

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Одной из важнейших характеристик лазеров, наряду с энергетическими, спектральными и временными характеристиками, является расходимость пучка и распределение интенсивности по диаметру пучка. Знание расходимости необходимо для расчета оптико-электронных систем, обеспечивая эффективного ввода лазерного излучения в волокно.

Часто пользуются понятиями энергетической и угловой расходимости [1]. Под энергетической расходимостью лазера понимают плоский или телесный угол при вершине конуса, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности излучения. Угловой расходимостью называют плоский или телесный угол, характеризующий направленность пучка излучения лазера по заданному уровню угловой плотности энергии или мощности излучения от ее максимального значения. Чаще всего определяют расходимость на уровне половинной интенсивности или на уровне уменьшения интенсивности в e раз от максимальной величины. Каждое из определений справедливо для сравнительно однородного по сечению пучка, соответствующего основному типу колебаний резонатора лазера (TEM_{00q}). Понятие расходимости для многомодового излучения является в некотором смысле неопределенным. В этом случае говорят о диаграмме направленности (ДН) излучения, понимая под этим угловое распределение энергии или мощности излучения в пространстве в дальней зоне [1]. В лазере могут одновременно возбуждаться большое число угловых и продольных типов колебаний, в результате ДН может иметь иррегулярную форму, причем в некоторых случаях, например, в полупроводниковых лазерах, основная часть энергии может быть сосредоточена не в центральном, а в боковых лепестках диаграммы направленности [2]. В этом случае под углом расходимости иногда понимают угол между асимптотами линий максимальных амплитуд, наиболее удаленных от оси резонатора [3].

Понятие расходимости относится к дальней зоне излучения лазера, то есть к таким расстояниям $R \gg D^2/\lambda$ (D - выходная апертура лазера, λ - длина волны излучения), где погрешность в фазах колебаний, складывающихся от всех элементарных участков апертуры, мала

по сравнению с π . При меньших расстояниях угловое распределение интенсивности зависит от расстояния R . Это необходимо учитывать при проведении экспериментальных измерений.

Известны 3 метода определения расходимости лазерного излучения. Это методы сечений, фокального пятна и регистрации диаграммы направленности [3-5]. В свою очередь они подразделяются на большое число вариантов в зависимости от способа регистрации. Рассмотрим кратко суть этих методов и описанные в литературе модификации.

1. Метод сечений пучка (рис.1)

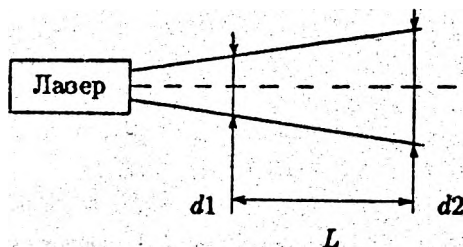


Рис.1. Определение расходимости методом двух сечений

Согласно этому методу расходимость определяют следующим образом. Измеряют диаметры d_1 и d_2 двух поперечных сечений пучка в дальней зоне, расположенных на расстоянии L друг от друга, и вычисляют искомый угол по формуле

$$\Theta = \arctg\{(d_2 - d_1)/L\}. \quad (1)$$

В частном случае в качестве одного из сечений берут диаметр пучка непосредственно на выходном зеркале резонатора. Тогда L представляет собой расстояние от лазера до экрана, на котором измеряется диаметр поперечного сечения пучка [3]. Измерения диаметров d_1 и d_2 выполняются по одному и тому же критерию - заданному уровню интенсивности либо заданной доле энергии. Достоинством метода является его простота, однако для получения нужной точности требуется большое расстояние L (порядка десятков и сотен метров). Поэтому для применения метода в лабораторных условиях требуется многократное переотражение луча с применением зеркальных или призматических систем.

