

Исследования в области измерения энергетических характеристик СВЧ и лазерного излучения

(Н. Г. Кокодий)

Основателем этого научного направления в работах радиофизического факультета был профессор Р. А. Валитов — первый заведующий кафедрой радиоизмерений (позже — кафедра квантовой радиофизики).

50-е годы XX века, когда был создан радиофизический факультет, характерны бурным развитием в СССР радиоэлектроники, и в частности радиотехники сверхвысоких частот (СВЧ). В эти годы в радиофизике и радиотехнике была выдвинута проблема освоения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. НИИ электронной и радиопромышленности СССР получили задания, разработать источники излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах — лампы обратной волны (ЛОВ), клистроны, магнетроны, и др. В начале 60-х годов под руководством М. Б. Голанта (г. Фрязино, Московская обл.) в СССР были созданы широкодиапазонные ЛОВ субмиллиметрового диапазона. Однако разработчики генераторов столкнулись с проблемой измерения их параметров, так как промышленность выпускала измерительную аппаратуру (волномеры, измерители мощности, детекторные головки и др.) только для сантиметрового диапазона. Заведующий кафедрой радиоизмерений радиофизического факультета профессор Р. А. Валитов принял решение направить усилия сотрудников кафедры на разработку и создание измерительных приборов миллиметрового диапазона длин волн.

Пондеромоторный метод

В докторской диссертации Р. А. Валитова был обоснован новый метод измерения мощности СВЧ излучения — пондеромоторный, использующий давление электромагнитного излучения на тела в волноводе. Он показал возможность использования этого физического эффекта для измерения мощности электромагнитных волн и достоинства метода — перспективность для измерения больших мощностей, малые потери энергии в приборе, высокую точность. Использование абсолютной калибровки, обоснованной в Англии А. Калленом [1], показало возможность создания точных абсолютных приборов. В СССР это сделали сотрудники кафедры радиоизмерений В. Д. Кукуш и В. Г. Орлов. Они обосновали

метод калибровки приборов с подвижным элементом произвольной формы в волноводе [2] и создали образцовые пондеромоторные измерители СВЧ мощности. Основная погрешность созданных пондеромоторных ваттметров при коэффициенте стоячей волны нагрузки 1,1 на уровнях мощности выше 1 Вт в волноводных трактах 35×15 , 23×10 и $7,2 \times 3,4$ мм составляла 1,0...1,5 % [3, 4]. Благодаря высокой точности и возможности проведения абсолютной калибровки пондеромоторные ваттметры применяются как образцовые приборы для поверки рабочих ваттметров.

В 1960 году были созданы первые лазеры, а в течение нескольких последующих лет были разработаны лазеры для локации, связи, обработки материалов. На кафедре радиоизмерений начались разработки измерительных приборов для таких лазерных устройств.

Одним из исследуемых методов был пондеромоторный, основанный на измерении давления света.

Первые приборы этого типа для измерения энергии лазерного излучения, созданные в США [5] и в СССР (МГУ) [6], были мало пригодны для практического использования, так как их подвижная система для измерения давления излучения (крутильные весы), помещалась в вакуумированную камеру. Поэтому приборы были очень чувствительны к толчкам и вибрациям, а при попадании лазерного излучения на металлические части подвижной системы вакуум в камере портился, и прибор выходил из строя.

Проведенные на кафедре исследования позволили Н. Г. Кокодию, аспиранту профессора Р. А. Валитова, создать невакуумированные пондеромоторные измерители мощности и энергии мощного лазерного излучения. Для этого приемный элемент делался из прозрачного материала с малым поглощением излучения. Отражающее покрытие было диэлектрическим. Камера измерительного преобразователя изготавливалась из материала с большой теплоемкостью и теплопроводностью (меди, алюминия) [7].

