

Теоретические основы разработки и исследование пространственных характеристик фотоприемных устройств (ФПУ).

Расчет цилиндрической косинусной насадки.

Фотоприёмные устройства (ФПУ), являясь основной частью прибора для измерения оптического излучения, должны отвечать ряду электрических и фотометрических требований, зависящих от области применения и назначения. При разработке и производстве приборов для измерения параметров излучения необходимо знание этих требований, их особенностей, трудностей создания и путей их преодоления.

Устройство для формирования пространственной характеристики (входное устройство) формирует угол зрения, величина которого определена назначением разрабатываемого прибора. Так, например входное устройство люксметра или пульсметра, рассчитывается исходя из следующих соображений.

Известно, что освещённость поверхности, создаваемая точечным источником излучения, произвольно расположенным под углом β к её нормали (рис. 1), определяется выражением:

$$E = E_0 \times \text{Cos}\beta \quad (1)$$

где: E_0 – освещённость, создаваемая точечным источником, расположенным нормально относительно поверхности.

β - угол между нормалью и направлением на источник.

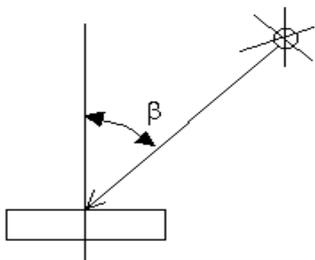


Рис. 1. Произвольно расположенный источник.

Очевидно, сигнал прибора, измеряющего освещённость, должен подчиняться такому же закону. Практически реализовать это условие без принятия определённых мер невозможно из-за зависимости коэффициента отражения поверхности оптических элементов приёмной системы от угла падения излучения, описываемой формулой (2) Френеля.

Для выполнения этого условия приходится включать в оптическую схему фотоприёмного устройства так называемую косинусную насадку, формирующую необходимый угол зрения и компенсирующую погрешность, вносимую поверхностным отражением оптических элементов.

Метрологические требования к устройствам, формирующим пространственные характеристики вытекают от назначения приборов. Для рабочих средств измерений, суммарная погрешность измерений которых находится в районе 10%, на первый план выступают такие свойства как технологичность, надёжность в эксплуатации, компактность. Для образцовых средств измерения оптического излучения, превалирующими свойствами являются высокие метрологические качества. Рассмотрим два вида косинусных насадок: для рабочих и для образцовых средств измерения оптического излучения.

Наиболее оптимальная косинусная насадка для рабочих средств (см. Рис. 2) измерения оптического излучения представляет собой элемент, выполненный из молочного стекла, равномерно рассеивающий падающее излучение по всем направлениям, обеспечивая тем самым выполнение закона Ламберта, согласно которому яркости светорассеивающей поверхности во всех направлениях одинаковы.

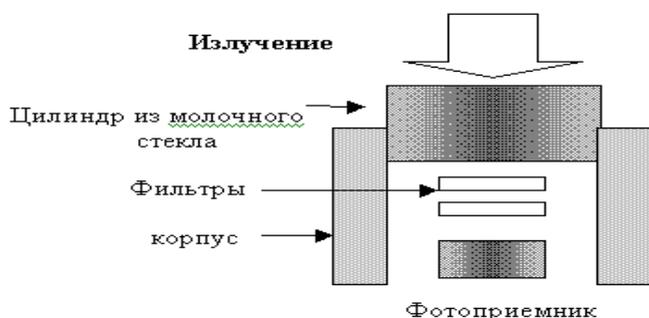


Рис. 2. Цилиндрическая косинусная насадка для рабочих средств

Поверхность материалов, используемых во входных устройствах отражает падающее излучение по закону Френеля:

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{\text{tg}^2(\varphi_1 - \varphi_2)}{\text{tg}^2(\varphi_1 + \varphi_2)} \right] \quad (2)$$

где: φ_1 - угол между падающим на поверхность лучом света и нормалью,

φ_2 - угол между преломлённым лучом и нормалью.

Графически эта зависимость представлена на рис. 3.

