

*Досліджено спектрально-селективні характеристики прозорих металодіелектричних структур з енергозберігаючими властивостями на основі нанорозмірних шарів алюмінію. Встановлено, що покриття на основі алюмінію з товщинами до 5 нм мають низькоемісійні властивості, а з товщинами більше 20 нм – рефлекторні властивості. Надано рекомендації щодо практичної реалізації структур з енергозберігаючими властивостями*

*Ключові слова: металодіелектричні структури, нанорозмірні шари, спектрально-селективні характеристики, енергозбереження, чисельне моделювання*

*Исследованы спектрально-селективные характеристики прозрачных металлодиэлектрических структур с энергосберегающими свойствами на основе наноразмерных слоев алюминия. Установлено, что покрытия на основе алюминия с толщинами до 5 нм обладают низкоэмиссионными свойствами, а с толщинами более 20 нм – рефлекторными свойствами. Предложены рекомендации по практической реализации структур с энергосберегающими свойствами*

*Ключевые слова: металлодиэлектрические структуры, наноразмерные слои, спектрально-селективные характеристики, энергосбережение, численное моделирование*

## РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

**А. В. Борисова**

Ведущий инженер  
Центр развития  
информационного общества НТУУ «КПИ»\*\*  
E-mail: al-borisova@mail.ru

**В. Г. Вербицкий**

Доктор технических наук, профессор\*  
E-mail: V.G.Verbitskiy@gmail.com

**А. В. Мачулянский**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: machulansky@gmail.com

**М. К. Родионов**

Кандидат физико-математических наук, профессор\*  
E-mail: m.rodionov@kpi.ua

\*Кафедра микроэлектроники, факультет электроники  
\*\*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

### 1. Введение

Металлодиэлектрические структуры с наноразмерными слоями металла обладают уникальными электромагнитными свойствами, что делает их перспективными для создания на их основе: функциональных покрытий, сенсоров физических величин, электромагнитных широкополосных селективных фильтров, покрытий для фотоэлектрических и фототермических преобразователей энергии [1].

Особый интерес представляют прозрачные металлодиэлектрические структуры с энергосберегающими свойствами на основе наноразмерных слоев металла на оптически прозрачной диэлектрической подложке для уменьшения энергетических потерь через световые проемы [2].

Оценки показывают, что значительная часть общего энергопотребления теряется на поддержание теплового и светового комфорта в помещениях зданий и сооружений. Из них до 40 % теряется через стекла световых проемов. В масштабах Украины такие потери равнозначны годовым затратам газа в 8 млрд. куб. м., что в ценах мая 2014 года эквивалентно 4 млрд. долларов.

Порядка 50 % потерь энергопотребления приходится на тепловое излучение стекол в ближнем инфракрасном

(ИК) диапазоне длин волн. Устраняются такие потери только применением прозрачных теплоотражающих покрытий, получивших названия энергосберегающих. По экспериментальным данным они сокращают указанные потери с 50 % до 2 %. Однако достижение такого результата требует учета многочисленных факторов, которые влияют на энергосбережение.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Изменением спектрально-селективных характеристик энергосберегающих покрытий им придаются свойства электромагнитных фильтров, которые разделяют излучения от высокотемпературного источника (Солнца) и низкотемпературного (помещения) [3]. В этом случае в помещение пропускается солнечное высокотемпературное излучение и отражается излучение низкотемпературного источника.

В настоящее время такие энергосберегающие свойства достигаются, в основном, многослойными интерференционными структурами на основе чередующихся пленок благородных металлов (серебра, золота) и диэлектрика.

Такие покрытия [4] имеют существенные недостатки, а именно: сложность технологии изготовления и прецизионного контроля параметров многослойных структур; недостаточная механическая прочность; высокая себестоимость покрытий и др. Кроме этого, в многослойных структурах на основе серебра имеют место сложные фотохимические реакции под действием солнечного излучения и атмосферы, что ведет к деградации покрытий [3].

