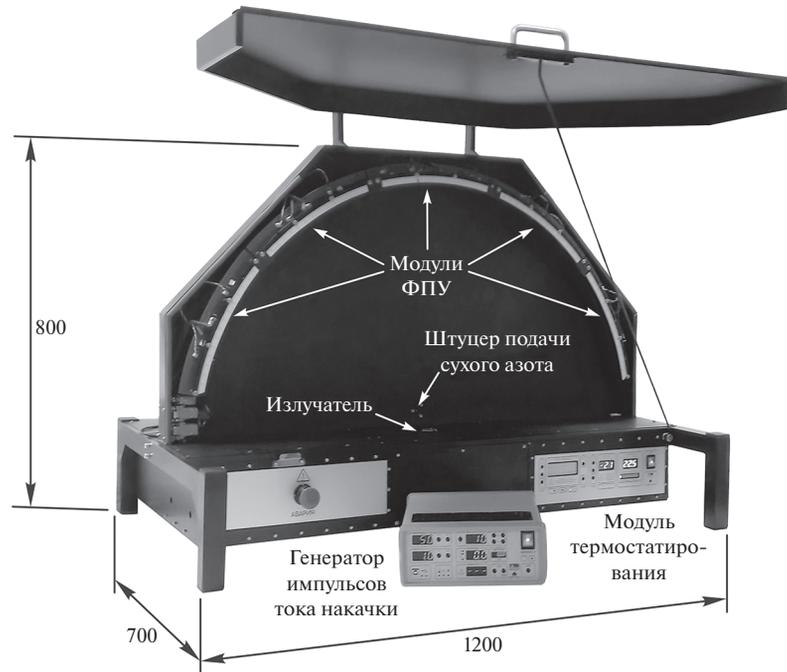


Рис. 5. Конструкция измерителя (крышка защитного кожуха открыта).

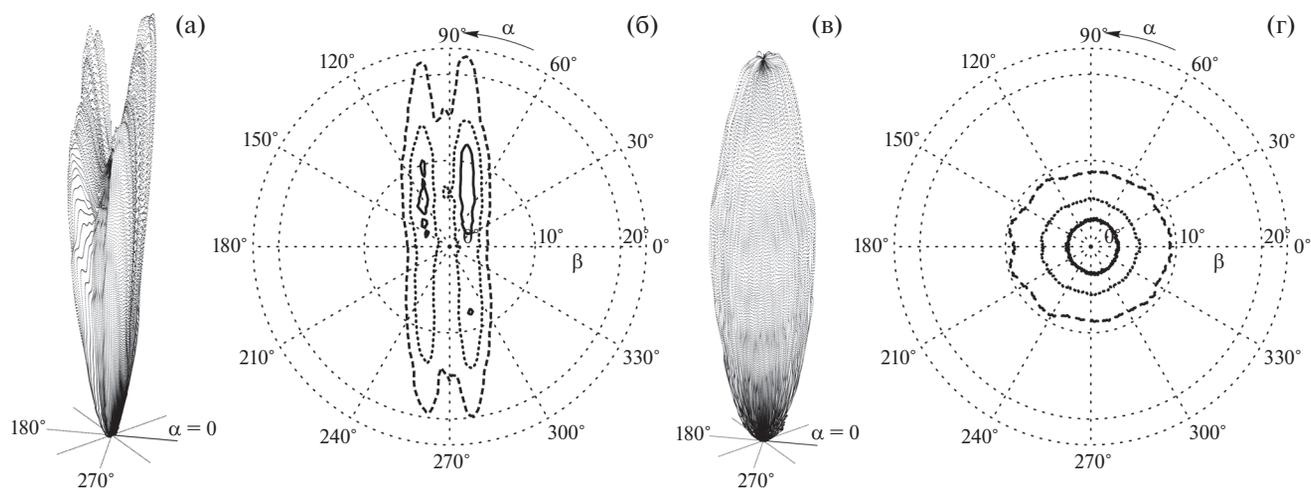
тов, полученных при тарировке измерителя. Тарировка выполняется путем перемещения в плоскости  $P$  по радиусу  $R_i = 400$  мм излучателя с диаграммой направленности, квазиравномерной в области максимума, и регистрации интенсивности излучения каждым фотодетектором. Сам тестовый излучатель образован решеткой ЛД, расположенной на расстоянии 40 мм от матированного стекла с  $R_z = 30$  мкм. Коэффициенты, образующие матрицу  $\mathbf{W}$ , вычисляются по формулам:  $w_i = I^{\max} / I_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $I^{\max} = \max(I_i)$ , а  $I_i$  – интенсивность излучения, зарегистрированного  $i$ -м фотодетектором.

