

В. М. Колесников, И. С. Манак

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Алгоритм построения оптико-электронной системы в общем виде строится, исходя из общей функциональной схемы (рис. 1).



Рис. 1. Общая функциональная схема ОЭС

В системах обнаружения и фотометрирования точечных объектов (например, звездная фотометрия) обработка сигнала и, соответственно, требования к параметрам и характеристикам компонентов системы должны формироваться по критерию увеличения вероятности обнаружения объекта при минимуме ложной тревоги, причем в случае слабого сигнала следует учитывать не только помеху в виде фоновой компоненты и внутренних шумов, но и тот факт, что приемник излучения, работающий в режиме фонового обнаружения проявляет нелинейность по некоторым характеристикам [1]: постоянная времени при низком уровне фона зависит от отлученности, внутренний шум зависит как от отлученности, так и от нестабильности теплового режима работы приемника излучения. Таким образом, в режиме обнаружения слабых сигналов в приемнике излучения следует рассматривать как нелинейную многопараметрическую систему и, соответственно, схема обработки информации должна строиться индивидуально, с учетом типа приемника, спектрального диапазона работы, уровня сигнала и шумовых характеристик. В изображающих системах (тепловизоры, интерферометры и т. д.) требования к обработке сигнала заключаются в воспроизведении распределения энергии по полю зрения с минимальными искажениями в контрасте картины.

Взаимосвязь между различными рабочими параметрами приемного устройства, которая выражается с помощью системных уравнений, зависит от целей и содержания поставленной задачи, образует основу параметрического анализа.

Наиболее важные параметры приемного устройства – обнаружительная способность и разрушение системы – являются основой для проведения параметрического анализа и разработки практической схемы ОЭС.

1. Фотометрическая система

Основная цель при построении фотометрической системы – достижение высокого уровня обнаружительной способности. Обнаружительная способность ОЭС определяется величиной полного потока излучения на входе системы, при которых отношение сигнал/шум на выходе равно единице, и может быть представлена общим уравнением

$$D_{\text{сист}}^{**} = \left(\frac{4\sqrt{k_f}}{\pi k_0 k_s k_{ck} k_{\Pi}} \right) \left(\frac{k\sqrt{A\Delta f}}{D_0 P_{\text{пор}} \sqrt{N}} \right) \left(\frac{\sqrt{\Omega}}{T_k} \right), \quad (1)$$

где $D_{\text{сист}}^{**}$ – обнаружительная способность системы; k_f – постоянная определяемая отношением эквивалентной шумовой полосы частот к полосе пропускания электронного тракта; k_0 – пропускание оптики; k_s – КПД электронной аппаратуры; k_{ck} – КПД сканирования; k_{Π} – коэффициент перекрытия (доля площади приемника излучения, не участвующая в приеме сигнала); k – диафрагменное число оптической системы; D_0 – световой диаметр собирающей оптики; N – число приемников излучения; Ω – мгновенный угол поля зрения; T_k – время построения кадра; A – площадь чувствительной площадки приемника излучения; Δf – полоса пропускания электронного тракта.

Первая группа параметров представляет собой специфические инженерные параметры, характеризующие КПД системы.

Коэффициент пропускания оптической системы k_0 зависит от конструкции и числа оптических элементов. Он может быть близок к единице для зеркальной оптики с малым коэффициентом экранирования. Для зеркальной с заметным экранированием и преломляющей оптики k_0 снижается до 30–40 %. Практическая величина коэффициента 50–70 %.

Номинальная величина k_s находится в пределах 70–90 %, точная величина определяется передаточными функциями электронного блока, оптической системы, приемника излучения.

Коэффициент k_f зависит от передаточной функции формирующего фильтра и имеет значения в пределах 0.5–2.

КПД сканирования определяется выбранным механизмом и траекторией сканирования. Например, при непрерывном круговом сканировании (ИК ЗФ-1) $k_{ck} \approx 0.5\text{--}0.6$ [2].

Величина перекрытия корректируется различными конструкциями концентраторов светового потока, являющихся согласующими элементами питающей оптики и приемника излучения [1].

