СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.Алиев, Б.Рашидов, Ф.Омонбоев

Мақолада инфрақизил нурларни кремний фотоэлектрик сруктуралар ёрдамида ўлчашнинг янги усули таклиф этилган ва ишлаб чиқилган. Янги ўлчаш усули синовдан ўтказилган ва илмий асосланган.

***Калит сўзлар**: инфрақизил нурлар, нур энергиясининг дастадаги тақсимоти, кремнийли фотоэлемент, модулятор, германийли фильтр, рақамли ўлчагич.*

В работе предложен и разработан новый способ измерения мощности ИК-излучения при помощи кремниевых фотоэлектрических структур. Приведены результаты испытания и научно обоснован данный способ.

***Ключевые слова**: ИК-излучение, распределение энергии в пучке, кремниевый ФЭП, модулятор, германиевый фильтр, цифровой измеритель.*

In the work a new way of measurement of capacity of IR-radiation by means of silicon photo-electric structures is offered and developed. Results of testing are presented and the new way is scientifically proved.

***Key words**: IR-radiation, energy distribution in a bunch, silicon photoelectric cell, the modulator, the germanium filter, a digital measuring instrument.*

Вопрос измерения энергетических параметров и характеристик лазерного излучения является одной из важных проблем широкого использования лазерных технологий в различных отраслях экономики. Для измерения параметров лазерного излучения могут быть использованы методы, основанные на различных физических и химических эффектах взаимодействия лазерного излучения с веществом. Наиболее широкое распространение получили такие методы, основанные на преобразовании энергии лазерного излучения в тепловую энергию и непосредственно в электрический ток. Также применяется пондеремоторный метод, основанный на преобразовании энергии лазерного излучения в механическую энергию [1-3].

Взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) с веществом стало одной из наиболее актуальных проблем современной науки и техники. Действие излучения существенно зависит от параметров излучения таких, как: длина волны, мощность и энергия. Поэтому, при исследовании процессов воздействия ЛИ на вещество важно тщательное измерение таких параметров, как мощность и энергия луча, распределение энергии в сечении пучка.

В области ближнего ИК- излучения (λ<1.5мкм) применяются разнообразные приемники. Но для регистрации и измерения ИК- излучения с длиной волны 10,6 мкм (CO_2 - лазера) применяются лишь несколько типов приемников. К ним относятся фотоэлементы на основе полупроводникового соединения *CdHgTe*, германия с примесью золота или меди; полупроводниковые болометры; пироэлектрические приемники.

Фотоэлементы считаются самыми чувствительными приемниками, так как они непосредственно выдают электрические сигналы. Однако фотоэлементы, созданные на основе *CdHgTe* работают при глубоком охлаждении (T=77 ^oK), что вызывает соответствующие сложности при эксплуатации. Полупроводниковые болометры обычно характеризуются низкой чувствительностью и низким быстродействием, кроме того, они применяются для излучения с ограниченным пределом мощности. Пироэлектрические приемники имеют высокую чувствительность и хорошее быстродействие, но они рассчитаны на регистрацию слабых по мощности излучений.

В связи с этим предстояла задача – разработать новый способ измерения мощности ИК-излучения, который позволил бы расширить функциональные возможности используемого прибора так, чтобы можно было измерять не только мощность излучения, но и распределение энергии по профилю пучка.

Для решения поставленной задачи было предложено использовать кремниевые фотоэлектрические приемники (ФЭП) в качестве приемника теплового потока ИК-излучения. В результате действия теплового потока ИК-излучения на кремний температура ФЭП изменяется в зависимости от поглощаемой энергии. Если дополнительной подсветкой видимого излучения (в области спектральной чувствительности кремния) создать исходную фото э.д.с, то под тепловым действием ИК-излучения изменяется значение фото э.д.с. $U_ф$ согласно известной формуле:

$$U_ф = (\beta kt/q)\ ln((J_ф/J_o)+1) \qquad (1)$$

где $J_ф$ - фото ток, J_o - темневой ток насыщения. Известно, что уменьшение фото э.д.с. или напряжения холостого хода ФЭП связано с увеличением обратного тока насыщения при повышении его температуры [4]. Экспериментальные значения температурного коэффициента фото э.д.с. холостого хода кремниевых ФЭП ($dU_ф/dT$) обычно составляют 1,9 ÷ 2,5 *мВ/град* и несколько меняются от элемента к элементу, но постоянны для каждого прибора в широком диапазоне освещенности и температуры. Самое главное - прямолинейное изменение $U_ф$ ФЭП от температуры сохраняется в широком температурном диапазоне.

Для осуществления предложенного способа разработано новое устройство, блок-схема которого приведена на рис. 1. Устройство содержит кремниевый ФЭП 4 с *р-п*-переходом 4^{11} и омическими контактами 4^1, источник подсветки 6, регистратор напряжения 5. ФЭП изготовлен методом ионного внедрения фосфора в эпитаксиальную поликристаллическую пленку кремния *р*-типа проводимости с удельным сопротивлением 5 *Ом×см*, выращенного из газообразной фазы на низкоомной (~0, 1 *Ом×см*) подложке из кремния *р*-типа проводимости.

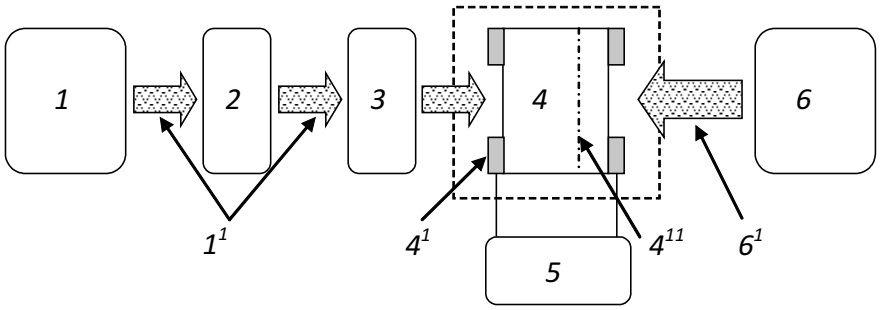

Рис. 1. *Блок-схема для измерения мощности потока ИК-излучения: 1-источник ИК-излучения, 2-модулятор, 3-затвор, 4-кремниевый ФЭП, 4^1-омические контакты, 4^{11}-р-п-переход, 5-цифровой измеритель, 6-источник видимого света, 6^1-пучок видимого излучения.*

Сформированный источником 1 типа ЛГ-25 или ИЛГН-109 ИК-луч был направлен на ФЭП 4 через ослабитель мощности 2 (типа К945.04 от измерителя ИМО-2Н) и автоматический затвор 3, который позволяет экспозировать с погрешностью ≈0,01 *с*.

Результаты контрольного измерения представлены на рис. 2, где приведены графические зависимости фото э.д.с. холостого хода $U_ф$ ФЭП и выходного сигнала *S* от мощности ИК-излучения *W* для времени экспозиции τ, равному 5 *с* (кривые *1, 1'*) и 10 *с* (кривые *2, 2'*).

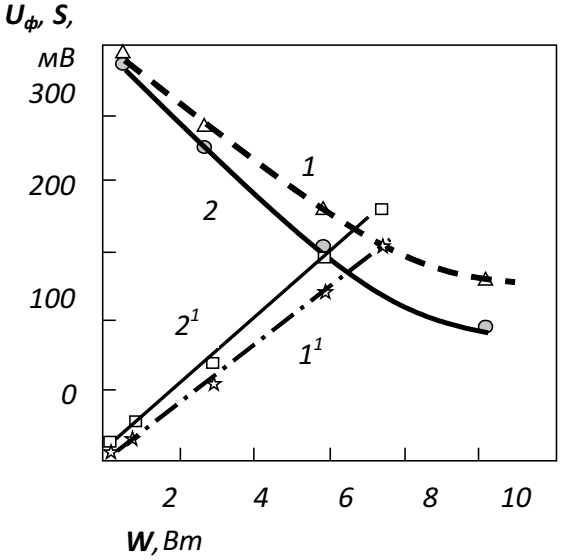

Рис. 2. *Зависимость $U_ф$ и сигнала S от мощности потока ИК-излучения:* кривые *1* и *1^1-время экспозиции* $\Delta\tau$*=5 с;* кривые *2* и *2^1-* $\Delta\tau$*=10 с.*