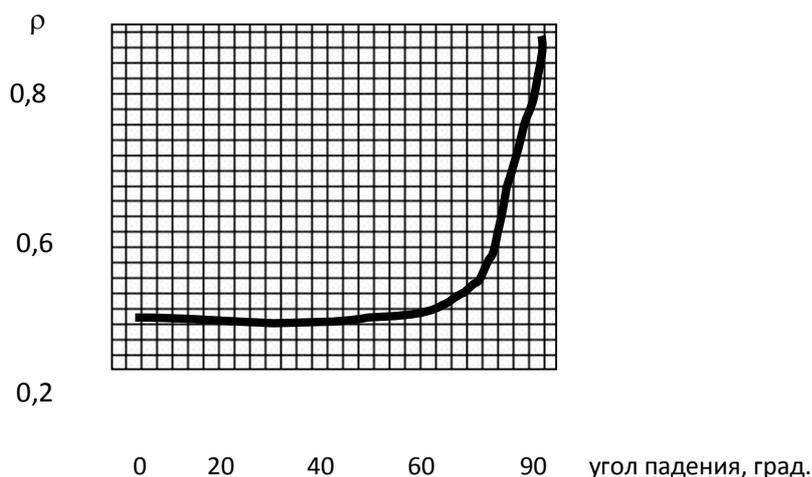


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения поверхности материала от угла падения.

Это означает, что фотоприёмное устройство регистрирует излучение, не отвечающее соотношению (2) при углах более 60° , т.е. отличное от реального излучения.

Для компенсации потерь отражённого излучения используют боковую грань диска из молочного стекла. Величина потока излучения, прошедшего внутрь стекла через боковые грани пропорциональна величине цилиндрической освещённости. Под средней цилиндрической освещённостью понимают среднюю освещённость боковой поверхности вертикально расположенного цилиндра. Она определяется выражением:

$$E_{ц} = L/\pi \int_{\omega} \cos\beta d\omega \quad (3)$$

β - угол падения света от точечного источника на боковую поверхность вертикально расположенного цилиндра.

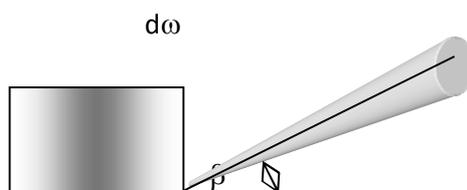


Рис. 4. К определению цилиндрической освещённости.

Световой поток Φ , попадающий на светочувствительный элемент, используемый в ФПУ является функцией отражения (ρ) и пропускания (τ) используемого материала, освещённости плоской поверхности (E_n) и цилиндрической освещённости боковой грани ($E_{ц}$).

$$\Phi = f(E_n, E_{ц}, \rho, \tau) \quad (4)$$

Аналитически описать эту связь достаточно сложно из-за разброса параметров используемых материалов и геометрических размеров составляющих ФПУ элементов. При разработке и изготовлении ФПУ эмпирически находится оптимальное сочетание

марки молочного стекла, его толщины и высоты боковой поверхности, выступающая над корпусом, обеспечивающие заданную погрешность, определяемую отличием полученной пространственной характеристики от теоретической.

Исследование светорассеивающих свойств материалов.

Светорассеивающие свойства элементов входных устройств ФПУ являются основными, определяющие метрологические пространственные характеристики.

Для светотехнической практики удобно классифицировать отражение и пропускание излучения в зависимости от степени и характера рассеяния. Если рассеяние отсутствует, то имеет место направленное пропускание или отражение (направленное отражение обычно называется зеркальным) (А, Г).

Если излучение при прохождении через пластину или при отражении полностью рассеивается, то говорят о рассеянном или диффузном отражении или пропускании. При этом индикатриса рассеивания может быть такой, что максимальное значение силы света или яркости наблюдаются в направлениях, определяемых направлениями падающего или отражённого излучения. Такой случай называется направленно-рассеянным или направленно-диффузным (Б, Д). Возможно и такое рассеяние, при котором яркость отражённого или прошедшего излучения не зависит от угла наблюдения. Рассеивающая поверхность излучает по закону Ламберта (В, Е). Это равномерно – диффузное отражение или пропускание.