В дальнейших работах группы Н. Г. Кокодия в качестве датчиков давления излучения кроме традиционных крутильных весов использовались механотроны — электронные лампы с подвижными электродами, предназначенные для измерения малых перемещений и сил. Их применение позволило создать простые в изготовлении и удобные в работе приборы [8]. Были разработаны различные конструкции измерительных преобразователей, уменьшающие погрешность зонной чувствительности, то есть зависимости показаний прибора от места попадания луча. Приборы были награждены медалями ВДНХ СССР.

Прибор МИЭ-3 предназначен для измерения энергий импульсов от 100 Дж до 10 кДж при диаметрах пучков от 20 до 100 мм в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Это прибор проходного типа, позволяющий использовать лазерное излучение в эксперименте.

Калориметрический метод

Другим методом измерения мощности СВЧ и лазерного излучения, который исследовался на кафедре радиоизмерений (позже — кафедра квантовой радиофизики), был калориметрический, основанный на измерении температуры тела, нагреваемого излучением. Приборы этого типа имеют много достоинств — они просты по конструкции, удобны в использовании, могут измерять как малые, так и большие мощности излучения.

В работы этого направления большой вклад сделал доктор физико-математических наук, профессор В. М. Кузьмичев.

В 1960–1961 годах В. Д. Кукушем, В. М. Кузьмичевым и Г. Г. Половниковым были разработаны калориметрические волноводные измерители малых мощностей непрерывного излучения (сечение волноводов $7,2 \times 3,4$ мм, $3,6 \times 1,8$ мм и $2,4 \times 1,2$ мм) [9].

В. М. Кузьмичевым и Е. Я. Говоруном был создан квазиоптический измеритель малых уровней непрерывной мощности субмиллиметрового диапазона [10], в котором приемным элементом был конус. Уменьшение постоянной времени прибора достигалось расположением болометрического конуса в медном конусе с небольшим воздушным зазором, что увеличивало коэффициент теплообмена.

Ими же был создан малоинерционный измеритель мощности коротковолновой части миллиметрового диапазона [11], в котором в волноводе $3,2 \times 1,4$ мм на слюдяную пластинку наносилась поглощающая металлическая пленка, а на ней равномерно по длине размещались три последовательно соединенных термистора. Такая нагрузка обеспечивала хорошее поглощение многомодового излучения до минимальной длины волны в несколько десятых долей миллиметра.

С появлением лазеров большое внимание было уделено созданию калориметров оптического диапазона. Детальное теоретическое и экспериментальное исследование провел В. М. Кузьмичев. В качестве поглощающей нагрузки он предложил брать конусную модель абсолютно черного тела. Был разработан алгоритм вычисления ее поглощающей способности для зеркального и диффузного коэффициентов поглощения внутренней поверхности [12]. Калориметр КОД-3, предназначенный для измерения мощностей лазерного излучения от 10 мВт до 1 Вт

и энергий импульсов от 1 мДж до 10 Дж был внедрен в промышленное производство под названием ИМО-2 [13]. В дальнейшем его конструкция послужила основой для промышленного выпуска приборов ИКТ-1 и ИЭК-1.

Затем исследования были направлены на создание приборов для измерения больших мощностей и энергий лазерного излучения. Была разработана серия приборов, предназначенных для этого динамического диапазона:

– калориметры КОД-6 и КОД-10 с пределами измерений по энергии 1...300 Дж, по мощности 1...300 Вт, спектральным диапазоном 0,4...12 мкм, диаметром входного окна 15 мм;

– калориметр КОД-21 для энергий 10–3000 Дж, спектральным диапазоном 0,4 – 1,1 мкм, диаметром входного окна 60 мм [14];

– калориметр КОД-27 с диапазоном измеряемых энергий 100 – 30000 Дж, спектральным диапазоном 0,4–1,1 мкм, диаметром окна 100 мм.