Поэтому, как научный, так и практический интерес представляет разработка и исследование наиболее приемлемых для массового промышленного производства стабильных энергосберегающих оптически прозрачных покрытий, имеющих низкую стоимость. Эти проблемы могут быть решены за счет: уменьшения количества технологических операций и оптимально подобранных технологических режимов при формировании покрытий; применения материалов, широко используемых в микроэлектронной технологии; оптимизации электромагнитных параметров и микроструктуры компонентов покрытия [2].

В работе [5] показано, что эксплуатационная стабильность металлодиэлектрических структур с наноразмерной металлической компонентой определяется свойствами диэлектрической компоненты. В этой связи особый интерес представляют диэлектрические материалы оксида и нитрида алюминия, которые имеют высокие защитные свойства и химическую стойкость [6].

С этой точки зрения особый интерес представляют металлодиэлектрические структуры на основе наноразмерных слоев алюминия. Такие структуры могут быть реализованы в виде наноразмерных монослоев алюминия с защитными просветляющими слоями оксида или нитрида алюминия. Из работ [7, 8] следует, что методом реактивного ионно-плазменного распыления алюминия путем варьирования технологических режимов синтеза можно формировать пленки различного состава: нитрид алюминия AlN, оксинитрид алюминия  $Al_xO_yN_z$  и оксид алюминия  $Al_2O_3$ .

Таким образом, методом реактивного ионно-плазменного распыления алюминия путем варьирования технологических режимов можно изменять состав и микроструктуру металлодиэлектрических структур на основе алюминия и формировать покрытия с заданными спектрально селективными характеристиками. Для установления взаимосвязи оптических параметров синтезируемого металлодиэлектрического покрытия с параметрами и микроструктурой его компонент необходимо разработать алгоритм расчета оптических параметров металлодиэлектрических структур. На основе разработанного алгоритма выполнить численное моделирование спектрально-селективных характеристик металлодиэлектрических структур.

### 3. Цель и задачи исследований

Целью данной работы являлась разработка металлодиэлектрических структур с энергосберегающими свойствами на основе наноразмерных слоев алюминия.

Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи:

– разработать алгоритм расчета параметров оптических характеристик металлодиэлектрических структур;

– провести численное моделирование спектрально-селективных характеристик металлодиэлектрических структур на основе наноразмерных слоев алюминия.

### 4. Методика расчета параметров спектрально селективных характеристик металлодиэлектрических структур

Для расчетов параметров спектрально селективных характеристик металлодиэлектрических структур разработан алгоритм на основе метода матриц переноса [9–11].

Преимуществом используемого метода является то, что он не накладывает каких-либо ограничений на количество слоев и может быть использован для расчета как многослойных, так и однослойных структур.

Расчеты выполнены при следующих приближениях:

– слоистая структура состоит из  $N$  плоскопараллельных, однородных, изотропных слоев;

– каждый слой характеризуется эффективной толщиной  $d_i$  ( $i$  – индекс слоя), спектральными комплексными электромагнитными параметрами  $\epsilon_i^*$  и  $\mu_i^*$ ;

– покрытия расположены между двумя полубесконечными однородными и изотропными средами (в нашем случае – воздух с показателем преломления равным единице).

Для спектрального оптического интервала и покрытия состоящего из диэлектрической и металлической компонент, слои характеризуются комплексным показателем преломления:

$$n_{kj}^* = n_{kj} - ik_{kj},$$

где  $n_{kj}$ ,  $k_{kj}$  – соответственно, показатели преломления и поглощения слоя.

В исследуемых нами диэлектрических компонентах при отсутствии поглощения  $n_{kj}^* = n_{kj}$ , и немагнитного металла (алюминий)  $\mu_i^* = 1$ .

В соответствии с [7, 8] монохроматические энергетические коэффициенты пропускания  $T_\lambda$  и отражения  $R_\lambda$  со стороны покрытия для неполяризованного света представляются выражениями:

$$T_\lambda = \frac{n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1} \left( \frac{|t_{\lambda s}|^2 + |t_{\lambda p}|^2}{2} \right),$$

$$R_\lambda = \left( \frac{|r_{\lambda s}|^2 + |r_{\lambda p}|^2}{2} \right), \quad (1)$$

где  $r_{\lambda s}$ ,  $r_{\lambda p}$ ,  $t_{\lambda s}$ ,  $t_{\lambda p}$  – монохроматические френелевские коэффициенты отражения и пропускания для s- и p-составляющих поляризованного света,  $\cos \alpha_1$  и

$\cos \alpha_2 = \frac{1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1}$  – косинусы углов, образованных лучом с нормалью к поверхности раздела сред: воздух – покрытие и покрытие-подложка.