2. Метод фокального пятна

Как известно, идеальная безаберрационная положительная линза преобразует плоский фронт волны в сферический, который сходится в ее фокусе. Излучение лазера отличается от плоской волны и в фокальной плоскости образует пятно радиусом r_0 , полностью подобное распределению в дальней зоне. Расходимость определяется по формуле

$$\Theta = \operatorname{arctg} 2r_0/f \cong 2r_0/f, \quad (2)$$

где f - фокусное расстояние линзы. В этом методе следует использовать длиннофокусные линзы с большой апертурой. Линза может быть установлена в любой точке вдоль оси распространения луча [6]. Измерения сводятся к точному измерению r_0 . Преимуществом метода является возможность применения в лабораторных условиях ввиду отсутствия необходимости больших расстояний, недостатком - использование дополнительной оптики.

3. Метод регистрации диаграммы направленности [3]

Фотоприемник (ФП) с диафрагмой малого диаметра (либо с узкой щелевой диафрагмой) перемещают по дуге окружности радиуса R , в центре которой находится лазер, и регистрируют распределение интенсивности излучения по углам. Угловое разрешение $\Delta\Theta \leq b/R$, где b - размер диафрагмы ФП, R - расстояние от лазера до ФП. В процессе регистрации ДН мощность лазера должна поддерживаться постоянной. Как и в методе сечений, ФП должен быть удален на достаточное расстояние от лазера, чтобы формирование дальней зоны излучения можно было считать законченным. При меньших расстояниях распределение интенсивности по углам будет зависеть от расстояния. В случае излучателя с прямоугольной апертурой (например, полупроводникового лазера) необходимо снимать ДН в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Метод регистрации ДН применяется большей частью для полупроводниковых лазеров, метод фокального пятна - для твердотельных, метод двух сечений - для непрерывных газовых лазеров. Это обусловлено особенностями пространственного распределения излучения этих источников когерентного излучения. Однако применение того или иного метода определяется стоящей задачей и наличием необходимой регистрирующей аппаратуры.

Следует отметить, что метрологическая аттестация лазеров предполагает использование для определения угловой расходимости лазерного излучения двух первых методов - метода двух сечений и метода

фокального пятна [1], при этом для измерения диаметра пучка выделены два метода - метод калиброванных диафрагм и метод относительного распределения энергии (мощности) лазерного излучения, который, в свою очередь, подразделяется на метод последовательного анализа и матричный метод параллельного анализа, регламентированные стандартом [7]. Международная Организация по Стандартизации (ISO) рекомендует как наиболее подходящий метод фокального пятна [8]. В то же время, метод ДН позволяет получить наиболее полную информацию о пространственном распределении излучения лазера, а после определенной обработки ДН (например, интегрирования по энергии) можно получить информацию об угле расходимости.

Как указывалось выше, основные методы определения расходимости лазерного излучения насчитывают большое число модификаций в зависимости от способов регистрации: фотографические, термографические, фотоэлектрические методы, метод электронно-оптического преобразования, телевизионный, голографический, интерферометрический метод и т.д. Кроме того, возможны различные технические дополнения к этим методам, например, использование микроскопа, скоростной фоторегистрации и др. Большие возможности для обработки информации предоставляет использование автоматизированных систем на базе ЭВМ. В качестве одного из примеров можно привести описанную в работе [9] установку для измерения расходимости излучения твердотельного лазера на АИГ: Na^{3+} , реализующую метод фокального пятна с использованием в качестве приемника ПЗС-матрицы форматом 128x128 элементов и мини-ЭВМ типа ДВК-2. Установка обеспечивала угловое разрешение 15", а объем ОЗУ 1 Мбайт позволял регистрировать в реальном масштабе времени 256 пугов из 64 импульсов с длительностью от 5 нс до единиц секунд.

Работоспособностью метода фокального пятна является метод с использованием зеркального клина [10,11], облегчающий обработку результатов и повышающий точность. Зеркальный клин с углом 20-40° вводится на пути пучка после линзы, фоторегистратор можно устанавливать или в проходящем через клин, или в отраженном от клина пучках излучения. В другом варианте в фокальной плоскости линзы помещают светорассеивающий экран, а на нем на расстоянии L наблюдают на еще одном экране пятнистую картину, размер зерен которой обратно пропорционален размеру фокального пятна на экране [12]. Теоретические выкладки свидетельствуют о возможности восстановления формы фокального пятна с помощью Фурье-преобразования резуль-

татов измерения статистических характеристик на втором экране, но система в целом получается громоздкой и вряд ли пригодна для широкого использования [12].

