

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК: 681.7.069.32

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦИФРОВЫХ МАТРИЦ

©2025 г. А. А. Фроня^{a, b}, А. Т. Саакян^a

^aФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

^bНациональный исследовательский ядерный университет "МИФИ"
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

*e-mail: sahakyanat@lebedev.ru

Поступила в редакцию 03.04.2025 г.

После доработки 21.05.2025 г.

Принята к публикации 11.06.2025 г.

Предлагается метод измерения абсолютной энергетической чувствительности цифровых регистрирующих матриц в зависимости от длины волны регистрируемого излучения. Принцип метода позволяет игнорировать внутренний программный механизм обработки информации цифровой матрицы. Приводятся результаты апробации метода для случая ПЗС-матрицы, основанного на обработке полученных изображений источников излучения в спектральном диапазоне 0.4–1.1 мкм. Апробация была проведена для источников двух типов излучения – лазерного и лампы накаливания с обсуждением их преимуществ и недостатков. Измеренная чувствительность цифровой матрицы позволяет определять количество энергии зарегистрированного в экспериментах излучения в соответствующих локальных спектральных интервалах, в которых была проведена калибровка. Приводится демонстрационный подсчет энергии рассеянного лазерной плазмой излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении процессов взаимодействия излучения с веществом, процессов рассеяния и генерации излучения необходимо учитывать энергетический баланс. Помимо этого, зачастую во множестве экспериментов происходит регистрация излучения оптического диапазона в виде изображения, и тогда встает вопрос о количественной величине зарегистрированного излучения. Для измерения энергетических характеристик излучения используются различные методы: калориметрический (тепловой), фотоэлектрический, пандеромоторный и др. [1, 2], которые далеко не всегда можно применить в условиях эксперимента. Отдельно стоит отметить фотографический метод,

который раньше активно использовался и основан на регистрации излучения на специальные фотоматериалы [3]. К преимуществам фотографического метода относится возможность регистрации излучения любой длительности в широком спектральном диапазоне. Важный и основной недостаток этого метода – это большая трудоемкость процесса обработки фотоматериалов.

В настоящее время на замену фотоматериалам пришли цифровые матрицы (ПЗС – прибор с зарядовой связью, КМОП – комплементарная структура металл–оксид–полупроводник, и др.). Они нашли широкое применение в технике, медицине, научных исследованиях. Детекторы на основе цифровых матриц используются для регистрации излучения в различных спектральных диапазонах (от дальнего инфракрасного до жесткого рентгеновского излучения) [4–8] и обладают рядом преимуществ. Во-первых, техника на основе цифровых матриц имеет малые габариты и небольшой вес, низкое энергопотребление, она проста и надежна в эксплуатации. Во-вторых, она позволяет работать в широких интервалах чувствительности ISO (International Organization for Standardization), времени экспозиции и позволяет реализовать различные режимы регистрации, обеспечивая высокое соотношение сигнал/шум. В-третьих, обладает высокой разрешающей способностью (размер пикселя составляет несколько микрон). И в-четвертых, полученная с помощью цифровой техники информация представляется в удобном для хранения, передачи и обработки формате. В связи с этим цифровые матрицы активно интегрируются в современные высокотехнологичные установки.

Фотоаппараты с цифровыми матрицами стали доступны для массового производства и широкого использования. Их часто используют в научных исследованиях, технологических и медицинских задачах при регистрации изображений различных объектов и явлений [9–13]. Цифровые матрицы активно применяются в фотометрии для изучения распределения теплового поля и температуры объектов. Например, в работе [14] ПЗС-матрица интегрирована с оптическим пирометром. Такая интегрированная система позволяет в результате аналого-цифрового преобразования сигнала в градации серого (от 0 до 4096) определять температуру объекта. Для этих целей проводилась калибровка системы ПЗС-матрица–пирометр. Экспериментальные результаты показали, что рабочий диапазон измеряемых температур для такого пирометра составляет 800–1203 °С, а чувствительность в пределах этого диапазона температур составляет 0.4906–35.64 °С⁻¹. Шкала в градациях серого обычно используется в рамках экспериментальной обработки изображений и для оценки отклика цифровой матрицы [14, 15].