Величины в выражении (1) определяются приравниванием соответствующих элементов матриц в левой и правой частях нижеследующих матричных соотношений для s- и p-компонентов поляризованного света:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & -r_{\lambda s} \\ t_{\lambda s} & t_{\lambda s} \\ r_{\lambda s} & (t_{\lambda s}^2 - r_{\lambda s}^2) \\ t_{\lambda s} & t_{\lambda s} \end{bmatrix} = \\ & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_1 \cos \alpha_1 & -n_1 \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \times \\ & \times \left\{ \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos \pi b_{\lambda j} & i \frac{\sin \pi b_{\lambda j}}{n_{\lambda j} \cos q_{\lambda j}} \\ i n_{\lambda j} \cos q_{\lambda j} \sin \pi b_{\lambda j} & \cos \pi b_{\lambda j} \end{bmatrix} \right\} \times \\ & \times \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_2 \cos \alpha_2 & -n_2 \cos \alpha_2 \end{bmatrix}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \begin{bmatrix} 1 & -r_{\lambda p} \\ t_{\lambda p} & t_{\lambda p} \\ r_{\lambda p} & (t_{\lambda p}^2 - r_{\lambda p}^2) \\ t_{\lambda p} & t_{\lambda p} \end{bmatrix} = \\ & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\cos \alpha_1}{n_1} \\ 1 & -\frac{\cos \alpha_1}{n_1} \end{bmatrix} \times \\ & \times \left\{ \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos \pi b_{\lambda j} & i \frac{\cos q_{\lambda j} \sin \pi b_{\lambda j}}{n_{\lambda j}} \\ i n_{\lambda j} \sin \pi b_{\lambda j} & \cos \pi b_{\lambda j} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{n_2}{\cos \alpha_2} & -\frac{n_2}{\cos \alpha_2} \end{bmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $b_{\lambda j} = \frac{2n_{\lambda j}d_j}{\lambda} \cos q_{\lambda j}$  – порядок интерференции в слое  $j$  для длины волны  $\lambda$ .  $\cos q_{\lambda j} = \frac{1}{n_{\lambda j}} \sqrt{n_{\lambda j}^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1}$  – косинус угла преломления в слое  $j$  для длины волны  $\lambda$ .

На основе вышепредставленных соотношений разработан алгоритм расчета в программной среде MatLAB для энергетических коэффициентов пропускания и отражения металлодиэлектрических структур.

В качестве исходных данных для расчета металлодиэлектрических структур с энергосберегающими свойствами применялись значения оптических параметров тонкопленочных слоев алюминия [12].

Влияние просветляющих слоев на спектральные характеристики структур исследовалось на следующих диэлектрических материалах: оксид алюминия и нитрид алюминия.

Численные расчеты проводились на основе оптических параметров тонких пленок нитрида алюминия и оксида алюминия, полученных авторами методом реактивного магнетронного распыления и представленные в работе [8].

## 5. Результаты исследований спектральных характеристик металлодиэлектрических структур на основе наноразмерных слоев алюминия

Результаты численного моделирования спектральных зависимостей коэффициентов отражения (а) и пропускания (б) металлодиэлектрических структур Al-SiO<sub>2</sub> для различных толщин наноразмерного слоя алюминия (1 – 5 нм; 2 – 20 нм; 3 – 100 нм) представлены на рис. 1, а, б.