О. Е. Закуренко и В. М. Кузьмичевым были созданы калориметры постоянной температуры. В одном из них [15] энергия излучения лазера расходовалась на таяние льда, находящегося при температуре 0°С, и измерялось изменение объема смеси лед-вода. В другой конструкции [16] приемный элемент охлаждался элементом Пельтье, так что при измерениях температура нагрузки оставалась постоянной. Достоинством калориметров постоянной температуры является высокая точность измерений.

Н. Г. Кокодием, В. Н. Тимошенко и В. Ф. Ефимовым были созданы ножевые градиентные калориметры [17] на большие уровни энергии импульсов лазера с размерами входной апертуры до 200 × 200 мм, в которых использовался набор заостренных пластин, создающих клиновидную модель черного тела, а выходной сигнал дифференцировался. В результате существенно уменьшалось время измерения. Приборы могли измерять энергии импульсов лазерного излучения до 100 кДж и мощности непрерывного излучения до 10 кВт. Достоинства таких приборов – малая инерционность (несколько секунд вместо 10–20 минут у конусных калориметров, алые габариты измерительных головок).

Созданные на кафедре измерительные приборы использовались на предприятиях и в организациях, разрабатывающих новые лазеры и лазерные системы локации, связи, лазеры для технологических процессов. Калориметрический измеритель КОД-21 использовался при создании эталонных лазерных установок Украины.

Пироэлектрический и пиромагнитный методы

Р. А. Валитовым, С. Ф. Дюбко, В. М. Кузьмичевым и В. А. Свичем были разработаны пироэлектрические измерители мощности электромагнитного излучения [18]. В. М. Кузьмичевым и Б. В. Сафроновым созданы пироэлектрические приборы для малых уровней мощности (милливатты и микроватты) в миллиметровом, субмиллиметровом и оптическом диапазонах [19]. На пироэлектрическую пластинку через изолирующий слой наносился пленочный подогреватель, который покрывался поглощающим излучение слоем. Измеряемое излучение направлялось на приемный элемент непосредственно или фокусировалось линзой или усеченным зеркальным конусом.

Пироэлектрические приемники успешно применялись и для измерения малых энергий импульсов излучения (от нескольких миллиджоулей до нескольких джоулей). Их достоинство — малая инерционность, которая позволяла проводить измерения излучения лазеров, работающих в частотно-импульсном режиме с частотой до 50 Гц и регистрировать энергию каждого импульса.

В. М. Кузьмичевым, В. Г. Гужвой, Н. Г. Кокодием и В. Ф. Ефимовым в 1966 г. (ранее, чем в других лабораториях — в СССР и за рубежом) была обнаружена способность пироэлектрических приемников, работающих на низкоомную нагрузку, измерять форму оптических импульсов длительностью в несколько наносекунд [20]. Были разработаны малоинерционные приемники лазерного излучения, основанные на этом эффекте.

В. М. Кузьмичевым, Ю. М. Латыниным и Ю. В. Колтком был исследован подобный эффект — пиромагнитный — и созданы малоинерционные пиромагнитные приемники импульсного излучения лазеров [21].

Решетчатые приемники лазерного излучения

В. М. Кузьмичев и Ю. М. Латынин предложили конструкции решетчатых болометрических измерителей энергетических параметров лазерного излучения [22, 23]. Эти приборы способны работать в широком спектральном диапазоне, выдерживают высокие интенсивности излучения, они малоинерционны и не имеют ограничений на максимальный размер входной апертуры. Такой прибор состоит из нескольких проволочных решеток, стоящих на пути распространения лазерного пучка. Диаметр проволоки — несколько десятков микрометров. Элементы решетки греются попадающим на них излучением и изменяют свое сопротивление, то есть работают как болометры. Суммарное изменение сопротивления

решеток пропорционально мощности непрерывного излучения или энергии импульса.

Для обоснования работы решетчатых приемников были изучены вопросы взаимодействия электромагнитного излучения с тонкими металлическими проволоками — зависимость поглощения от показателя преломления материала, длины волны излучения, характера его поляризации, угла падения излучения на цилиндр [24, 25].