Обнаружительная способность приемника излучения определяется по стандартным объектам [1, 2] с индивидуальным выбором режима работы по критерию минимизации собственных шумов, выбором диапазона питающих напряжений, стабилизацией теплового режима работы с помощью специального теплообвода [1]. При построении серии ИК звездных фотометров [2, 3] достигнута обнаружительная способность для фоторезистора на основе поликристалла PbS $\approx 10^{11} \text{ ВТ}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$; для охлаждаемого фотодиода на основе InSb $\approx 10^{11} \text{ ВТ}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$ [1].

2. Поляриметрическая система

Анализ поляризационных характеристик излучения дает наиболее полную характеристику светового пучка полупроводникового лазера, кроме того является наиболее надежным источником сведений об оптических постоянных поглощающих сред при анализе отраженного излучения.

Разработано устройство для анализа поляризационных характеристик полупроводниковых лазеров [4–7], функциональная схема которого представлена на рис. 2.

Поляризационные характеристики определяются по стандартной методике Стокса, кроме того, при такой функциональной схеме есть возможность определения и компенсации астигматизма в структуре пучка излучаемого полупроводниковым лазером. Пространственное распределение энергетических и поляризационных характеристик определяется сканированием пучка в ортогональных плоскостях щелевой диафрагмой [4, 5].

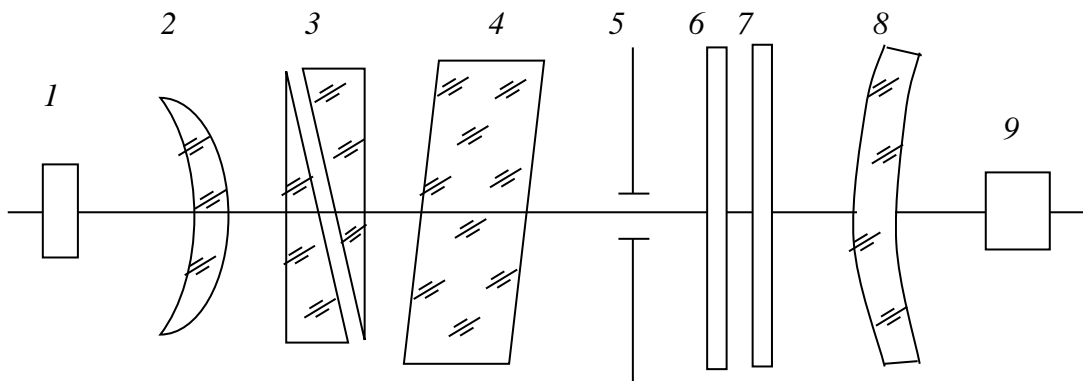


Рис. 2. Функциональная схема поляриметра:

1 – полупроводниковый лазер; 2 – анаберрационный объектив коллиматора; 3 – призмная паниратическая система компенсации астигматизма лазерного пучка; 4 – отклоняющая плоскопараллельная стеклянная пластинка; 5 – сканирующая щелевая диафрагма; 6 – четвертьволновая пластинка; 7 – поляроид; 8 – собирающий объектив; 9 – приемник излучения

3. Лазерная рефрактометрия. Определение оптических постоянных поглощающих сред

Метод измерения поляризационных характеристик пучка лазерного излучения весьма действенен при решении важной прикладной оптической задачи – определении оптических постоянных поглощающих сред. Существуют стандартные методы измерения оптических постоянных веществ и сред (эллипсометрические, рефрактометрические, интерференционные). Но все эти методы дают весьма приблизительные результаты для поглощающих и, в особенности, сильнопоглощающих сред. В этом случае наиболее надежным является метод лазерной рефрактометрии [8].

Оптические постоянные определяются по результатам анализа характеристик отраженного светового поля при фиксированном угле падения светового зондирующего пучка (в отличие от стандартной методики с нормальным направлением зондирующего пучка).

Функциональная схема устройства определения оптических постоянных сред приведена на рис. 3 [8].