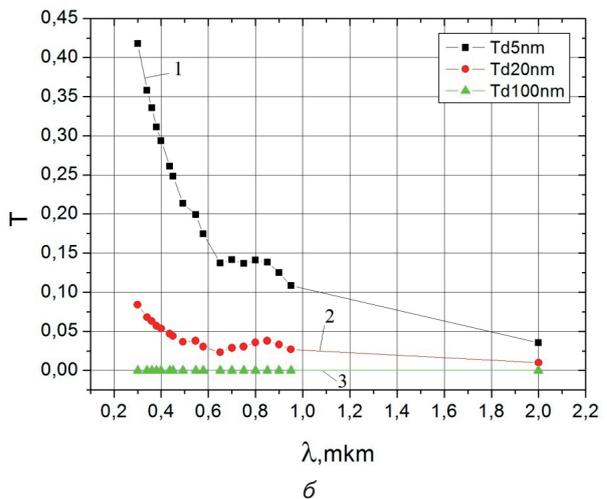
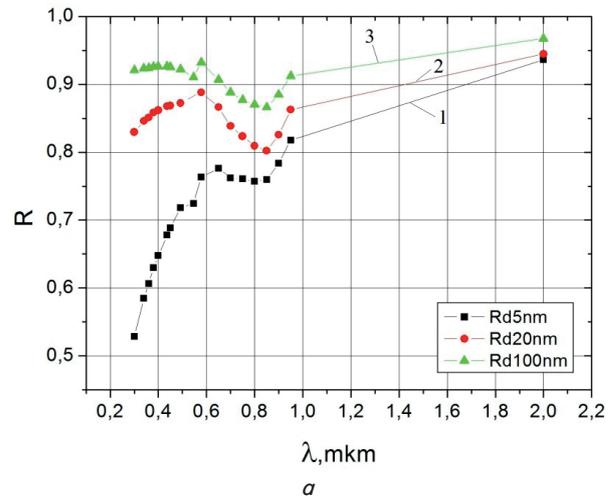


Рис. 1. Спектральные зависимости металлодиэлектрических структур Al-SiO<sub>2</sub> для различных толщин наноразмерного слоя металла (1 – 5 нм; 2 – 20 нм; 3 – 100 нм): а – коэффициентов отражения; б – коэффициентов пропускания

Из приведенных зависимостей следует, что в спектральном диапазоне 0,3–0,7 мкм для толщины слоя металла до 5 нм значения коэффициента отражения находятся в интервале 0,52–0,75 и при увеличении толщины слоя до 20 нм имеют тенденцию к увеличению.

Примеры численного моделирования металлодиэлектрических структур с наноразмерным слоем алюминия и с просветляющими покрытиями на основе оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и нитрида алюминия AlN<sub>3</sub> представлены на рис. 2, 3.

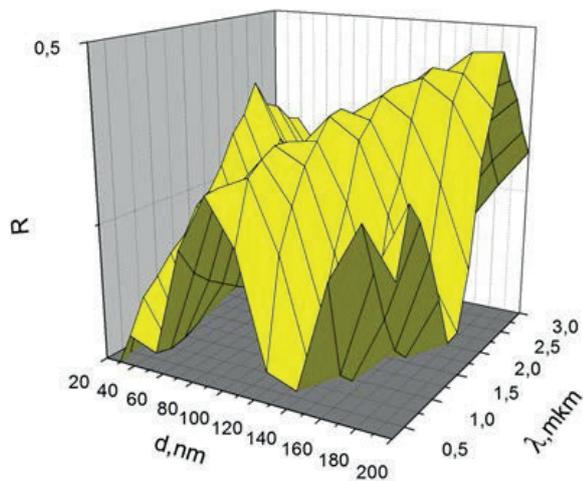


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента отражения металлодиэлектрических структур  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  для толщины наноразмерного слоя алюминия 5 нм при изменении толщины просветляющего слоя от 20 нм до 200 нм

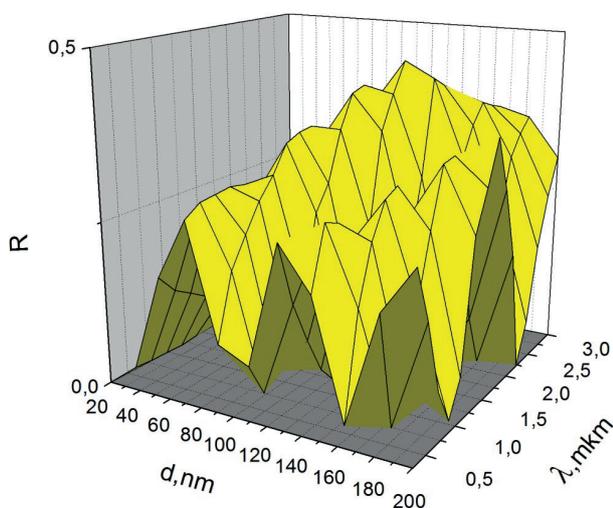


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента отражения металлодиэлектрических структур  $\text{AlN-Al-AlN-SiO}_2$  для толщины наноразмерного слоя алюминия 10 нм при изменении толщины просветляющего слоя от 20 нм до 200 нм