Измерение расходимости методом фокального пятна дает возможность при несложной модернизации оптической системы одновременно регистрировать картину излучения в ближней зоне [13]. После длиннофокусной линзы, установленной на расстоянии $2f$ от лазера, на пути луча помещают кварцевую плоскопараллельную пластинку под углом к оптической оси, действующую как расщепитель луча, после чего в отраженных лучах на расстоянии f от линзы регистрируют картину дальнего поля (и определяют расходимость), а в проходящих лучах на расстоянии $2f$ от линзы наблюдают картину ближнего поля.

В работе [14] предложен беслинзовый метод определения расходимости, не требующий больших расстояний. Метод основан на прохождении лазерного луча через двулучепреломляющий кристалл KDP , помещенный между скрещенными поляризатором и анализатором таким образом, что обыкновенная ось кристалла образует угол 45° с поляризатором. В таком случае через анализатор проходят те лучи, для которых фазовая задержка между обыкновенной и необыкновенной поляризациями составляет четное число π , а лучи с фазовой задержкой $2n\pi$ дают нулевую интенсивность. Наблюдая картину полос после анализатора, можно рассчитать расходимость лазерного луча. Следует отметить, что ранее предлагалось использовать систему из двух поляризаторов и двулучепреломляющего кристалла для измерений флуктуаций диаметра лазерного луча (к чему по сути и сводится измерение расходимости) [15]. Хотя предложенный в [15] измеритель имеет дополнительные оптические элементы и довольно сложную электронную часть, сам принцип измерений тот же, что и в работе [14].

Метод, аналогичный методу двух сечений, но не требующий точного фотометрирования, описан в работе [16]. В ближнем к лазеру сечении помещают трафарет в виде решетки с известным периодом d_1 , а во втором сечении на экране измеряют период "тени" d_2 и диаметр D_2 , вычисляя затем расходимость по формуле $\Theta = (D_2/d_1) \times (d_2 - d_1)/2L$.

В методе двух сечений не учитывается кривизна волнового фронта, что вносит погрешность в определение угла расходимости [17]. Как схематично показано на рис.2 для точечного излучателя, радиус кривизны волнового фронта R можно в расчетах заменять величиной расстояния L лишь при больших L . Для точного определения угла расходимости по измерениям диаметров сечений луча представляет интерес

одновременный контроль кривизны волнового фронта, который можно осуществлять голографическими или интерференционными методами с высокой точностью. В [17] для этого предложен метод с двумя оптическими клиньями, не требующий сложной аппаратуры.

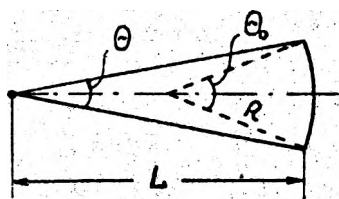


Рис.2. Учет кривизны волнового фронта при определении угла расходимости лазерного излучения

Точность измерения угловой расходимости и распределения интенсивности по сечению пучка в значительной степени определяется способом регистрации излучения. Можно выделить следующие основные варианты, использующие первичные измерительные преобразователи различных типов:

1) Фотографические методы, заключающиеся в фотографировании пятна и последующем фотометрировании снимка. Эти методы являются довольно распространенными, поскольку фотоматериалы доступны и обладают достаточно высокой чувствительностью. Фоторегистрация использовалась для определения расходимости лазерного излучения, например, в работах [13, 10, 18]. Недостатками такого метода являются необходимость фотохимической обработки и микрофотометрирования (следовательно, отсутствие оперативности), необходимость предварительной калибровки, поскольку почерпение пленки не является линейной функцией экспозиции. В оптимальном случае погрешность составляет 10-12% [10].