В создании решеточных болометрических измерителей непрерывной и квазинепрерывной мощности принимали участие М. П. Перепечай, А. В. Золотайкин, А. Б. Катрич, А. В. Худошин, В. П. Балкашин, И. А. Приз.

Был обнаружен и исследован новый физический эффект — аномально большое поглощение электромагнитного излучения в очень тонких проводящих волокнах [26—28]. Этот эффект может найти применение при создании защитных покрытий в микроволновом диапазоне.

Если измерить сопротивление каждого из болометров в нескольких решетках, расположенных под разными углами к вертикали, можно найти распределение интенсивности в поперечном сечении пучка излучения и другие его характеристики. Для этого необходима математическая обработка сигналов с приемника, сходная с той, которая используется в компьютерной томографии.

На основе этих разработок фирма Prometec (Германия) выпустила два типа решетчатых измерителей — Laserscope UFC 60 и Laserscope UFC 80.

А. Б. Катричем, А. В. Худошиным, а затем в группе Н. Г. Кокодия разработаны алгоритмы обработки сигналов, обеспечивающие измерение решетчатыми приемниками целого комплекса характеристик излучения мощных и сверхмощных лазеров:

- мощность излучения непрерывных лазеров или энергию импульса излучения;
- функцию распределения интенсивности в поперечном сечении пучка излучения;
- диаметр пучка;
- координаты энергетического центра пучка;
- характер поляризации излучения;
- форму импульсов излучения, длительность которых в 10—20 раз меньше постоянной времени болометров.

Алгоритмы учитывают зависимость теплофизических и оптических параметров болометров от температуры (которая при измерении больших мощностей может достигать нескольких сотен градусов), зависимость

поглощения в болометрах от поляризации излучения, неодинаковость распределения интенсивности излучения и температуры вдоль болометра. В отличие от приборов фирмы Prometec в приемниках содержится только 3–4 решетки. Это уменьшает потери энергии в них [33–36].

Для измерений в узких пучках (менее 10 мм диаметром или в фокальной области) использовать болометрические решетки нельзя. В. М. Кузьмичев и С. В. Погорелов разработали метод измерений диаметра сфокусированного излучения одиночным болометром, пересекающим (сканирующим) пучок [37]. Н. Г. Кокодием и студентом из Китая Ли Чженьхуа предложен метод сканирования пучка излучения ножом специальной формы. Созданные ними алгоритмы обработки сигнала позволяют получить информацию о распределении интенсивности в исследуемом пучке излучения [38, 39]. Ранее приборы такого типа позволяли найти распределение интенсивности только в гауссовых пучках.

Решение обратных задач теплопередачи и оптики

В 60-х годах в измерительной технике начало развиваться направление, основанное на решении обратных задач электродинамики, оптики, теплопередачи. В нем по результатам воздействия на объект какой-то «силы», восстанавливаются параметры этой «силы». Например, по ходу изменения температуры тела при импульсном нагреве восстанавливаются параметры этого импульса.

Обратные задачи, как правило, некорректны. В них погрешности исходных данных очень сильно сказываются на результате. А так как исходные данные в измерительной технике — это результаты измерений, то всегда возникает проблема уменьшения влияния погрешностей измерений на конечный результат. Обычно для этого используются методы статистической обработки данных, что требует проведения большого количества вычислений. Поэтому обратные задачи в измерительной технике начали широко использоваться с появлением мощных компактных вычислительных средств — микропроцессоров, персональных компьютеров.

Примером применения обратных задач теплопередачи в измерительной технике является метод измерения распределения температуры в пучке электромагнитного излучения, основанный на анализе распределения температуры по поверхности металлической пластины, нагреваемой этим излучением. Функции распределения интенсивности излучения и температуры связаны между собой уравнением теплопроводности. Если известна одна из этих функций, можно найти другую.