Приведенные на рис. 2, 3 результаты позволяют определить параметры структуры, необходимые для обеспечения требуемых спектральных селективных характеристик для различных диэлектрических материалов и просветляющих слоев.

## 6. Энергосберегающие свойства оптически прозрачных металлодиэлектрических структур на основе наноразмерных слоев алюминия

Полученные результаты показывают, что металлодиэлектрические структуры на основе алюминия можно использовать в качестве оптически прозрачных энергосберегающих покрытий с низкоэмиссионными или рефлекторными свойствами варьируя толщину наноразмерного слоя алюминия. Как следует из рис. 1, металлодиэлектрические структуры с наноразмерным слоем алюминия толщиной до 5 нм целесообразно использовать в качестве селективных низкоэмиссионных, а при толщинах более 20 нм – в качестве рефлекторных (отражающих) покрытий. Как показывают полученные результаты, металлодиэлектрические структуры с наноразмерными слоями алюминия требуют проведения дополнительных исследований, как микроструктуры наноразмерных слоев, так и их влияния на оптические селективные свойства.

Результаты исследований позволяют создавать технологические процессы формирования металлодиэлектрических покрытий на основе алюминия в одном технологическом цикле методом ионно-плазменного вакуумного распыления с прогнозируемыми энергосберегающими свойствами.

## 7. Выводы

Разработан алгоритм вычисления коэффициентов отражения и пропускания металлодиэлектрических структур на основе метода матриц переноса, который позволяет установить взаимосвязь между электромагнитным откликом металлодиэлектрического покрытия с микроструктурой и оптическими параметрами его компонент.

Проведено численное моделирование спектральных характеристик коэффициентов отражения и пропускания оптически прозрачных металлодиэлектрических структур с наноразмерными слоями алюминия толщиной от 1 нм до 100 нм и просветляющими покрытиями на основе оксида или нитрида алюминия толщиной до 200 нм.

Представленные результаты позволяют дать рекомендации для практического использования металлодиэлектрических структур на основе алюминия в энергосберегающих технологиях в качестве оптически прозрачных низкоэмиссионных и рефлекторных покрытий с возможностью технологического формирования таких структур в одном технологическом цикле методом вакуумного ионно-плазменного распыления.

## Литература

1. Агнихотри, О. Селективные поверхности солнечных установок [Текст] / О. Агнихотри, Б. Гупта. – М.: Мир, 1984. – 277 с.
2. Мачулянский, А. В. Электромагнитные характеристики нанокomпозитов на основе наноразмерных металлических включений [Текст] / А. В. Мачулянский // Технічна електродинаміка. – 2012. – Ч. 2. – С. 193–197.
3. Moiseev, S. G. Active Maxwell-Garnett composite with the unit refractive index [Text] / S. G. Moiseev // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2010. – Vol. 405, Issue 14. – P. 3042–3045. doi: 10.1016/j.physb.2010.01.045
4. Гадомский, О. Н. Высокоэффективные просветляющие наноструктурные оптические покрытия для солнечных элементов [Текст] / О. Н. Гадомский, К. К. Алтунин, Н. М. Ушаков, И. Д. Кособудский, В. Я. Подвигалкин, Д. М. Кульбацкий // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 6. – С. 83–89.