2) Термографические и термоэлектрические методы, основанные на применении различных термочувствительных датчиков излучения. При измерении расходимости предлагалось использовать термобумагу [11], а также регистрацию температурного профиля нагревания материала с помощью ИК-термометра [19], изучение профиля термодформации вертикальной поверхности отражателя при воздействии мощного лазерного излучения [20]. Для мощных лазеров, как один из вариантов, возможно измерение размеров отверстия, прожигаемого лучом в мишени [3]. Предлагалось также использовать термочувствительный лю-

минесцентный экран на основе трифосфата $ZnS, CdS - Ag, Ni$ [21], терморегистрацию на магнитных пленках RFe (где $R - Tb, Dy$) [22], обладающих широким диапазоном чувствительности по длинам волн $\sim 0,2 \dots 25$ мкм. Более перспективно использование различных термоэлектрических измерительных преобразователей, в особенности матричных [23]. В работах [23,24] описаны установки на основе термоэлектрических $256(16 \times 16)$ -элементных преобразователей с размером элементов 1×1 мм и обработки результатов измерений на ЭВМ. К этой же группе методов относится и использование различных типов тепловизоров [25].

3) Фотоэлектрические методы регистрации. Эти методы наиболее удобны, так как получаемые электрические сигналы затем можно обрабатывать электронными средствами, в том числе с использованием ЭВМ. Возможно использование всех известных типов фотоприемников, работающих в требуемом спектральном диапазоне. В особую группу следует выделить телевизионные методы, обладающие большой наглядностью [25-28], в особенности в случае измерений параметров получения лазеров ИК-диапазона. В работе [29] описан прибор для исследования CO_2 -лазеров, получивший название "лазеровизор". Предлагалось также использование различных электронно-оптических преобразователей [25], в том числе стандартных приборов ночного видения [30].

ДН полупроводниковых лазеров может иметь несколько лепестков [31,32], причем боковые лепестки могут иметь большую амплитуду, чем центральный (такая называемая форма "кроличьих ушей") [2,33], ДН может изменять форму от однолепестковой к многолепестковой при изменении уровня возбуждения. Ввиду довольно большой расходимости и сложной формы диаграммы направленности для полупроводниковых лазеров имеет смысл детальная регистрация ДН, и ее редким исключением (например, [30]) для них не используются методы двух сечений и фокального пятна.

Исследования ДН можно проводить, используя различные схемы сканирования. При линейном сканировании поперечного сечения луча приемником со щелью возникает погрешность измерения из-за неперпендикулярного падения лучей на чувствительную площадку ФП, которая определяется выражением

$$\alpha = 1 - \cos \alpha, \quad (3)$$

где α - угол падения. При больших углах расходимости эта погреш-

ность может быть достаточно высокой. Поэтому целесообразно осуществлять сканирование по сферической поверхности с центром, совпадающим с излучателем [34]. Для этого могут применяться различные схемы сканирования, отличающиеся как направлением взаимного перемещения исследуемого излучателя и приемника, так и степенью сложности этого перемещения (однокоординатное, многокоординатное). Эти схемы рассмотрены в работе [34].