В задачах визуализации важно получать информацию не только о пространственных параметрах объекта, но и о спектральных, калориметрических и других параметрах. В связи

с этим разрабатываются методы калибровки цифровых систем, которые позволят измерять в количественных величинах разные параметры объектов исследования.

В Лаборатории воздействия лазерного излучения ФИАН цифровые фотоаппараты и матрицы используются для регистрации распределений рассеянного плазмой лазерного излучения, собственного излучения плазмы и интенсивности лазерного излучения по сечению пучка, а также спектров плазмы, изображения плазменного облака и др. В связи с этим имеется необходимость в измерении абсолютного значения энергетических характеристик исследуемых объектов, регистрируемых с помощью цифровых матриц. Поскольку изготовители цифровых матриц не приводят в их документации абсолютной энергетической чувствительности матрицы в зависимости от длины волны регистрируемого излучения, нами был предложен метод ее измерения. Предлагаемый метод ранее уже был нами опубликован в препринте ФИАН в качестве методического материала по определению чувствительности ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата [16]. В дальнейшем этот метод был применен в задачах изучения генерации гармоник в лазерной плазме [17], в биологических экспериментах [18, 19], в работах по аэросъемке [20].

В настоящей работе изложена суть метода измерения абсолютной энергетической чувствительности цифровой матрицы в зависимости от длины волны регистрируемого излучения, а также приведена методика измерения, реализованная для ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата.

2. ПРИНЦИП МЕТОДА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Суть метода заключается в регистрации изображения излучающего объекта, которая позволяет проводить сравнительную оценку откликов цифровой матрицы в различных спектральных интервалах, а также оценивать яркость (энергетические характеристики) источника в абсолютных энергетических значениях. В общем случае чувствительность приемника S определяется как отношение эффективного значения сигнала приемника к эффективному значению падающей энергии излучения [21, 22]. В литературе зачастую процесс определения чувствительности приемника называют термин “калибровка”, который далее будет использован для уменьшения объема повторяющихся слов, а также для улучшения и простоты восприятия. Выделяются два способа калибровки приемников излучения [23, 24]. Первый способ калибровки предполагает использование источника излучения с известным спектральным распределением энергии. В основе второго способа лежит сравнение величины сигналов двух приемников излучения: калибруемого и заранее прокалиброванного (с известной чувствительностью).

В предлагаемом методе измерения энергетической чувствительности цифровой матрицы лежит первый способ калибровки приемников излучения, который условно можно разделить на несколько этапов. Первый этап – измерение светового потока источника в заданных спектральных интервалах, второй – регистрация излучения источника на цифровую матрицу, третий – определение величины отклика (сигнала) цифровой матрицы, вызванного приходящим на нее излучением, четвертый – расчет чувствительности ПЗС-матрицы. Если матрица чувствительна в очень широком спектральном диапазоне, то достаточно взять монохроматический источник излучения, либо немонохроматический совместно с интерференционным светофильтром, а также калиброванный калориметр, но суть метода не изменится.

Известно, что у не специализированных цифровых матриц имеется “вшитая” программная обработка, которая по-своему обрабатывает приходящий на нее сигнал. Может показаться, что эта программная обработка будет мешать корректному определению энергии зарегистрированного излучения уже в научных экспериментах, после калибровки. Однако, если проводить корректную калибровку цифровой матрицы и научные эксперименты с ней же при фиксированных параметрах матрицы (ISO, разрешение, яркость и др.), то на высчитанное итоговое абсолютное значение энергии зарегистрированного в экспериментах сигнала программная обработка влиять не будет. Таким образом, как при проведении калибровки, так и в экспериментах параметры матрицы должны быть идентичны, тогда программная обработка будет одинаковой в обоих случаях и ее влияние на итоговый результат нивелируется.

Далее приводится поэтапное описание методики, которая в нашем случае была реализована для ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата в спектральном диапазоне 0.4–1.1 мкм. Для нас этот диапазон интересен с точки зрения исследования спектральных и пространственных характеристик лазерной плазмы, а также свойств излучения лазера на неодимовом стекле на основной частоте и его второй гармонике. Помимо этого, матрицы современных промышленных фотоаппаратов оснащаются специальными фильтрами для отсека паразитного излучения вне видимого диапазона длин волн. Однако, несмотря на это, некоторая часть цифровых фотоаппаратов оснащена матрицами, которые чувствуют излучение ближнего инфракрасного (ИК) диапазона. Перечисленными выше факторами и обусловлен отмеченный спектральный диапазон 0.4–1.1 мкм.