Для определения оптических постоянных используются не параметры Стокса, а компоненты связанного с ними вектора поляризации P . Для удобства расчетных операций выбран азимут поляризации 45° при зондировании линейно поляризованным излучением. Выбираются два ком-

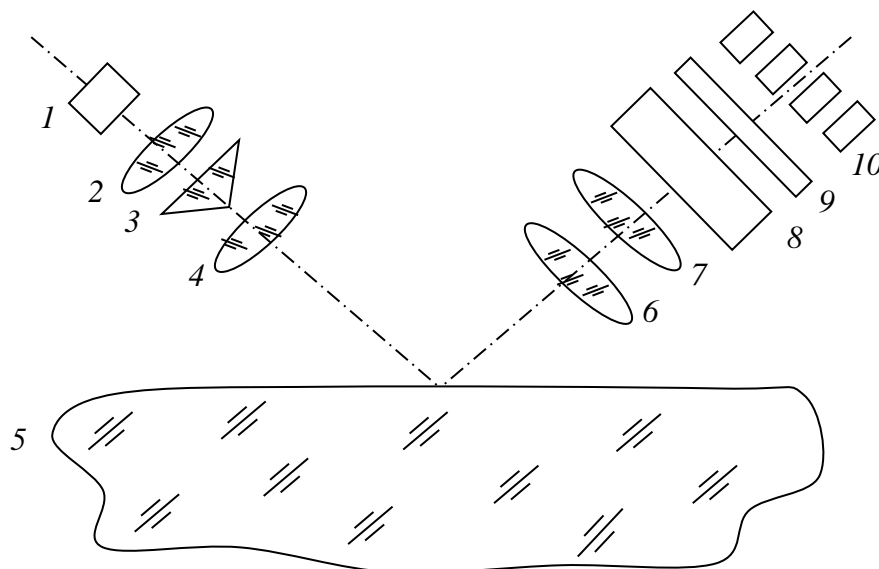


Рис. 3. Функциональная схема устройства определения оптических постоянных поглощающих сред:

1 – полупроводниковый лазер; 2 – микрообъектив; 3 – корректор астигматизма лазерного пучка; 4 – коллимирующий объектив; 5 – объект; 6 – камерный объектив; 7 – объектив, трансформирующий излучение в плоскость блока приемников 10; 8 – поляризационный расщепитель; 9 – анализатор; 10 – блок приемников

понента вектора поляризации P_1 и P_2 , для определения которых не требуется четвертьволновой пластинки, что значительно упрощает технику эксперимента. Оптические постоянные определяются из соотношений

$$\left. \begin{aligned} n^2 - x^2 &= \frac{2P_1^2 + P_2^2}{(1 - P_2)^2} \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi + \sin^2 \varphi \\ 2nx &= \frac{2P_1 \sqrt{1 - P_1^2 - P_2^2}}{(1 - P_2)^2} \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где φ – угол падения.

Анализ оптических постоянных кристаллических структур позволил разработать модернизированный метод определения поляризационных характеристик входного поля излучения [6]. Приемник излучения располагается под фиксированным углом и оптической оси и, поскольку материал приемника представляет собой кристаллическую структуру, происходит фильтрация поляризационных компонент падающего излучения и при вращении приемника интенсивность зарегистрированного излучения состоит из постоянной и переменной компонент, что позволяет упростить методику построения функциональной схемы устройства для определения поляризационных характеристик поля излучения [6].

4. Изображающие системы

К изображающим системам можно отнести интерферометрические [7–9], тепловизионные системы [10, 11], системы наведения [12].

Одной из важных интерферометрических задач является задача определения толщины тонких пленок [7]. В отличие от стандартных методов построения интерферометров для определения толщин тонких пленок (кольцевые, сканирующие и т. д. интерферометры), недостатком которых является сложность построения, слабая помехозащищенность, инерционность, предложен метод статической интерферометрии. Оперативность и простота получения информации с помощью данного метода иллюстрируется функциональной схемой интерферометра (рис. 4).

На выходе интерферометра формируются три полосы с повышенным контрастом в центральной области (интерферируют четыре фронта) и с пониженным на периферии (интерферируют два фронта).