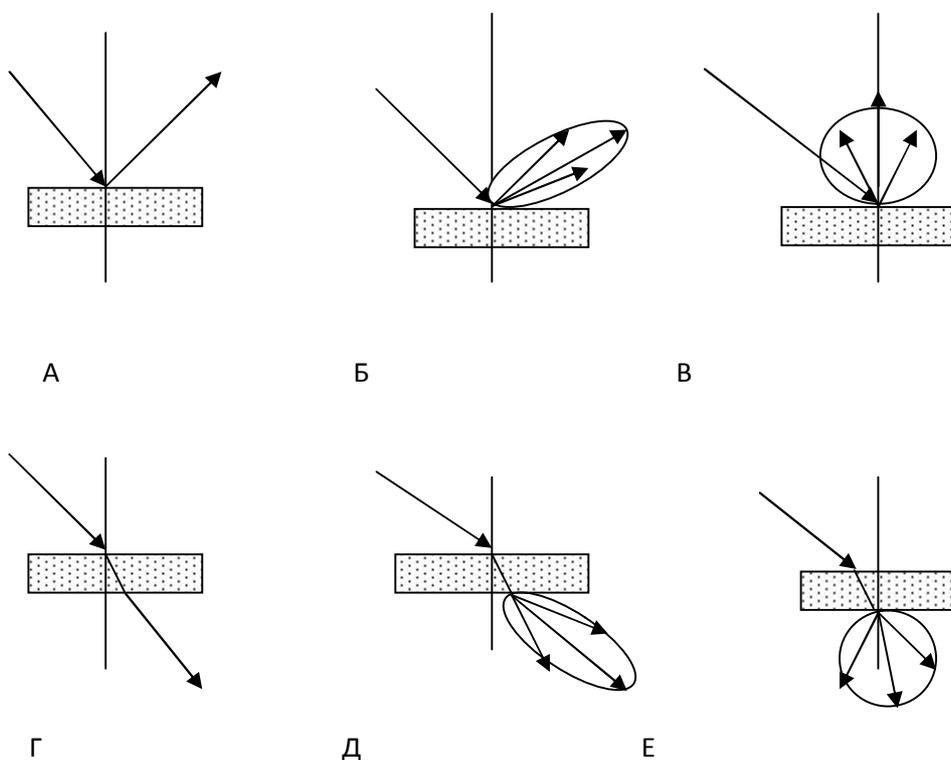


Рис. 5. Различные виды пропускания и отражения

Для определения исходных данных, необходимых при расчёте входных устройств ФПУ и выработки конкретных рекомендаций по применению возможных для использования материалов была проведена исследовательская работа. В задачу эксперимента входило определение толщины исследуемого материала, при которой происходит максимальное приближение рассеяния к равномерно-диффузному. Измерялись светорассеянное отражение и пропускание, часто используемые в фотометрической практике, так называемые молочные стекла МС-12, МС-13, МС-14 и некоторые типы диффузно отражающих покрытий.

Индикатриса рассеяния определялась на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 6.