Для формирования светового потока заданной величины в узком спектральном интервале мы использовали два типа источников излучения: лазеры, излучающие на разной длине волны, и лампа накаливания с известным спектральным распределением энергии.

Лазерный источник излучения, работающий в непрерывном режиме, удобен при калибровке тем, что имеет практически постоянную мощность излучения, малую расходимость и достаточно узкую ширину линии излучения, что, в свою очередь, обеспечивает воспроизводимость условий и результатов калибровки ПЗС-матрицы, тем более при малых значениях выдержки цифровой матрицы. Однако на практике далеко не всегда имеется возможность подобрать лазер или другой эталонный источник излучения, работающий в узком спектральном диапазоне, в котором необходимо определить энергетическую чувствительность ПЗС-матрицы. В этом случае можно использовать источник с непрерывным спектром излучения и известным спектральным распределением интенсивности излучения, например лампу накаливания типа СИ-208У.

Измерения чувствительности ПЗС-матрицы проводились в заданном спектральном диапазоне. Ширина спектрального диапазона определялась либо шириной линии генерации излучения лазерного источника, либо шириной пропускания интерференционного фильтра. Время воздействия излучения на ПЗС-матрицу определялось выдержкой затвора цифрового фотоаппарата. Способ измерения мощности излучения зависел от типа используемого источника. Измерения мощности лазерного излучения проводились калориметрическим методом. Мощность лампы накаливания СИ-208У в исследуемом спектральном диапазоне измерялась с применением оптической пирометрии [25]. Излучающая площадка лампы СИ-208У изготовлена из вольфрама, и для расчетов плотности потока излучения были использованы законы излучения селективных тел [26–28].

Энергетическая чувствительность нами определялась для промышленного зеркального цифрового фотоаппарата с размером ПЗС-матрицы 15×22 мм². Регистрация изображений источников излучения осуществлялась в формате CRW (Canon Digital Camera Raw Image Format) при чувствительности параметра ISO, равного 400. Для варьирования энергии регистрируемого ПЗС-матрицей излучения изменялись суммарный коэффициент пропускания системы светофильтров и выдержка фотоаппарата. Послабляющие светофильтры использовались для обеспечения нахождения уровня сигнала в области нормальных почернений, исключая уровни шумов и перенасыщения. Обработка фотографий проводилась на персональном компьютере с помощью стандартных общедоступных программ. Вначале путем перевода изображения в градации серого (0–255) удалялась информация о цвете, затем определялся уровень сигнала в относительных единицах.

Чувствительность ПЗС-матрицы в виде $1/S$ определялась по формуле из [21, 22]:

$$\frac{1}{S} = \frac{W}{I}, \quad (1)$$

где W – плотность энергии излучения источника, I – интенсивность в относительных единицах градаций серого, характеризующая отклик ПЗС-матрицы (величину регистрируемого сигнала).

Экспериментальная схема регистрации излучения от источника для измерения энергетической чувствительности ПЗС-матрицы включала в себя источник излучения, диафрагму, внешнюю линзу (при необходимости) и саму ПЗС-матрицу цифрового фотоаппарата, которые располагались на одной оптической оси. Оригинальный объектив цифровой камеры был удален, чтобы матрица была видна непосредственно при открытом затворе. В этом случае источник излучения напрямую освещал матрицу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЗС-МАТРИЦЫ

Формула (1) в случае лазерного источника излучения приобретает вид

$$\frac{1}{S} = \frac{W}{I} = \frac{E}{sI} = \frac{4PtT_K}{\pi d^2 I},$$

где E – энергия излучения лазера, s – площадь участка ПЗС-матрицы, засвеченного лазерным излучением, P – мощность источника лазерного излучения, t – время экспозиции, которое определяется выдержкой фотоаппарата и устанавливается вручную, T_K – суммарный коэффициент пропускания светофильтров, d – диаметр пятна излучения на ПЗС-матрице.

Итоговая величина энергетической чувствительности ПЗС-матрицы определялась как усредненное значение по всем проведенным измерениям для конкретной длины волны. Полученные значения для разных длин волн представлены в табл. 1.

Таблица 1. Энергетическая чувствительность ПЗС-матрицы.
Лазерный источник излучения.