Угол α выбирается в зависимости от необходимого диапазона измерения толщин пленки и поля зрения приемной системы, исходя из соотношений [7]

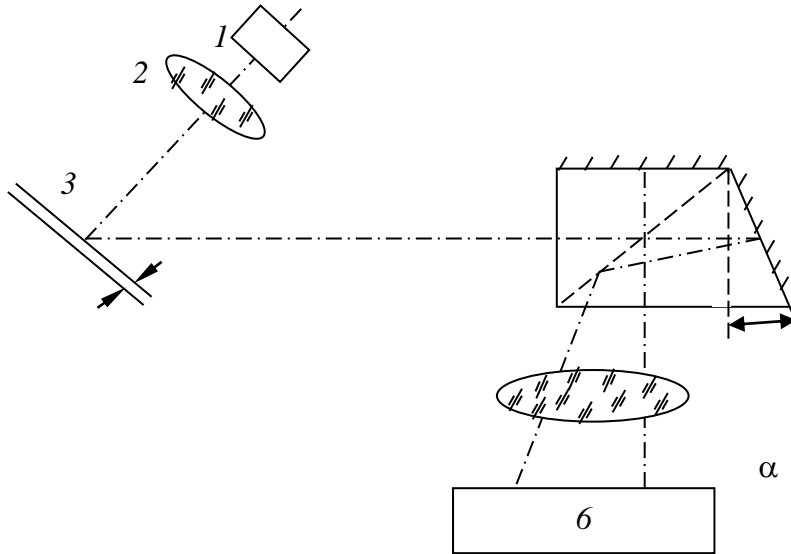


Рис. 4. Функциональная схема интерферометра:
 1 – полупроводниковый лазер; 2 – коллиматорный объектив; 3 – измеряемая пленка; 4 – интерферометрический узел (светоделительный кубик, одна зеркальная грань которого имеет отступление от 90° на угол α);
 5 – камерный объектив; 6 – ПЗС приемник

$$\frac{\alpha n_1}{2} = \frac{\lambda}{4L}, \quad (3)$$

где λ – длина волны лазера; L – расстояние между соседними максимумами при калиброванной толщине пленки.

Нижний предел L определяется разрешением камеры 6, верхний – полем зрения приемной системы 5, 6.

Обработка интерферограммы аналогична описанной в [9].

5. Оптическая система для ОЭС

Выбор конструктивных параметров приемной оптической системы является одним из основных этапов построения ОЭС любого типа.

Наиболее рациональной можно считать методику построения двухзеркальной системы, универсальной по критерию степени коррекции абберационных характеристик. Общая функциональная схема двухзеркальной системы представлена на рис. 5 [13].

При моделировании системы в качестве расчетных соотношений используется [13]

$$r_1 = \frac{2d}{1-S'}; \quad r_2 = \frac{2S'-d}{1-S'+d}; \quad f_0 = 1,0; \quad B_1 = \frac{1}{4} + \frac{(1-S')^3}{8d^2S'};$$

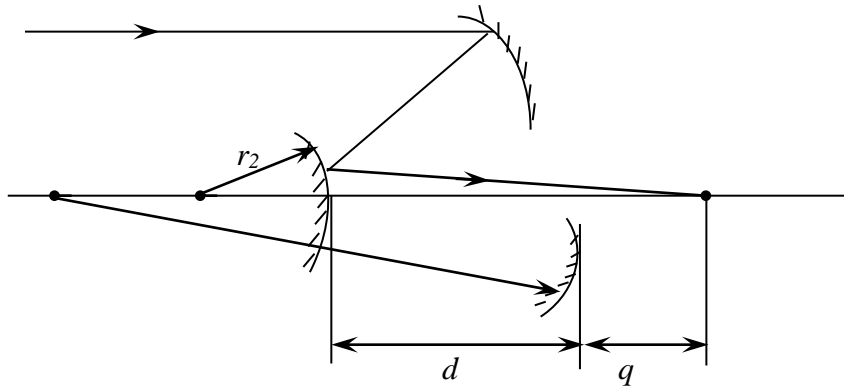


Рис. 5. Функциональная схема двухзеркальной оптической системы

$$e^2 = \frac{4d(S'+1)}{(1-S'+d)} + \frac{2d^2(1-4B_1)}{(1-S'+d)} + 1.$$

где B_1 – коэффициент комы; e – эксцентриситет вторичного зеркала.

