

Ю.К. Грузевич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ
ПРИБОРЫ
НОЧНОГО ВИДЕНИЯ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2014

УДК 621.384.4

ББК 32.844

Г 90



*Посвящается 20-летию
ОАО «Научно-производственное
объединение «Геофизика-НВ»*

Грузевич Ю.К. **Оптико-электронные приборы ночного видения.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 276 с. — ISBN 978-5-9221-1550-6.

В монографии рассмотрены основные тенденции развития техники ночного видения и физические основы ее работы. Дан анализ современного состояния и тенденций развития электронно-оптических преобразователей (ЭОП) для оптико-электронных приборов ночного видения. Рассматриваются принцип действия ЭОП, основные поколения, их возможности, элементы конструкций, параметры и характеристики и перспективы развития ЭОП. Описана энергетическая структура, оптические и электрофизические свойства различных фотокатодов. Особое внимание уделено фотокатодам на основе материалов с отрицательным электронным сродством, имеющим различную структуру. Представлены методы расчета дальности действия для оптико-электронных приборов ночного видения на основе ЭОП.

Книга предназначена научным и инженерно-техническим работникам, аспирантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области техники ночного видения.

ISBN 978-5-9221-1550-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

© Ю.К. Грузевич, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Введение	6
 Глава 1. Физические основы работы оптико-электронных приборов ночного видения	 26
1.1. Глаз и его возможности	26
1.1.1. Строение глаза (26). 1.1.2. Пороговые свойства зрительно-го анализатора (34). 1.1.3. Острота зрения (37). 1.1.4. Инерционность зрения (40).	
1.2. Поиск и наблюдение объектов в ночных условиях	43
1.3. Естественная ночная освещенность	46
1.4. Излучение реальных объектов и природных фонов в ночных условиях	57
1.4.1. Почвы и дорожные покрытия (57). 1.4.2. Окрашенные поверхности (58). 1.4.3. Водная поверхность (58). 1.4.4. Снежный покров (58). 1.4.5. Растительность (61).	
1.5. Влияние атмосферы Земли на работу ОЭП НВ	64
 Глава 2. Электронно-оптические преобразователи для оптико-электронных приборов ночного видения	 70
2.1. Принцип действия ЭОП	70
2.2. Фотоэлектронная эмиссия	73
2.3. Основные элементы конструкций ЭОП	79
2.3.1. Фотокатоды: параметры, характеристики и типы (79).	
2.3.2. Фокусирующие системы ЭОП (113). 2.3.3. Микроканальные пластины (123). 2.3.4. Католюминесцентные экраны ЭОП (133).	
2.3.5. Выходной волоконно-оптический элемент ЭОП (143).	
2.3.6. Встроенный источник питания ЭОП (145).	
2.4. Поколения ЭОП	155
2.4.1. ЭОП 0 поколения: структура, отличительные особенности, основные параметры и характеристики (155). 2.4.2. ЭОП I поколения: структура, отличительные особенности, основные параметры и характеристики (160). 2.4.3. ЭОП II поколения: структура, отличительные особенности, основные параметры и характеристики (169). 2.4.4. ЭОП III поколения: структура, отличительные особенности, основные параметры и характеристики (178).	

2.4.5. ЭОП последующих поколений: структура, отличительные особенности и ожидаемые основные параметры и характеристики (197).	
2.5. Основные параметры и характеристики ЭОП	198
2.5.1. Отношение сигнал/шум ЭОП (202). 2.5.2. Чувствительность фотокатода ЭОП (204). 2.5.3. Коэффициент преобразования ЭОП (205). 2.5.4. Яркость темного фона ЭОП (207). 2.5.5. Предел разрешения ЭОП (208). 2.5.6. Модуль передаточной функции ЭОП (210). 2.5.7. ореол ЭОП (212). 2.5.8. Ресурс и надежность ЭОП (213). 2.5.9. Другие параметры ЭОП (215).	
2.6. Зависимость основных параметров ЭОП от их конструктивных параметров	218
2.6.1. Отношение сигнал/шум (218). 2.6.2. Пространственное разрешение и МПФ (220).	
Глава 3. Методика расчета дальности действия ОЭП НВ на основе ЭОП	228
3.1. Структура методики расчета дальности действия ОЭП НВ и НУ ТВС на основе ЭОП.	231
3.2. Методика расчета дальности действия ОЭП НВ при работе по наземным объектам.	233
3.3. Особенности методики расчета дальности действия ОЭП НВ при работе по воздушным объектам	238
3.4. Методика расчета дальности действия ОЭП НВ на основе структур «ЭОП–ПЗС»	238
3.5. Алгоритм проведения расчетов дальности действия ОЭП НВ на основе ЭОП.	241
3.6. Контрольные примеры проведения оперативных инженерных расчетов	241
3.7. Анализ и выявление значащих факторов	265
3.8. Предпосылки к созданию систем автоматического проектирования с использованием предложенного методического аппарата.	267
3.9. Основные выводы и заключение.	268
Список литературы	271