Длина волны λ , мкм	Энергетическая чувствительность I/S , Дж/(см ² ·дел.)
1.064 (YAG:Nd)	$4.2 \cdot 10^{-6}$
0.632 (He-Ne)	$1.8 \cdot 10^{-10}$
0.532 (вторая гармоника YAG:Nd)	$4.8 \cdot 10^{-11}$

Как следует из табл. 1, для измеренных длин волн излучения максимальной чувствительностью ПЗС-матрица обладает на длине волны излучения 0.532 мкм. При переходе от длины волны излучения 0.532 мкм к длине волны 0.632 мкм энергетическая чувствительность ПЗС-матрицы спадает всего лишь примерно на порядок. Однако в случае длины волны излучения 1.064 мкм чувствительность уменьшается значительно – на 5 порядков, что в основном связано с тем, что на ПЗС-матрицы цифровых фотоаппаратов

массового производства наносятся специальные ИК-фильтры, для отсекающего излучения этого спектрального диапазона.

Относительная погрешность при определении чувствительности ПЗС-матрицы в проведенных экспериментах складывается из ошибки прямых измерений диаметра пятна на матрице и измерении мощности лазерного излучения калориметром, и суммарно не превышает 15 %.

В случае лампы накаливания чувствительность ПЗС-матрицы определялась по формуле

$$\frac{1}{S} = \frac{WtT_k\Omega}{I},$$

где W – расчетная плотность потока мощности лампы (СИ-208У) для выделенного спектрального интервала и в заданный телесный угол, I – величина отклика, t – время выдержки на фотоаппарате, T_k – суммарный коэффициент пропускания оптической системы для конкретной длины волны, Ω – телесный угол, выделяемый диафрагмой, расположенной по направлению нормали к поверхности излучающей площадки. При расчетах источник излучения принимался ламбертовским.

Как отмечалось ранее, для такого источника излучения, как лампа типа СИ-208У, применяется закон теплового излучения селективных тел, по которому определяется мощность излучения. Лампа имеет вольфрамовую излучающую площадку в форме прямоугольника. Каждый используемый интерференционный фильтр ограничивает спектральный диапазон примерно до 200 Å с максимумом пропускания на определенной длине волны (1.064, 0.707, 0.532, 0.427 мкм).

С помощью оптического пирометра определялась температура излучающей площадки лампы накаливания. Расчет температуры проводился, исходя из равенства спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела r_{λ,T^*} и спектральной плотности энергетической светимости для материала $r_{\lambda,T}$, из которого сделана нить пирометра (вольфрам) [29].

Итоговое выражение для вычисления температуры выглядит следующим образом:

$$T = \frac{14380}{\lambda \ln(\varepsilon_{\lambda T} e^{\frac{14380}{\lambda T^*}} - \varepsilon_{\lambda T} + 1)},$$

где λ – длина волны излучения, пропускаемого светофильтром пирометра, T^* – зафиксированная пирометром температура, $\varepsilon_{\lambda T}$ – спектральный коэффициент излучения для нити накаливания пирометра, соответствующий длине волны излучения λ (в нашем случае $\lambda = 660$ нм). Ошибка при вычислении температуры по формуле Планка определяется по формуле [29]

$$\Delta T = T \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda, T}}{\varepsilon_{\lambda, T}}$$

Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda T}$ был взят из справочника [23, 24]. Как уже отмечалось, излучающая площадка используемого источника излучения изготовлена из вольфрама, поэтому для расчетов плотности потока излучения использовались законы излучения селективных тел [26–28].

Плотность потока излучения источника в заданном спектральном интервале в ограниченный телесный угол имеет вид

$$W_{(\lambda_1-\lambda_2)} = (z_1 - z_2) 5.67 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \varepsilon_{\lambda T}$$

$$\text{где } z_{1,2} = \int_0^{\lambda_{1,2}} r_{\lambda} d\lambda / \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda,$$

$\lambda_{1,2}$ – граничные значения спектрального интервала, выделяемого интерференционным фильтром, λ_M – длина волны, которой соответствует максимум в распределении Планка при абсолютной температуре T излучателя, рассчитываемая по закону Вина, r_{λ} – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела, вычисляемая по формуле Планка, а величины z являются табличными [23, 24].