Одна из первых описанных установок для автоматической записи ДН полупроводниковых лазеров [35] использовала в качестве ФП ФЭУ-62 с диафрагмой, вывод осуществлялся на самописец. Излучатель жестко закреплялся на площадке и поворачивался вместе с ней по вертикали и горизонтали относительно неподвижного ФП, диапазон углов поворота $0-80^\circ$. Согласно утверждению авторов [35], ошибка записанной формы ДН за счет неравномерности поворота излучателя не превышает 1%. Аналогичная по принципу построения установка, описанная в [36], позволяла поворачивать излучатель в одной плоскости, при этом угол, при котором торец диода был параллелен оптической щели перед ФП, определялся по отраженному от торца лучу вспомогательного лазера ЛГ-56. Угловое разрешение установки при ширине щели 0,01 мм было не хуже 1° , погрешность определения угла $\varphi = 0$ составляла около $0,5^\circ$. Диод помещался в светонепроницаемой камере [36]. В [37] точность отсчета углов поворота излучателя составляла $\pm 10'$, а ФП, помимо диафрагмы, был снабжен трубкой, исключавшей попадание на него постороннего излучения. В установке, описанной в работе [38], для исследования ДН инжекционных светодиодов использовалась оптическая труба с углом зрения $20'$, после которой излучение попадало на ФЭУ. Поворот источника излучения осуществлялся с помощью гониометра ГС-5. Вместо ФП с диафрагмой в работах [39,40] использовался инжекционный лазер, установленный таким образом, чтобы его активная область располагалась перпендикулярно направлению сканирования. В этом случае линейный размер ФП определяется толщиной активной области и ее волновыми свойствами. В [39] размеры активной области составляли $0,4 \times 10$ мкм², что обеспечивает точность определения размеров пучка излучения не хуже 1 мкм. Строго говоря, это утверждение авторов не вполне корректно, поскольку попадание излучения на пассивные области эмиттеров также ведет к генерации фотоэлектронов и дает вклад в фототок, полная величина которого составляла не более 0,1...10 нА [40]. В установке, описанной в работе [40], исследуемый лазер был неподвижен, а лазер-приемник перемещал-

ся линейно по сечению пучка (а не по дуге окружности), с помощью пьезокерамического транслятора, управляемого от ЭВМ, с точностью 0,01 мкм. Усиленный ток через АЦП поступал в ЭВМ, которая обрабатывала результаты. Измерения можно было проводить на расстояниях от лазера $L = 3...6000$ мкм, то есть регистрировать распределение как в ближней, так и в дальней зоне. Из полученных в работе [40] результатов следует, что формирование картины излучения в дальней зоне заканчивается при $L \approx 3$ мм.

Комплексная установка для исследования характеристик лазерных диодов в ближней и дальней зонах описана в работе [41]. Картины ближнего поля излучения можно регистрировать с помощью фотодиода со целью с разрешением $\sim 0,5$ мкм и одновременно наблюдать на экране телемонитора и на экране осциллографа. Изображение на телемониторе используется для фокусировки системы на плоскость щели ФП. Одновременно на экране второго телемонитора воспроизводится картина дальнего поля излучения. При необходимости более детального исследования ДН применяется вторая установка с угловым разрешением $0,5^\circ$, где излучатель устанавливается на калиброванный столик и поворачивается относительно неподвижного ФП со цельюю.

Известны также установки с классической схемой перемещения ФП по окружности, в центре которой помещен неподвижно закрепленный излучатель [42,43]. В обоих случаях угловое разрешение составляло $0,1^\circ$, ДН выводилась на двухкоординатный потенциометр. Для получения сигнала, пропорционального углу поворота ФП, в [42] использовался многошаговый переменный резистор, а в [43] - круговой реохорд, на рычаге подвижного контакта которого закреплялся ФП.

Наконец, описанная в [34] установка на базе инструментального микроскопа ИБМ-1 в комплексе с ЭВМ типа ДВК-2 позволяла исследовать ДН в 6 меридиональных плоскостях и получать таким образом наиболее точную индикатриссу излучения полупроводниковых излучателей. Такая установка может использоваться как для выходного контроля лазеров в процессе производства, так и для исследовательских целей.

Существенным недостатком всех методов, основанных на механическом сканировании в пространстве излучателя или приемника, является наличие механически движущихся частей, что приводит к погрешности измерений и увеличению времени измерений, к тому же изготовление прецизионной механики само по себе является довольно сложной задачей. Поэтому предпринимаются попытки снятия ДН без