При параметрическом задании d строятся зависимости r_1 , r_2 , B_1 и e^2 от S' (или q). Критерий построения системы: минимизация сферической aberrации. По зависимостям [13] выделяется область значений с минимальными aberrационными коэффициентами. В общем случае для известных r_1 и r_2 , оптический промежуток d можно задавать в пределах $(r_1 - r_2) > d > r_1/2$. Из анализа расчетных данных по критерию минимизации коэффициента комы, чувствительности системы и эксцентриситету вторичного зеркала и т. д. [13] желательно оптический промежуток выбирать в области $d \approx 0.2$.

Комплексный анализ зависимостей r_1 , r_2 , B_1 и e^2 от S' [13] позволил определить оптимальную область значений параметров системы, что позволяет строить оптическую систему для решения конкретной прикладной задачи с гарантированной минимизацией aberrационных коэффициентов.

Литература

1. Колесников В. М., Шилов А. Ф. Исследование предельных параметров приемников инфракрасного излучения на основе InSb и PbS // Когерентные методы в акустических и оптических измерениях. Сб. статей. Владивосток: ДВНЦ, АН СССР, 1981. С. 145–146.
2. Колесников В. М., Щербаков А. Г. Фотоэлектрическая приставка для обнаружения излучения ИК-звезд // Вест. БГУ. Сер. 1. 1973. № 3. С. 71–72.
3. Колесников В. М., Щербаков А. Г. Фотометрическое устройство для фотометрирования астрономических объектов в окне прозрачности // Вест. БГУ. Сер. 1. 1974. № 3. С. 77–79

4. Колесников В. М., Манак И. С., Буйкевич А. Г. методика исследования пространственных и поляризационных параметров лазерного излучения // Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. научн. статей. Вып. 6. Мн.: БГУ, 2001. С. 84–94
5. Manak I. S., Kolesnikov V. M., Buikевич A. G. Method of measurement of the polarization characteristics of injection lasers // VII Konferencja Naukowa “Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne: COE 2002”. Materiały Konferencyjne. Tom I. Rzeszow, 5–8 czerwca 2002. Rzeszow, 2002. S. 285–289.
6. Колесников В. М., Манак И. С., Буйкевич А. Г. Новый способ определения поляризационных параметров лазерных диодов // Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления. Матер. XIV научн.-техн. конф. М.: МГИЭМ, 2002. С. 38–39.
7. Колесников В. М., Манак И. С., Буйкевич А. Г. Интерферометрический датчик толщины тонких прозрачных пленок // Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления. Матер. XV научн.-техн. конф. М.: МГИЭМ, 2003. С. 151.
8. Колесников В. М., Манак И. С., Буйкевич А. Г. Определение оптических постоянных поглощающих сред методом лазерной рефрактометрии // Сер. «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів». Вип. 8. «Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об'єктів». Зб. наук. праць. Львів, 2003. С. 132–135.
9. Колесников В. М., Осин С. А. Микроинтерферометр для контроля размеров субмикронных топологических элементов // Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. научн. статей. Вып. 5. Мн.: БГУ, 2000. С. 86–89.
10. Колесников В. М. Микропирометр для непосредственного измерения температур полупроводникового лазера // Вест. БГУ. Доп. ВИНТИ. 10.07.1982. № 3435 – 81. С. 16.
11. Колесников В. М., Шилов А. Ф. Измерение температуры поверхности полупроводникового лазера микропирометром // Когерентные методы в акустических и оптических измерениях. Сб. статей. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 116–117.
12. Колесников В. М., Ткачев В. С. Лазерный целеуказатель // Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. научн. статей. Мн.: БГУ, 2000. С. 89–92.
13. Колесников В. М. Анализ двухзеркальной приемной системы // Лазерная и оптико-электронная техника. Межвуз. сб. научн. трудов. Мн.: Университетское, 1989. С. 207–212.