На основе описанной методики была определена энергетическая чувствительность ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата для разных длин волн излучения с ламповым источником. Итоговая величина чувствительности определялась как усредненное значение по всем проведенным измерениям для данной длины волны. Данные по чувствительности ПЗС-матрицы для значения параметра ISO, равного 400, представлены в табл. 2. Видно, что, как и в случае лазерного источника излучения, при использовании лампы накаливания чувствительность ПЗС-матрицы при $\lambda = 0.53$ мкм является наибольшей, а при $\lambda = 1.06$ мкм – наименьшей.

Таблица 2. Энергетическая чувствительность ПЗС-матрицы.
Ламповый источник излучения

Длина волны λ , мкм	Энергетическая чувствительность I/S , Дж/(см ² ·дел.)
1.06	$6.3 \cdot 10^{-6}$
0.707	$6.0 \cdot 10^{-8}$
0.53	$1.1 \cdot 10^{-10}$
0.424	$4.7 \cdot 10^{-10}$

Недостатком калибровки ПЗС-матрицы с помощью лампового источника является наличие большого количества косвенных измерений и трудоемких расчетов. При ошибке измерения температуры оптическим пирометром на 15 °С (относительная погрешность менее 1 %) при температуре 1560 °С ошибка в определении светового потока для заданного

спектрального интервала вблизи $\lambda = 0.53$ мкм составляет более 20 %. Это обусловлено тем, что излучение с длиной волны $\lambda = 0.53$ мкм лежит в области значительного роста спектральной плотности потока излучения. А при ошибке в измерении температуры источника происходит сдвиг кривой спектральной плотности потока излучения, что приводит к существенным изменениям значений энергии для заданного спектрального интервала.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнивая результаты измерений, полученные при использовании лазеров и лампы накаливания, видно, что существует расхождение в значениях чувствительности I/S . Причем величина расхождения чувствительности для длины волны $\lambda = 0.53$ мкм больше, чем для $\lambda = 1.06$ мкм. Это расхождение связано с тем, что ширина спектральных интервалов излучения при калибровке была разная. Для лазерного источника она составляла около 10 \AA , а для лампы накаливания ширина спектрального интервала определялась интерференционными фильтрами и составляла примерно 200 \AA . Кроме того, при использовании лампы интервал спектра, соответствующий длине волны $\lambda = 1.06$ мкм, лежит ближе к длине волны λ_M , чем интервал, соответствующий $\lambda = 0.53$ мкм. Длина волны $\lambda = 0.53$ мкм находится в интервале резкого нарастания светового потока, а длина волны $\lambda = 1.06$ мкм на пологом участке нарастания светового потока. Из этого следует, что небольшие сдвиги в спектральном интервале с максимумом в $\lambda = 0.53$ мкм приводят к значительным изменениям в величине светового потока по сравнению со спектральным интервалом с максимумом в $\lambda = 1.06$ мкм. Соответственно, при сравнении значений чувствительностей, определенных для лазерного источника и лампы накаливания, расхождение этих величин для $\lambda = 1.06$ мкм минимально, а для $\lambda = 0.53$ мкм – максимально.

Недостатком калибровки ПЗС-матрицы с помощью лампы накаливания является большое количество трудоемких расчетов, при этом значения энергетической чувствительности имеют большую ошибку измерения.

С лазерными источниками излучения были проведены эксперименты по определению пороговых значений плотности энергии лазерного излучения, при которых шумовой сигнал по сравнению с рабочим был меньше на порядок, для чего постепенно уменьшалась плотность энергии источника излучения. Пороговые значения плотности энергии были определены для длин волн излучения 0.532 мкм, 0.632 мкм, 1.064 мкм и выдержек фотоаппарата $1/4000$ с, $1/45$ с, 4 с. Выявлено, что при изменении длительности выдержки для каждой длины волны излучения пороговое значение плотности энергии не меняется.

Значения пороговых плотностей энергии представлены в табл. 3, где YAG:Nd – лазер на алюмо-иттриевом гранате, активированным неодимом, а He-Ne – гелий-неоновый лазер.