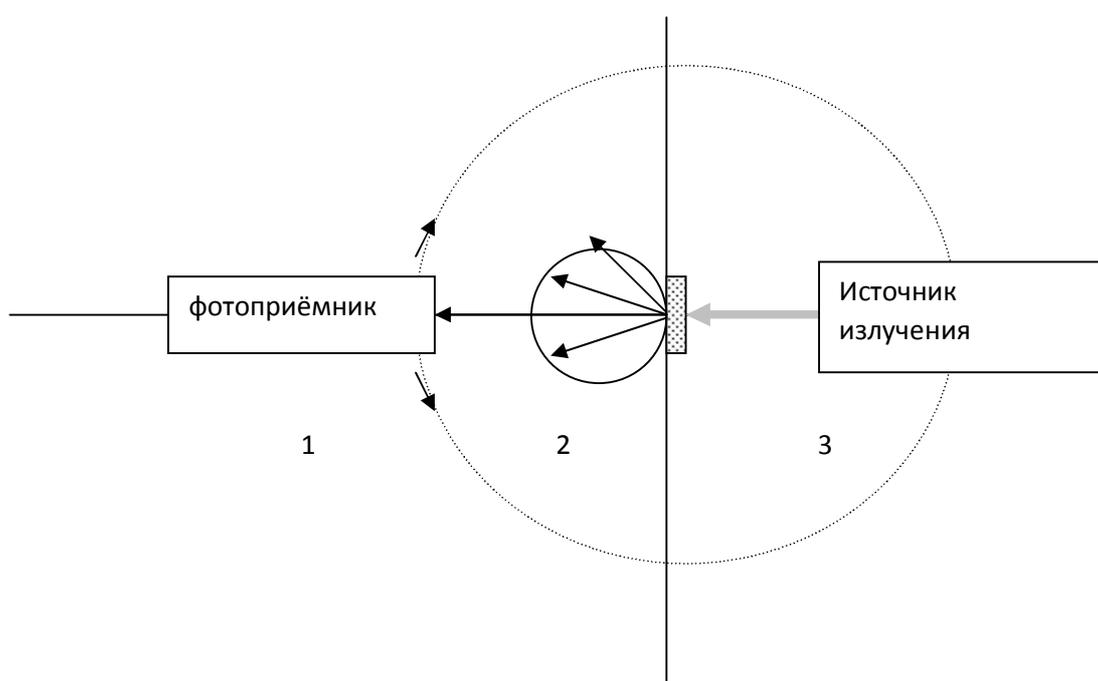


Рис. 6. Устройство для измерения индикатрисы диффузного пропускания стёкол.

1 – Кремниевый фотодиод, 2 – Исследуемое стекло, 3 – Источник излучения.

Исследуемое стекло различной толщины освещалось гелий – неоновым лазером ЛГ – 68. Рассеянное излучение регистрировалось кремниевым фотодиодом, перемещавшимся с шагом 5^0 вокруг оптической оси, проходящей через торец молочного стекла.

Результаты эксперимента приведены на Рисунках 7– 8.

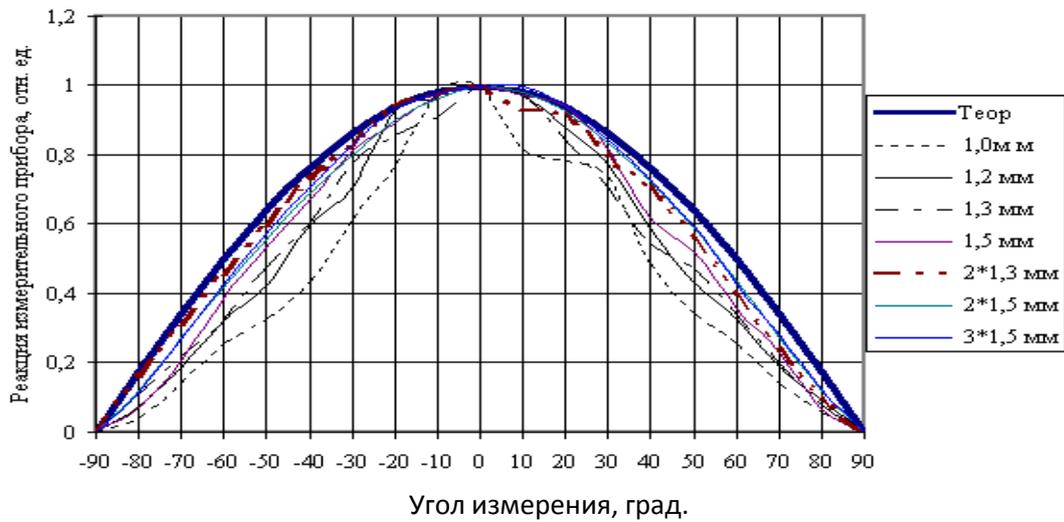


Рис. 7. Светорассеивающие характеристики молочного стекла МС - 13

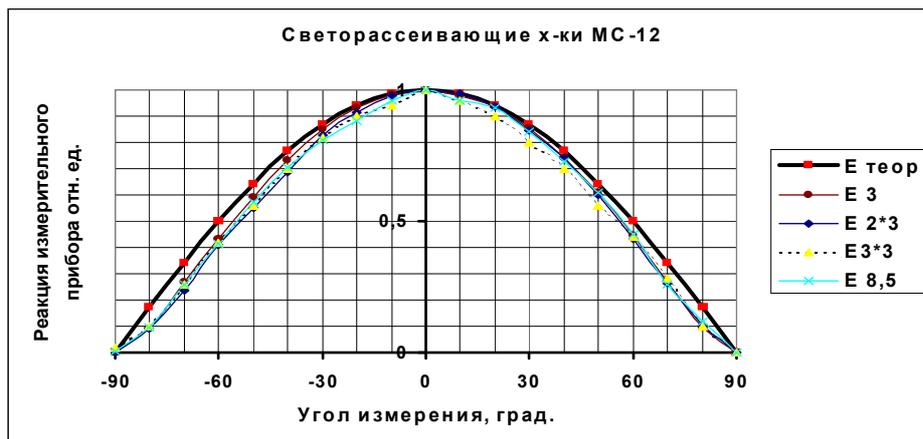


Рис. 8. Светорассеивающие характеристики молочного стекла МС – 12.