5. Золотухин, И. В. Наноконтрольные структуры на пути в наноэлектронику [Текст] / И. В. Золотухин, Ю. В. Калинин, А. В. Ситников // Природа. – 2006. – № 1. – С. 11–19.
6. Береснев, В. М. Физико-химические и механические свойства наноструктурных нитридных покрытий [Текст] / В. М. Береснев, О. В. Соболев, Д. А. Колесников и др. // Металлофизические новейшие технологии. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 139–160.
7. Pogrebnjak, A. D. Properties of AlN films deposited to silicon substrates [Text] / A. D. Pogrebnjak, A. K. M. Muhammed // International Journal of Structronics & Mechatronics. – 2012. – Vol. 1, Issue 2. – P. 1–3.
8. Borisova, A. Properties of Aluminum Oxynitride Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering [Text] / A. Borisova, A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, B. Babych // IEEE XXXIV International Scientific Conference “Electronics and Nanotechnology, 2014. – P. 122–125.
9. Розенберг, Г. В. Оптика тонкослойных покрытий [Текст] / Г. В. Розенберг. – М.: Наука, 1958. – 570 с.
10. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Д. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
11. Теллен, О. Конструирование многослойных интерференционных светофильтров [Текст] / О. Теллен // Физика тонких пленок. – 1972. – Т. 5. – С. 46–83.
12. Золотарев В. М. Оптические постоянные природных и технических сред [Текст] / В. М. Золотарев, В. Н. Морозов, Е. В. Смирнова. – Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1984. – 215 с.

**В роботі приведено результати досліджень метрологічних характеристик ІЧ радіометра. Радіометр має високу чутливість в робочому спектральному діапазоні від 4 до 5 мкм та широкий діапазон зміни енергетичних освітленостей – від 0.001 до 20 Вт/м<sup>2</sup>. Установлено умови виконання вимірювань з відносною похибкою вимірювань освітленості, що не виходить за межі ±6 %.**

**Ключові слова:** сповіщувач полум'я, радіометр інфрачервоного випромінювання, енергетична освітленість, спектр полум'я, фотоприймачі ІЧ випромінювання

**В работе приведены результаты исследования метрологических характеристик высокочувствительного ИК-радиометра. Радиометр имеет высокую чувствительность в рабочем спектральном диапазоне от 4 до 5 мкм и широкий диапазон изменений энергетических освещенностей – от 0.001 до 20 Вт/м<sup>2</sup>. Установлены условия выполнения измерений с относительной погрешностью измерений освещенности, которая не выходит за пределы ±6 %**

**Ключевые слова:** извещатель пламени, радиометр инфракрасного излучения, энергетическая освещенность, спектр пламени, фотоприемники ИК излучения

УДК 551.510.534621.383.52  
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.33133

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СПОВІЩУВАЧІВ ПОЛУМ'Я

**І. В. Докторович**  
Інженер-конструктор\*

**В. М. Годованюк**  
Голова правління\*

Доктор технічних наук, професор  
Чернівецький національний університет  
вул. Коцюбинського, 2,  
м. Чернівці, Україна, 58012  
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

**В. Г. Юр'єв**  
Начальник спеціалізованого  
конструкторського бюро  
\*ВАТ “ЦКБ Ритм”

вул. Головна, 244, м. Чернівці, Україна, 58032

### 1. Вступ

При виробництві та випробуваннях сповіщувачів полум'я, які призначені для роботи в системах пожежної безпеки, виникає проблема калібрування малих рівнів оптичних сигналів – енергетичних потоків випромінювання або освітленостей. Для вимірювань зазначених фотометричних одиниць необхідно використовувати спеціалізовані засоби, які на сьогодні промислово не випускаються. На замовлення центру по випробуванню сповіщувачів полум'я розроблено ІЧ радіометр, подальше виробництво якого потребує детального опису умов виконання вимірювань параметрів. Не менш актуальним є питання метрологічних

характеристик процесу вимірювань, тобто питання похибок та можливі шляхи їх зменшення.

Оскільки ІЧ радіометр є пороговим вимірювачем, виникає ще одна проблема – забезпечення калібрування ІЧ радіометра засобами вимірювань малих рівнів потоків. Це підбір стабільних джерел випромінювання, використання відповідних контрольних фотоприймачів і надійних порогових пристроїв для вимірювання фотосигналів.

Окрім цих проблем виникає проблема методичного характеру: контрольні фотоприймачі мають широкий спектральний діапазон чутливості – вони чутливі від видимого (0.4 мкм) до далекого ІЧ (25 мкм) діапазону. Вимірювання ж необхідно проводити в вузькій смузі