Таблица 3. Пороговые плотности энергии

Длина волны λ , мкм	Пороговая плотность энергии $E_{пор}$, Дж/см ²
1.064 (YAG:Nd)	$\sim 10^{-5}$
0.632 (He-Ne)	$\sim 10^{-9}$
0.532 (Вторая гармоника YAG:Nd)	$\sim 10^{-10}$

Для излучения с длиной волны 0.532 мкм с применением девятиступенчатого ослабителя излучения при фиксированной выдержке кадра были определены зависимости величины отклика ПЗС-матрицы от интенсивности излучения для значений параметра ISO, равных 200, 400, 800, 1600 (см. рис. 1).

Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала ПЗС-матрицы в градациях серого от интенсивности излучения, попадающего на ПЗС-матрицу...

Видно, что при значениях ISO, равных 200 и 400, зависимости практически линейные, тогда как при больших значениях ISO, равных 800 и 1600, проявляются нелинейные участки. Однако известно, что для получения достоверных значений чувствительности ПЗС-матрицы, пригодных для аналитической обработки, необходимо рассматривать линейный участок характеристической кривой [30]. Получается, что для корректных измерений необходимо проводить исследования при малых значениях параметра ISO.

Для наглядности приведем пример актуального применения полученного значения энергетической чувствительности цифровой матрицы. В работе [31] были получены диаграммы рассеяния лазерного излучения плазмой при взаимодействии основной частоты или второй гармоники излучения лазера на неодимовом стекле с мишенями из меди. Посчитаем количество рассеянного излучения на частоте второй гармоники, принимая для простоты, что рассеяние происходит изотропно. Амплитуда сигнала составляла примерно 210 делений, пропускание светофильтров СЗС (сине-зеленое стекло) и НС (нейтральное стекло) составляет 78.5 % и 0.078 % соответственно, а коэффициент оптических потерь на объективах, окне камеры взаимодействия и торцах световода равен примерно 0.2. С учетом значения $1/S$ для длины волны 0.532 мкм из табл. 1 получается, что энергетическая чувствительность на единицу площади на входных торцах световодов равна $8.2 \cdot 10^{-5}$ Дж/см². Поскольку входные торцы световодов находились на расстоянии примерно 6 см от плазмы, то для полупространства получаем значение энергии $1.85 \cdot 10^{-2}$ Дж. Вся энергия лазерного излучения на частоте второй гармоники, которая воздействовала на мишень, составляла 0.5

Дж. Таким образом получается, что плазмой рассеивается 3.7 % от всей энергии воздействующего лазерного импульса. Однако это примерные расчеты, основанные на предположении об изотропном рассеянии излучения плазмой в 2π -полупространство. На самом деле хорошо известно, что в случае высокотемпературной плазмы, когда формируется критическая плотность, большая часть лазерного излучения отражается обратно в апертуру фокусирующей линзы и суммарное значение рассеянной энергии будет больше 3.7 %. Правда, отраженная обратно доля энергии легко измеряется калориметрическим методом и в совокупности с методом измерения рассеянного излучения позволяет с неплохой точностью следить за балансом энергии. Именно для этого и необходимо знать абсолютную энергетическую чувствительность цифровой матрицы, на которую регистрируется рассеянное плазмой излучение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод измерения абсолютной энергетической чувствительности цифровых матриц в зависимости от длины волны регистрируемого излучения. Метод основан на регистрации цифрового изображения источника излучения с известной величиной излучаемой энергии и дальнейшей обработке цифрового изображения. Принцип метода позволяет игнорировать внутренний программный механизм обработки информации цифровой матрицы при условии идентичности значений параметров цифровой матрицы во время ее калибровки и использования в дальнейших экспериментах. После определения энергетической чувствительности цифровой матрицы становится возможным измерять величину энергии зарегистрированного в экспериментах излучения на цифровую матрицу, а также оценивать яркость источника этого излучения, используя только цифровое изображение излучающего объекта.