механического сканирования, используя многоэлементные ФП. Авторы работы [44] использовали с этой целью 37 дискретных ФД, расположенных по окружности сектора 120° с дискретностью 2° в диапазоне $\pm 20^\circ$ относительно центрального ФД и 5° в остальном диапазоне. Сигналы с выхода каждого ФД через аналоговый коммутатор и 12-разрядный АЦП поступают через хрейт-контроллер в ЭВМ типа "Электроника-60". Установка является многофункциональной и позволяет не только регистрировать ДН, но также снимать ВАХ и ВТАХ излучателей. Для повышения углового разрешения необходимо уменьшать расстояние между соседними ФП, как это сделано, например, в [45] при исследовании расходимости газовых лазеров, где в качестве ФП использована кремниевая ПЗС-матрица ФПЗС-6М (144 строки по 256 элементов). Однако большая расходимость излучения полупроводниковых лазеров потребовала бы установки нескольких таких матриц или линеек ФП, что сильно увеличит объем обрабатываемых массивов информации. С появлением ПЭВМ с более высоким быстродействием и объемом ОЗУ такую задачу можно будет решить. Для оперативного анализа, например, для разбраковки излучателей, можно воспользоваться способом, предложенным в [46], - сначала по всему полю матрицы ФП провести анализ по системе "да-нет" и выявить локальную область матрицы, ячейки которой облучены энергией выше заданного порога, а затем подключить к этой области матрицы многоуровневую систему анализа. За счет этого информационный массив уменьшается, повышается точность и уменьшается время обработки. Наконец, заслуживает внимания одна из новейших разработок - анализатор пучка 13SKP001, описанный в [47], в котором используются методы компьютерной томографии. Система на основе Si-детекторов позволяет одновременно измерять ширину, трехмерный профиль интенсивности, мощность и положение пучка непрерывного лазера в реальном масштабе времени. Диапазон длин волн излучения от 400 до 1050 нм, размер пучка до 5 мм в диаметре. Учитывая тот факт, что формирование ДН полупроводникового лазера можно считать законченным на расстоянии около 3 мм от выходного сферкала [40], этот анализатор может использоваться и для исследования ДН полупроводниковых лазеров.

Из рассмотрения описанных в литературе методов измерения угловой расходимости излучения лазеров можно сделать вывод, что для инжекционных лазеров предпочтительным является метод регистрации ДН с использованием фотоэлектрической регистрации. При этом для повышения точности и углового разрешения желательно приме-

вне установок бес механического скапирования на базе многоэлементных фотоприемников с обработкой результатов измерений на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26086-84. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения. -М.: Изд. стандартов, 1984.

2. Гулицуис Э., Абрахам А., Шимечек Т. Простые полупроводниковые импульсные лазеры. // Квант.электрон.- 1988.- Т.15, №11.- С.2199-2203.

3. Методы измерения расходимости излучения оптических квантовых генераторов. /Е.П.Высоков, А.В.Кубарев, Б.Н.Морозов, В.Р.Пронян. //Иомерит.техника.- 1973.- №5.- С.32-36.

4. Хирд Г. Измерение лазерных параметров.- М.: Радио и связь, 1970.- 310 с.

5. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. /Под ред. А.Ф.Котюка. -М.: Радио и связь, 1981.- 288с. (Измерения в электронике).

6. Suzuki Y., Tachibana A. Measurement of the Gaussian laser beam divergence. // Appl.Opt.- 1977.- V.16, №16.- P.1481-1482.

7. ГОСТ 25.917-83. Лазеры. Методы измерения относительного распределения энергии (мощности) лазерного излучения. -М.: Изд.стандартов, 1983.

8. ISO TC 172SC 9 WG1: Standard for the Measurement of Beam Widths, Beam divergence and propagation factor; N38 Revised dated 2-18-92.

9. Исследование пространственных характеристик лазера с помощью автоматизированного измерительного комплекса. /В.В.Дыбко, Н.В.Жмурич, А.Л.Кадыров и др. //Электронная техника. Сер.Лазерная техника и оптоэлектроника.- 1989.- вып.4(52).- С.82-83.

10. Дрожбин Ю.А., Прокопенко В.Е., Семенов В.Б. Погрешность определения расходимости лазерного излучения методом фокального пятна. // Иомерит.техника.- 1982.- №9.- С.19-21.