Как видно из графика, с ростом мощности излучения *W* линейно уменьшается (кривые *1* и *2*), т.е. с изменением мощности излучения возникает линейный сигнал *S* (кривые *1'* и *2'*). Согласно зависимости *S(W=E/t)* полученные кривые могут служить градуировочными кривыми для определения мощности луча или переносимой им энергии *E.* Нарушение линейности *S(W)* при *W>7 Bm* (кривая *2*) связано с перегревом ФЭП. Как свидетельствуют эксперименты, можно исключить подобное нарушение линейности *S(W)* путем снижения времени экспозиции (кривая *1*). Следовательно, для расширения диапазона измерения по мощности ИК-излучения в большую сторону необходимо дальнейшее снижение времени экспозиции.

Таким образом, измерением сигнала *S*, т.е. изменения $U_ф$ ФЭП, по градуировочной кривой можно определить мощность или энергию ИК-излучения. При этом важным является то, что ФЭП обладают высокой чувствительностью к нагреву по сравнению с полупроводниковыми болометрами, так как имеют диодную структуру с плоским *р-п*-переходом.

Физическую природу предложенного способа измерения ИК-излучения можно представит следующим образом. ФЭП в устройстве расположен так, что подсветка направлена на его лицевую поверхность, вблизи которой сформирован *р-п*-переход, а измеряемое ИК-излучение направлено на противоположную ей поверхность (рис. 1). Преимущественное поглощение ИК-излучения происходит вблизи падающей поверхности, вследствие чего поверхностная область нагревается и возникает градиент температуры *dT* по толщине кремния *dx*. Тепловой поток *dQ*, направленный вглубь полупроводника через поперечное сечение *ds* за время *dt* определяется выражением

$$dQ = \lambda\ (dT/dx)\ ds\ dt, \qquad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала. При достижении теплового потока *dQ* границы раздела *р-п*-перехода происходит изменение исходного фото э.д.с., созданной при помощи видимого излучения(подсветки). Это изменение происходит до тех пор, пока температура области *р-п*-перехода не достигнет максимального значения, при котором зафиксируется измеряемый сигнал *S*. Инерционность этого устройства определяется промежутком времени *dt* или, как видно из выражения, толщиной *dx*. Другими словами, так как тепловой поток *dQ* передается через всю толщину ФЭП (dx_{Si}) и она намного превышает глубину залегания *р-п*-перехода ($dx_{Si} >> dx_{p-n}$), предложенное устройство имеет высокую инерционность, что подтверждалось при экспериментальных измерениях. Восстановление исходного значения фото э.д.с. происходило в течение 1 ÷ 4 с при вышеуказанном интервале мощности. Для снижения инерционности ФЭП предложено расположить его так, чтобы ИК-излучение и подсветка были направлены на одну и ту же лицевую поверхность. Для повышения эффективного поглощения ИК-излучения в поверхностной области, на поверхность ФЭП нанесена пленка из окиси кремния SiO_x методом вакуумного термического испарения. Эта пленка одновременно служит в качестве антиотражающего покрытия для видимого излучения (подсветки).

Выполнение измерения и физическая интерпретация результатов позволили предложить новое комбинированное фотоэлектрическое устройство для измерения мощности ИК и видимого излучения.