В приемнике оптического излучения, основанного на этом методе, излучение падает на металлическую пластину, на тыльной стороне которой расположены термодатчики (термопары или терморезисторы). Они измеряют распределение температуры по поверхности пластины. Сигналы с них через коммутатор и аналого-цифровой преобразователь вводятся в компьютер, где решается обратная задача теплопроводности — по измеренному распределению температуры восстанавливается распределение интенсивности падающего на пластину излучения [40, 41].

Использование обратных задач теплопроводности дает возможность существенно уменьшить инерционность тепловых приемников излучения. Компьютерное решение такой задачи позволило калориметрическим приемником лазерного излучения ТПИ-2М с постоянной времени около 10 мин измерить форму импульса оптического импульса длительностью 10 с [42].

Использование в качестве теплового приемника болометра из тонкой проволоки, у которого тепловая постоянная составляет несколько миллисекунд, позволяет измерять импульсы лазерного излучения [43].

Литература

1. Cullen A. L. A general method for the absolute measurement of microwave power / A. L. Cullen // Proc. IEEE. — 1952. Vol. 4. Pt. 4, No. 2. pp. — 112–120.
2. Орлов В. Г. О пондеромоторных силах, действующих на тело в волновой среде / В. Г. Орлов, В. Д. Кукуш // Труды радиофизического факультета ХГУ. — 1962. — Т. 7. вып. 2. — С. 433.
3. Кукуш В. Д. Повышение чувствительности пондеромоторных ваттметров / В. Д. Кукуш // Труды радиофизического факультета ХГУ. Т. 4. — 1959. — С. 87–91.
4. Кукуш В. Д. Повышение точности электрической калибровки пондеромоторных измерителей мощности на СВЧ / В. Д. Кукуш., В. Г. Орлов // Измерительная техника. — 1960. — № 2. С. 76–78.
5. Cook I. I. Measurement of laser output by light pressure / I. I. Cook, W. L. Flowers, C. V. Arnold // Proc. IRE. — 1962. — Vol. 50, No 7. — P. 1693.
6. Брагинский В. Б. Абсолютное измерение энергии и мощности по электромагнитному давлению в оптическом диапазоне / В. Б. Брагинский, И. И. Минакова, И. М. Степунин // Приборы и техника эксперимента. — 1965. — № 3. — С. 183–186.
7. Валитов Р. А. Безвакуумные пондеромоторные измерители мощности и энергии ОКГ / Р. А. Валитов, Н. Г. Кокодий, Г. П. Стародубцев // Радиотехника. — 1979. — Т. 34, № 11. — С. 45–49.

8. Кокодий Н. Г. Пондеромоторный измеритель энергии ОКГ. / Н. Г. Кокодий, В. Ф. Ефимов, В. Н. Тимошенко, Г. С. Берлин // А.С. СССР № 596047, 1977 г.

9. Кузьмичев В. М. Балансные статистические калориметры миллиметровых и субмиллиметровых волн / В. М. Кузьмичев, Г. Г. Половников, И. К. Овчинников, В. Д. Кукуш // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия VI. Радиоизмерительная техника. — 1964. — Вып. 2. — С. 75–82.

10. А.С. 352229 СССР, G01z 21/00. Квазиоптический измеритель мощности субмиллиметрового диапазона / В. М. Кузьмичев, Е. Я. Говорун (СССР). — № 1491597/26-9 ; заявлено 13.11.70 ; опубл. 26.10.72, бюл. 28. — С. 140.

11. Говорун Е. Я. Малоинерционный измеритель мощности субмиллиметровых волн. / Е. Я. Говорун, В. М. Кузьмичев // Радиотехника. — X., 1979. — № 49. — С. 76–78.

12. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / Р. А. Валитов, Н. Г. Кокодий, А. В. Кубарев, В. М. Кузьмичев и др. / под ред. Р. А. Валитова и А. В. Кубарева. — М. : Стандарт, 1969. — 184 с.