11. Измерение расходимости импульсного лазерного излучения методом фокального пятна с применением зеркального клина. /Ю.М. Амбросимса, Ю.А.Дрожбин, Ю.Б.Морозов и др //Иомерит. техника.- 1982.- №11 - С.30-32.

12. Боровицкий С.И. Способ определения расходимости излучения импульсных ОКГ. //Измерит.техника.- 1976.- №2.- С.68-70.
13. Birky M.M. Simultaneous Recording of Near-Field and Far-Field Pattern of Lasers. //Appl Opt.- 1969.- V.8, №11.- P.2249-2253.
14. Falk J. Measurement of Laser Beam Divergence. //Appl.Opt.- 1983.- V.22, №8.- P.1131-1132.
15. Иомеритель флуктуаций диаметра лазерного пучка / Лобачев М.И., Рабинович Э.М., Тучин В.В. //Авт.свид.СССР Кл. Н 01 S 3/00 №584678, заявл. 20.02.76, опубл. 25.05.79.
16. Духанина М.И., Рукман Г.И., Хромов А.В. Иомерение расходимости лазерных пучков большого сечения. //Иомерит. техника.- 1981.- №3.- С.34-35.
17. Славнов С.Г. Определение угла расходимости и метод его контроля. //Иомерит.техника.- 1976.- №4.- С.149-152.
18. Прибор для иомерения расходимости лазерного излучения ПИР-1. //Квант.электроника.- 1978.- Т.5, №4.- С.951.
19. Courtney C., Steen W.M. Measurement of the diameter of the laser beam. //Appl.Phys.- 1978.- V.17, №3.- P.303-307.
20. Термодеформационный метод иомерения распределения интенсивности мощного лазерного пучка. /В.В.Аполлонов, Ф.В.Бункин, В.Ю.Хомич, С.А.Четкин. //Письма в ЖТФ.- 1978.- Т.4, №17.- С.1017-1019.
21. Регистратор пространственного распределения импульсного лазерного излучения РУЛ-2. /М.Ю.Бродский, А.М.Зайцев, В.М.Ключников, В.С.Трачук //Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов 3-й ВНТК.- М.: ВНИИОФИ, 1979.- С.261.
22. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Визуализатор оптических излучений. //Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропротекающих процессов. Тезисы докладов 13-й ВНТК.- М.:ВНИИОФИ, 1987.- С.189.
23. Благодатова Н.Б., Жирнов А.В., Сидоренко С.Л. Исследование пространственных характеристик в поперечном сечении пучка излучения твердотельного лазера. //Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов 6-й ВНТК*.- М.: ВНИИОФИ, 1986.- С.72.
24. Загорский Я.Т., Карабан Ю.В., Куонецов А.А. Иомерение и регистрация диаграммы направленности светополучающих устройств // Полупроводниковая электроника в технике связи (Москва).- 1984.- №24.- С.96-102.

25. Морозов П.А., Рухман Г.И. Измерения пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения в ИК области спектра //Измерит.техника.- 1978.- №5.- С.21-23.

26. Телевизионный анализатор лазерного излучения. /Н.И.Мищенко, С.М.Слюбяги, В.И.Букатый, Д.П.Чапоров. //ПТЭ.- 1977.- №5.- С.232.

27. Измерение параметров лазерного излучения в дальней зоне. /П.А.Морозов, С.П.Морозова, Т.Т.Корнева и др. //Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов 5-й ВНТК.- М.: ВНИИОФИ, 1984.- С.15.

28. ТВ-измеритель распределения плотности энергии лазерного излучения. /Ю.А.Дрожбин, В.П.Климашин, Н.О.Бантле, Л.А.Расс //Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекущих процессов. Тезисы докладов 13-й ВНТК.- М.:ВНИИОФИ, 1987.- С.185.

29. Сканирующий анализатор пространственного распределения излучения лазера на CO_2 /С.П.Морозова, П.А.Морозов, Б.Е.Лисянский и др //Измерит.техника.- 1978.- №5.- С.24-25.