Предложенное устройство (рис. 3) содержит полупроводниковый фильтрующий элемент 1, выполненный в виде плоской пластины из монокристаллического германия, который имеет коэффициент пропускания для λ = 10,6 мкм в порядке 90 %, кремниевый ФЭП 2, излучатель видимого диапазона 4 (светодиод или лампочка накаливания), измерительную схему 3, источник питания 5 с переключателем 6.

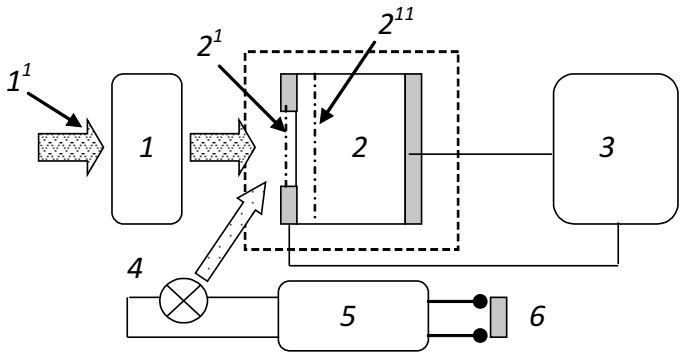

Рис. 3. *Блок-схема комбинированной системы для измерения мощности потока видимого и ИК-излучения: 1-фильтр, 2-кремниевый ФЭП, 3-цифровой измеритель, 4-источник видимого света, 5-источник питания, 6-переключатель.*

Комбинированное устройство работает в двух режимах следующим образом:

а) для измерения мощности видимого излучения необходимо снять фильтрующий элемент 1 (рис. 3); в результате световой поток падает на лицевую поверхность ФЭП 2, где непосредственно преобразуется в электрический сигнал (вентильный фотоэффект); измерение сигнала (фото э.д.с.**)** при помощи схемы 3 позволяет определить мощность падающего излучения;

б) для измерения мощности ИК-излучения, в частности для λ = 10,6 *мкм*, необходимо включить (переключателем 6) излучатель 4, который создает исходный фото э.д.с. на ФЭП 2. Кремниевый ФЭП 2 содержит плоский *р-п*-переход 2^{11}, расположенный перпендикулярно направлению падения ИК-излучения, а также антиотражающее покрытие 2^{1} из оксида кремния, которое является хорошим поглотителем для ИК-излучения. Это, в свою очередь, обеспечивает высокую тепловую чувствительность *р-п*-структуры. Фильтрующий элемент 1 пропускает только ИК-излучение, под тепловым действием которого происходит изменение $U_{ф}$, т.е. возникает сигнал *S;* измерением *S* по градуировочной кривой определяется мощность ИК- излучения.

Предложенный способ измерения мощности излучения позволяет значительно упростить процесс измерения. Измерение проводится при комнатной температуре. Как показывают эксперименты, мощность излучения в значительно широком диапазоне по сравнению с другими методами можно измерить с использованием кремниевых ФЭП. Использование ФЭП с диодной структурой, к тому же на пленочной основе, позволяет создать приемники с высокой чувствительностью и быстродействием, которые могут конкурировать с пироэлектрическими приемниками.

Перспективной является возможность изготовления приемника в матричном виде на основе предложенного способа измерения. Матрицы из кремниевых ФЭП позволяют наиболее точно измерять распределение энергии по профилю луча. Создание многоэлементных матриц на основе ФЭП может иметь большое значение в разработке приемников теплового изображения с высокой разрешающей способностью.

Литература:

1. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В., Животовский И.В., Сахаров А.А., Семенков В.П. Лазерные приборы и методы измерения дальности. Под ред. В.Е. Карасика.- М.: Изд-во. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 92 с.

2. Котюк А.Ф. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения.- М.: Радио и связь, 1981. - 288 с.

3. Нелепец А.В., Тарлыков В.А. Применение лазеров в измерительных устройствах. Учебное пособие.- СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. - 142 с.

4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. Перевод с англ. под ред. М.М.Колтуна.- М.: Энергоатомиздат, 1987. - 287 с.

Андижон давлат университети,
2017 йил 21 ноябрда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. И.Каримов)