Результаты экспериментов легли в основу разработанного ФПУ, устройство и реальные размеры которого показано на рис. 9, а измеренные косинусные характеристики при различных величинах выступающей части молочного стекла из корпуса приведены на рис. 10.

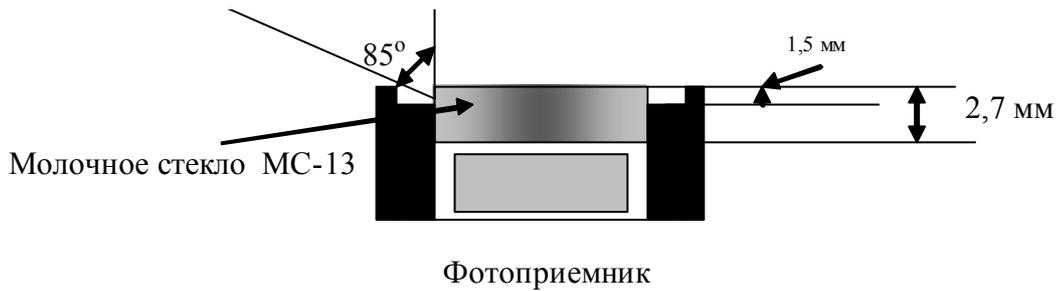


Рис. 9. Фотоприёмное устройство для практического использования в люксметрах.

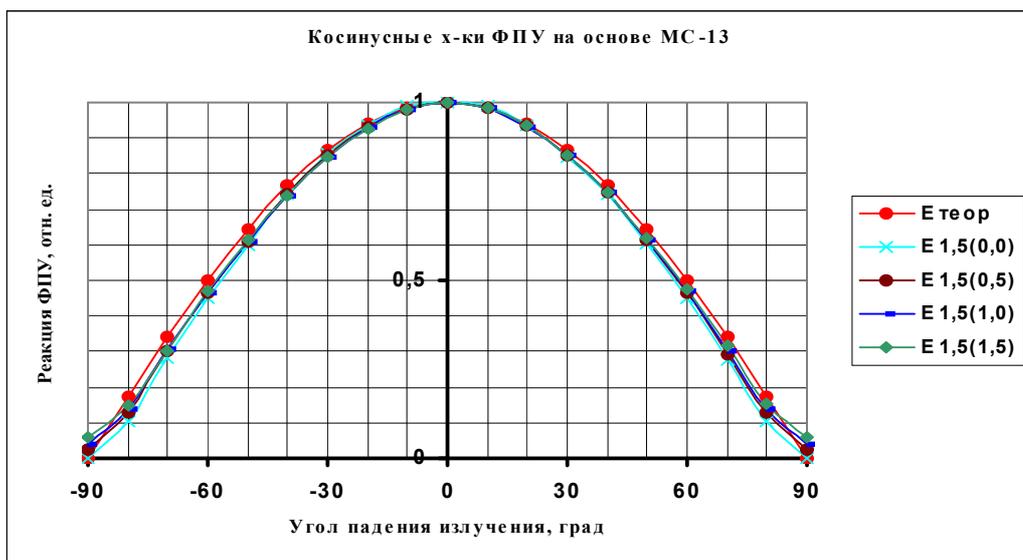


Рис. 10. Пространственные характеристики ФПУ на основе молочного стекла МС – 13.

Результаты исследований показали, что использование стекла МС-13 толщиной более 2,5 мм и высотой выступающей части над корпусом равной 1,5 мм обеспечивают формирование пространственной характеристики с погрешностью не более 8%. Этого вполне достаточно для применения подобной конструкции в рабочих средствах измерения.

Разработка и исследование приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Кузьмин В. Н. // Санкт-Петербургский Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, 2007, с. 62-68.