Предложенный метод был апробирован для ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата в спектральном диапазоне 0.4–1.1 мкм для источников излучения двух типов – лазерного и лампы накаливания. Апробация показала, что чувствительность ПЗС-матрицы сильно зависит от длины волны регистрируемого излучения. При измерениях с помощью лазерных источников излучения значение энергетической чувствительности ПЗС-матрицы для длины волны $\lambda = 0.532$ мкм соответствует величине $4.8 \cdot 10^{-11}$ Дж/(см²·дел.), а для $\lambda = 1.064$ мкм составляет $4.2 \cdot 10^{-6}$ Дж/(см²·дел.) при фиксированном значении параметра ISO цифрового фотоаппарата, равном 400. Такая разница обусловлена, в первую очередь, тем, что на матрицы цифровых фотоаппаратов массового производства изготовителями наносится специальный ИК-фильтр, чтобы отсекал паразитное излучение. Однако, несмотря на нанесенные ИК-фильтры, многие матрицы цифровых фотоаппаратов массового

производства все же имеют невысокую чувствительность в диапазоне ближнего ИК-излучения. А с учетом того, что во многих научных экспериментах исследуется в том числе ИК-излучение, то применение цифровых фотоаппаратов массового производства оказывается актуальным и приемлемым. Подобную калибровку можно проводить и с отдельными специальными цифровыми матрицами, используемыми как самостоятельное оборудование.

Для длин волн излучения 0.532 мкм, 0.632 мкм и 1.064 мкм были определены пороговые значения плотности энергии лазерного излучения, при которых шумовой сигнал по сравнению с рабочим был меньше на порядок, они составили 10^{-10} Дж/см², 10^{-9} Дж/см² и 10^{-5} Дж/см² соответственно. Для излучения с длиной волны 0.532 мкм были изучены зависимости отклика ПЗС-матрицы от параметра ISO цифрового фотоаппарата и от интенсивности попадающего на нее излучения. Получено, что эти зависимости имеют как линейные участки, так и нелинейные, а сравнение значений чувствительности ПЗС-матрицы, полученных при разных значениях ISO, не будет корректным, поскольку линейный участок при одном значении ISO может попасть на нелинейный участок другого значения ISO. Важно отметить, что как калибровку матрицы, так и дальнейшие экспериментальные исследования с ее использованием следует проводить при идентичных значениях параметров матрицы (чувствительность ISO, разрешение, яркость и др.) с целью нивелирования влияния ее внутреннего программного механизма обработки сигнала.

Следует отметить, что характеристики цифровых матриц индивидуальны, о чем свидетельствуют эксперименты и анализ литературных данных. Таким образом, для проведения корректных измерений с помощью цифровых матриц необходимо проводить калибровку каждого используемого детектора излучения.

В качестве наглядного примера актуальности и необходимости применения данной методики можно привести один из способов диагностики [31], который позволяет регистрировать пространственно-угловую диаграмму рассеяния лазерного излучения плазмой. Зная чувствительность цифровой матрицы, на которую регистрируется рассеянное излучение, можно определять количество излученного или рассеянного плазмой света. Это помогает определять не только яркость источника излучения, но и более точно контролировать баланс энергии процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

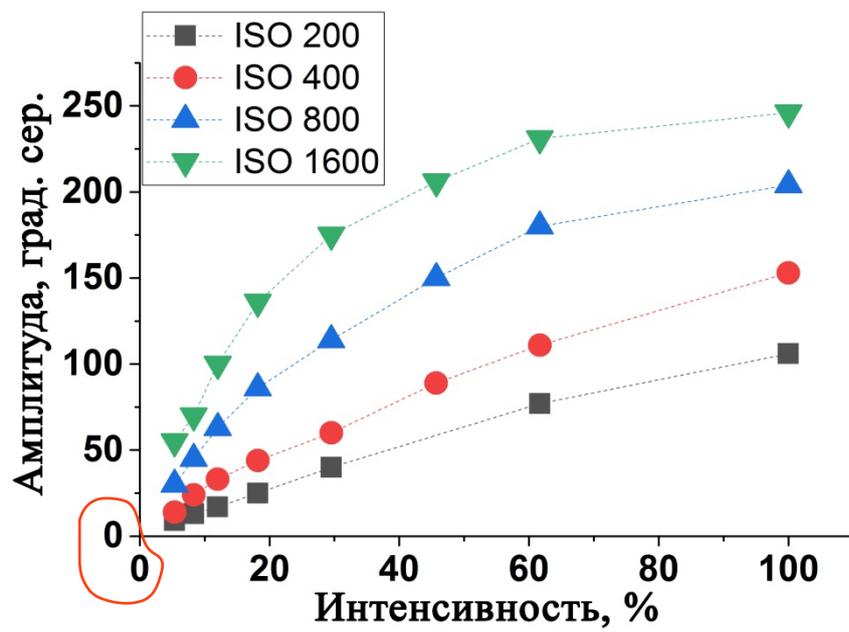
1. *Heard H.G. Laser Parameter Measurements Handbook. New York: Wiley, 1968.*

2. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. / Под ред. А. Ф. Котюка. Москва: Радио и связь, 1981.
3. *Зубов В.А.* Методы измерения характеристик лазерного излучения. Москва: Наука. Физматлит, 1973.
4. *Sarkar P.S., Ray N.K., Pal M.K. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. V. 88. P. 023702. <https://doi.org/10.1063/1.4975376>
5. *Sawosz P., Wojtkiewicz S., Kasprzak M., Zieminska E., Morawiec M., Maniewski R., Liebert A.* // *Biocybern. Biomed. Eng.* 2018. V. 38. P. 966. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2018.08.006>
6. *Wang J., Fu P., Gao R.X.* // *J. Manuf. Syst.* 2019. V. 51. P. 52. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.002>
7. *Hawkes N.C., Delabie E., Menmuir S. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89. P. 10D113. <https://doi.org/10.1063/1.5037639>
8. *Dai Y., Zhu K.* // *Precis. Eng.* 2018. V. 52. P. 183. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.12.006>
9. *Nieves J.L., Valero E.M., Nascimento S.M., Hernández-Andrés J., Romero J.* // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. P. 5696. <https://doi.org/10.1364/ao.44.005696>
10. *Alwazzan M.J.* // *Pol. J. Med. Phys. Eng.* 2020. V. 26. P. 61. <https://doi.org/10.2478/pjmpe-2020-0007>
11. *Alekseeva P.M., Efendiev K.T., Loshchenov M.V. et al.* // *Laser Phys. Lett.* 2020. V. 17. P. 105602. <https://doi.org/10.1088/1612-202x/abae6a>
12. *Lee K.L., Hung C.Y., Pan W.F.* // *J. Chin. Inst. Eng.* 2011. V. 34. P. 75. <https://doi.org/10.1080/02533839.2011.552968>
13. *Боркова В.Н., Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т.* // *Краткие сообщения по физике.* 2006. №7. С. 38. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9439114>
14. *Zhang Y., Zhang W., Dong Z., Shu S., Dong J., Xing C.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2020. V. 91. P. 064904. <https://doi.org/10.1063/1.5129758>
15. *Wang J., Wang N., Wang X., & An Z.* // *Optik.* 2014. V. 125. P. 2684. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.11.064>
16. *Васин Б.Л., Малькова С.В., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Федотов С.И., Фроня А.А.* Методика измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы. Препринт ФИАН, 2007. С. 18.
17. *Васин Б.Л., Малькова С.В., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Федотов С.И., Фроня А.А., Шутяк В.Г.* // *Прикладная физика.* 2009. № 6. С. 152.
18. *Нотченко А.В., Градов О.В.* // *Журнал радиоэлектроники.* 2012. № 1. С. 0014.

19. Градов О.В., Нотченко А.В. // Морфология. 2012. Т. 6. № 1. С. 5.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17697463>
20. Арбузов С.А., Грицкевич Е.В. Интерэкспо Гео-Сибирь. Сибоптика-2018. 2018. Т. 2. С. 62.
21. Brunner W., Klaus J. Wissensspeicher Lasertechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1987.
22. Напартович А.П. Справочник по лазерной технике. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
23. Wolfe W.L., Zissis G.J. The Infrared Handbook (Revised Edition). Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1989.
24. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. В 4-х томах. Том 1. Физика ИК-излучения. Москва: Мир, 1995.
25. Магунов А.Н. // Фотоника. 2012. №1. С. 40.
26. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Ленинград: Машиностроение, 1980.
27. Bramson M.A. Infrared Radiation: A Handbook for Applications. New York: Springer-Verlag, 2013.
28. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. Москва: Наука, 1964.
29. Гордов А.Н. Основы пирометрии. Москва: Металлургия, 1971.
30. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Москва: Радио и связь, 1991.
31. Sahakyan A., Puzyrev V. // Optik. 2021. V. 246. P. 167807.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167807>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала ПЗС-матрицы в градациях серого от интенсивности излучения, попадающего на ПЗС-матрицу, в процентах от максимального пропускания девятиступенчатого ослабителя при различных значениях ISO.



общий нуль

Рис. 1.