13. Калориметрический измеритель мощности и энергии излучения оптических квантовых генераторов типа ИМО-2. (Информационное сообщение) // Труды метрологических институтов СССР. Исследование в области квантовой радиофизики. — 1967. — вып. 90(150). — С. 23–26.

14. Кузьмичев В. М. Калориметр средних уровней энергии импульсных ОКГ / В. М. Кузьмичев, Н. И. Зинченко // Радиотехника. — X., 1972. — вып. 23. — С. 114–119.

15. Валитов Р. А. Калориметр постоянной температуры для измерения энергии излучения ОКГ / Р. А. Валитов, В. М. Кузьмичев, О. Е. Закурченко // Импульсная фотометрия. — Л. : Машиностроение, 1969. — С. 52–56.

16. Валитов Р. А. Компенсационный измеритель мощности непрерывного излучения ОКГ / Р. А. Валитов, В. М. Кузьмичев, О. Е. Закурченко, А. С. Арзуманов // Измерительная техника. — 1971. — № 1. — С. 21–22.

17. Кокодий Н. Г. Градиентные калориметры / Н. Г. Кокодий // Украинский метрологічний журнал. — 1997. — Вып. 2. — С. 24–26.

18. А. С. 218250 СССР. МПК G01g 21a4,71 Измеритель малых уровней мощности электромагнитного излучения. // Валитов Р. А., Дюбка С. Ф., Свич В. А., Кузьмичев В. М. (СССР). № 1121783/26-10 ; заявлено 26.12.66 ; опубл. 17.05.68, бюл. №17.

19. Валитов Р. А. Пироэлектрический измеритель мощности ОКГ / Р. А. Валитов // Антенно-фидерные и измерительные устройства сверхвысоких частот. — X. : ХГУ, 1971. — С. 120–124.

20 Валитов Р. А. Малоинерционный пироэлектрический индикатор импульсного излучения квантовых генераторов / Р. А. Валитов, В. М. Кузьмичев,

Н. Г. Кокодий, В. Г. Гужва В. Ф. Ефимов // Радиотехника и электроника. — 1969. — Т. 14. № 10. — С. 1843—1847.

21. Латынин Ю. М. Пиромангнитные детекторы излучения / Ю. М. Латынин, Ю. В. Колтоков, В. М. Кузьмичев // Квантовая электроника. — К. : 1980. — Вып. 19. — С. 88—98.

22. А.С. 411561 СССР. М Кл. НО1s 3/00. Измеритель излучения ОКГ / Кузьмичев В.М., Латынин Ю.М. Заявка № 1641432/25-26; заявл. 30.03.71; опубл. 15.01.74, бюл. №2.

23. Кузьмичев В. М. Малоинерционный измеритель мощности лазера на двуокиси углерода / В. М. Кузьмичев, М. П. Перепечай // Квантовая электроника. — 1974. № 11. — С. 2407—2410.

24. Кузьмичев В. М. Поглощение электромагнитных волн металлическим цилиндром / В. М. Кузьмичев, Ю. М. Латынин // Оптика и спектроскопия. — 1974. — Т. 37. — вып. 3. — С. 564—568.

25. Комолов В. М. Интегральные энергетические характеристики взаимодействия плоской электромагнитной волны с проводником цилиндрического сечения при наклонном падении / В. М. Комолов, В. М. Кузьмичев, Ю. М. Латынин // Оптика и спектроскопия. — 1977. Т. 43, вып. 2.— С. 280—282.

26. Кузьмичев В. М. Фактор эффективности поглощения тонкого металлического цилиндра в микроволновом диапазоне / В. М. Кузьмичев, Н. Г. Кокодий, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин // Радиотехника и электроника. — 2003. — Т. 48, № 11. — С. 1348—1351.

27. Кокодий Н. Г. Поглощение СВЧ излучения очень тонким двухслойным цилиндром / Н. Г. Кокодий // Радиотехника и электроника. — 2006. — Т. 51, № 2. — С. 1—4.