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Угол  $\alpha$  поворота модуля термостабилизации с установленным излучателем определяется относительно оси  $OX$  неподвижной системы координат, связанной с корпусом измерителя. Для определения величины этого угла использован энкодер, формирующий  $2^{12}$  отсчетов за один оборот модуля вокруг оси  $OZ$ . Результат измерения угла поворота совместно с зарегистрированными каждым фотодетектором значениями интенсивностей сохраняются управляющим компьютером в файле данных после усреднения по заданному числу измерений  $L$ . На основе полученных данных строится 3D-модель поверхности, отображающая пространственное распределение интенсивности поля, создаваемого излучателем. Поскольку все распространенные программные

продукты предназначены для построения поверхностей либо в декартовой, либо в полярной системах координат, поверхность предложено аппроксимировать совокупностью плоских треугольных конечных элементов, определяемых в соответствии с рекомендациями [7], а для их визуализации использовать программы MATLAB или AutoCAD. В результате удается увидеть особенности распределений интенсивности излучения излучателей различных типов (рис. 6) и установить источник их возникновения. По мнению авторов, удачным решением является динамическая визуализация 3D-модели при изменении направления взгляда, позволяющая исследователю за короткий промежуток времени оценить форму модели. Примеры таких реализаций представлены в [8].

Двумерные распределения позволяют отслеживать особенности генерационных процессов в ЛД. Так, например, зарегистрированное уширение диаграммы направленности при увеличении температуры в плоскости, перпендикулярной  $p$ – $n$ -переходу ЛД, связано, по-видимому, с изменением показателей преломления слоев эпитаксиальной структуры в зависимости от температуры, что изменяет характер возникновения дифракции при выходе излучения из активной области ЛД в воздушную среду.



**Рис. 6.** 3D-визуализация экспериментально полученных диаграмм направленности излучателей типа 1 (а) и типа 2 (в), выполненная без соблюдения взаимного масштаба, и контуры сечений диаграмм (б, г), представленных в сферической системе координат: непрерывная линия – контур сечения по уровню 0.9 от максимального значения интенсивности; точки – сечение по уровню 0.7; штриховая линия – сечение по уровню 0.5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ параметров зарегистрированных распределений интенсивности излучения позволяет принимать решения о возможности применения исследуемых импульсных лазеров в различных областях оптико-электронного приборостроения.

Эти же параметры являются источником информации о происходящих генерационных процессах и могут служить основой методов неразрушающего контроля, применяемых для определения параметров надежности выпускаемых изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хирд Г. Измерение лазерных параметров / Пер. с англ. М.: Мир, 1970.
2. ГОСТ 26086-84. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения. Введен 01.07.85.
3. Бурый Е.В., Косых А.Е., Грудень М.Н., Ветров В.Д. // ПТЭ. 1996. № 4. С. 119.
4. Jackson J.J., Puretzky A.A., More K.L., Rouleau C.M., Eres G., Geohegan D.B. // ACS Nano. 2010. V. 4. № 12. P. 7573. <https://doi.org/10.1021/nn102029y>
5. Konovalov D.A. // Journal of Engineering and Thermophysics. 2016. V. 89. № 3. P. 636. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1421-9>
6. Аракчеев П.В., Безделов В.Л., Бурый Е.В. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 10. С. 678. <https://doi.org/10.17587/mau.17.678-685>
7. Бурый Е.В. Импульсная лазерная локация: физические и информационные основы новых возможностей. М.: Наука, 2020.
8. <http://llis.bmstu.ru/ref/view3D.html>