30. Методы исследования пространственных параметров импульсных полупроводниковых излучателей /А.В.Толстошев, С.Ф.Смирнов, В.Э.Цейтлин и др. //Импульсная фотометрия.- Л.: Машиностроение, 1979.- вып.6.- С.149-152.

31 Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. - М.: Мир, 1981, Т.1. - 300 с.

32 Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. - М.: Мир, 1981, Т.2. - 364 с.

33. Эберт Г. Поведение лазеров с волноводом, индуцированным усилением, при высокой мощности излучения в режиме наносекундных импульсов. //Квант.электроника.- 1988.- Т.15, №11.- С.2234-2238.

34. Фролов Н.В. Некоторые вопросы измерения пространственно-энергетических параметров лазерного излучения большой расходимости. //Электронная техника. Сер.Лазерная техника и оптоэлектроника.- 1989.- вып.3.- С.85-88.

35. Евсеев В.И., Дерягин В.Н. Установка для автоматической описи диаграммы направленности полупроводниковых излучателей. //ОМП.- 1968.- №3.- С.33-36.

36. Грибковский В.П., Махрицкий Ю.В., Межевич И.Д. Установка с автоматической описью диаграммы направленности полупроводниковых излучателей. //Фотометрия и ее метрологическое обеспече-

ние. Тезисы докладов 3-й ВНТК. - М.: ВНИИОФИ, 1979.- С.139.

37. Исследование пространственного распределения излучения диодов ЗЛ107Б. /Н.И.Богачков, Ю.С.Иванов, Л.И.Скорик и др. //ОМП.- 1986.- №3.- С.42-45.

38. Исследование характеристик инжекционных светодиодов. / А.Н.Борухман, Н.К.Варчук, Т.В.Джалуташвили и др. //Метрологическое обеспечение измерений оптико-физических параметров излучения ОКГ.- М., 1976.- С 134-137.

39. Устройство для определения структуры светового пучка. / Гончаров И.Г., Грачев А.П., Дедушенко К.Б., Лихачев И.Г., Мамаев А.Н. //Авт св. СССР Кл. G 01 J 1/04 №1157363, заявл. 04.01.84, опубл. 23.05.85.

40. Богатов А.П., Кобилджанов О.А., Кундикова Н.Д. Метод микроскопирования для исследования распределения интенсивности в пучке излучения инжекционных лазеров. //Квант.электроника.- 1989.- Т.16, №9.- С.1944-1946.

41. Peled S. Near- and Far-Field Characterisation of Diode Lasers. //Appl.Opt.- 1980.- V.19, №2.- P.324-328.

42. Влияние температуры на угловое распределение излучения полупроводниковых гетеролазеров. /С.Д.Жарников, И.С.Манах, Ю.В. Пучин, А.Ф.Шилов. //Импульсная фотометрия.- Л.:Машиностроение, 1986.- вып.9.- С.92-95.

43. Бахменд А.Б., Зубков В.П. Устройство для снятия диаграммы направленности полупроводниковых излучателей. //Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов 3-й ВНТК.- М.: ВНИИОФИ, 1979.- С 141.

44. Установка измерения и визуализации диаграмм направленности излучающих диодов. /А.А.Едреев, Н.И.Шумилова, Г.Н.Захарова и др. //Измерит.техника.- 1990.- №9.- С.33-34.

45. Исследование распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерных пучков. /И.В.Шпак, В.М.Ключко, А.Ф.Костоломов и др. //Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов 6-й ВНТК.- М.: ВНИИОФИ, 1986.- С.62.

46. Кувьяминов В.А. Способ оперативного анализа пространственного распределения энергии в поперечном сечении импульсного когерентного излучения. //Импульсная фотометрия. - Л.:Машиностроение, 1984.- вып.4.- С.160-162.

47. The new model 13 SKP 001 BeamAnalyser. //Phys.World.- 1993.- V.6, №9.- P.67.