28. Хе Ши. Взаимодействие электромагнитных волн в волноводе с очень тонкими проволоками / Хе Ши, С. Н. Шульга, Н. Г. Кокодий, Н. Н. Горобец, В. Н. Кийко, А. Ю. Бутрым, Джин Юн // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 10. — С. 1201—1204.

29. А.С. 1152353 СССР. Устройство для измерения распределения плотности мощности // А. Б. Катрич, В. М. Кузьмичев, А. В. Худошин, Е. П. Готов, Н. Н. Сажина (СССР). — №3605827 ; заявл. 03.05.84 ; зарег. 22.12.84.

30. Катрич А. Б. Болومترический анализатор параметров излучения / А. Б. Катрич, А. В. Худошин // Приборы и техника эксперимента. — 1988. — № 2. — С. 227.

31. А.С. 1333009 СССР. Измеритель кривизны фазового фронта пучка излучения // Катрич А. Б., Кузьмичев В. М., Фоменко В. Н., Худошин А. В. (СССР). №3979239 ; заявл. 18.11.85 ; зарег. 22.04.87.

32. Катрич А. Б. Измерение направления поляризации электромагнитного излучения / А. Б. Катрич, В. М. Кузьмичев, А. Б. Катрич, В. М. Кузьмичев // Импульсная фотометрия. — Л. : Машиностроение, 1978. — Вып. 5. — С. 129–131.
33. Кузьмичев В. М. Исследование нелинейности характеристик преобразования тонкопроволочных болометрических измерителей мощности и энергии лазерного излучения / В. М. Кузьмичев, А. В. Золотайкин // Измерительная техника. — 1990. — № 12. — С. 20–21.
34. Кузьмичев В. М. Температурная зависимость фактора эффективности поглощения тонкопроволочного платинового болометра / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Измерительная техника. — 2003. — № 3. — С. 20–22.
35. Кокодий Н. Г. Измерение распределения интенсивности в пучке теплового излучения / Н. Г. Кокодий, Д. Н. Кокодий // Теплофизика высоких температур. — 2007. — Т. 45, № 2.
36. Кокодий Н. Г. Решетчатый измеритель пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения. / Н. Г. Кокодий, В. А. Тиманюк, Хе Ши // Український метрологічний журнал. — 2008. — № 1. — С. 20–23.
37. Кузьмичев В. М. Измерение микрометровых диаметров сфокусированного лазерного излучения тонкопроволочным болометром / В. М. Кузьмичев, Б. В. Сафронов, С. В. Погорелов, В. П. Балкашин // Измерительная техника. — 2002. — № 3. — С. 28–30.
38. Кокодий Н. Г. Ножевой измеритель распределения интенсивности в пучке оптического излучения / Н. Г. Кокодий // Измерительная техника. — 2003. — № 3. — С. 17–20.
39. Kokodiy N. G. Measurement of intensity distribution of radiation in a laser beam by shear mechanism / N. G. Kokodiy, Li Zhenhua // 5th International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers (CAOL-2010). September 10–14, 2010, Sevastopol, Crimea, Ukraine. — P. 202–204.
40. Kokody N. G. New thermal meters of energetic characteristics of laser radiation / N. G. Kokody // Journal of Thermoelectricity — 1996. — No. 4. — P. 93–100.
41. Кокодий Н. Г. Тепловой метод измерения пространственного распределения интенсивности теплового излучения / Кокодий Н. Г. // Теплофизика высоких температур. — 2000. — Т. 38, № 1. — С. 91–95.
42. Кокодий Н. Г. Измерение формы импульса оптического излучения с использованием решения обратной задачи теплопроводности / Н. Г. Кокодий // Український метрологічний журнал. — 2000. — № 4. — С. 53–57.
43. Пак А. О. Измерение временных характеристик интенсивного оптического излучения / А. О. Пак, Н. Г. Кокодий // Теплофизика высоких температур. — 2012. — Т. 50, № 1. — С. 137–140.