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АРЯ	— автоматическая регулировка яркости
АЧТ	— абсолютно черное тело
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
ВИП	— встроенный источник питания
ВКУ	— видеоконтрольное устройство
ВОП	— волоконно-оптическая пластина
ВОЭ	— волоконно-оптический элемент
ВСУ	— видеосмотровое устройство
ВУН	— высоковольтный умножитель напряжения
ЕНО	— естественная ночная освещенность
ИБП	— ионно-барьерная пленка
ИК	— инфракрасный
КВЭ	— коэффициент вторичной электронной эмиссии
КМОП	— комплементарный металлооксидный полупроводник
ЛКТР	— линейный коэффициент теплового расширения
МДВ	— метеорологическая дальность видимости
МКП	— микроканальная пластина
МПФ	— модуль передаточной функции
НСЦИ	— нацеленная система целеуказания и индикации
НУ ТВС	— низкоуровневая телевизионная система
ОНВ	— очки ночного видения
ОСШ	— отношение сигнал/шум
ОЭП НВ	— оптико-электронный прибор ночного видения
ОЭС	— отрицательное электронное родство
ПЗС	— прибор с зарядовой связью
ПНВ	— прибор ночного видения
САПР	— система автоматического проектирования
СЗФ	— схема защиты фотокатода
УФ	— ультрафиолетовый
ФПМ	— функция передачи модуляции
ФЦО	— фоноцелевая обстановка
ЧКХ	— частотно-контрастная характеристика
ЭГФ	— эпитаксиальное выращивание из газовой фазы
ЭЖФ	— эпитаксиальное выращивание из жидкой фазы
ЭОП	— электронно-оптический преобразователь

ВВЕДЕНИЕ

Краткая историческая справка. Резкое ограничение видимости при наблюдении невооруженным глазом в сумерки и ночью обусловлено низким уровнем естественной ночной освещенности (ЕНО), создаваемой излучением ночного неба, звезд и других естественных источников, а также несоответствием спектральной чувствительности глаза спектральному диапазону ЕНО. На протяжении всей истории своего развития человек стремился стать совершеннее и видеть в темноте, как кошка. Но осуществление этой мечты стало одной из наиболее трудных задач, так как потребовало совершить научный прорыв в создании техники ночного видения. Предпосылкой для создания приборов ночного видения стало открытие в XIX в. инфракрасного (ИК) излучения. Однако первое устройство, способное «видеть» в ИК области спектра и получившее название «стакан Холста» (рис. В.1), было создано Холстом и де Буром лишь в 1934 г. Этот момент принято считать началом эры ночного видения.



Рис. В.1. Первый ЭОП — «стакан Холста»

Создание оптико-электронных приборов ночного видения (ОЭП НВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) сообщило глазу удивительные свойства. Одним из них является полная скрытность наблюдения (отсутствие оптической или лазерной подсветки), так как оптический контакт глаза через ОЭП НВ с наблюдаемыми объектами не оказывает физического воздействия на рассматриваемый объект, какой бы чувствительностью глаз ни обладал. Большое раз-

нообразие ОЭП НВ (ночные прицелы, бинокли, перископы, монокуляры, очки ночного видения и др.) обеспечивает, помимо скрытности наблюдения ночью, еще и высокое угловое разрешение, позволяющее вести наблюдение малоразмерных объектов на дальностях, значительно превышающих дальность наблюдения невооруженным глазом, а также обеспечивает высокоточное наведение оружия для попадания боеприпаса в цель и корректировку результатов стрельбы.

Однако принятые на вооружение практически всех без исключения родов войск оптические приборы на основе первых преобразователей, которые получили название ЭОП 0 поколения (рис. В.2), обеспечили выполнение боевой задачи ночью только при освещенности, которая создавалась применением различного рода осветительных средств: осветительных авиабомб, осветительных снарядов и мин, осветительных и сигнальных парашютирующих патронов и др. Поэтому применение ОЭП НВ на основе ЭОП 0 поколения не обеспечило скрытности боевых операций ни одной из воюющих сторон и тем самым лишило их военного преимущества ночью. Другое дело, когда одна сторона располагает способом скрытного проведения боевых операций, а другая — нет. Тогда все преимущества на первой стороне. Так и произошло в конце Второй мировой войны сначала в районе озера Балатон, где немецкие войска впервые применили ночные прицелы, а затем на японском острове Окинава, где американские войска также применили ночные прицелы типа «Снайперскоп», обеспечивающие скрытность и внезапность проведения операций против японских войска, не располагавших такими средствами, что и привело к быстрой сдаче острова.



Рис. В.2. Внешний вид ЭОП 0 поколения

В послевоенные годы развитие техники ночного видения определялось созданием и совершенствованием электронно-оптических преобразователей, являющихся ключевым элементом ОЭП НВ. При этом основное внимание уделялось разработке для ЭОП фотокатодов, волоконно-оптических элементов для входных и выходных окон, металло-

керамических корпусов и катодолюминесцентных экранов, а также элементной базы для встроенных высоковольтных источников питания (ВИП).

В результате работ, проводившихся в послевоенные годы и проводимых поныне, были достигнуты значительные успехи в совершенствовании активных ОЭП НВ за счет создания для подсветки объектов наблюдения более мощных источников оптического излучения (прожекторов, лазерных и светодиодных источников и др.), отвечающих спектральной чувствительности однокамерных ЭОП ранних поколений, созданных на основе кислородно-серебряно-цезиевых фотокатодов, но с более совершенными ВИП, волоконно-оптическими входными и выходными окнами, установленными в металлокерамических корпусах. Такие ЭОП получили название ЭОП I поколения (рис. В.3).



Рис. В.3. Внешний вид ЭОП I поколения

В послевоенные годы были созданы новые активные ночные прицелы и наблюдательные приборы с характеристиками, значительно превосходящими характеристики активных приборов ночного видения военного времени. Учитывая большие габариты активных ОЭП НВ, особое внимание было обращено на оснащение данными прицелами бронетанковой техники, что позволило в сравнительно короткие сроки создать активные ночные прицелы для наводчика танка, а также командирские и водительские наблюдательные приборы. Позднее появились наблюдательные активные ОЭП НВ для оснащения авиационной и военно-морской техники и вооружения.

С дальнейшим развитием электровакуумной и полупроводниковой технологии были разработаны совершенно новые пассивные ЭОП НВ на основе многокамерных ЭОП 0 поколения (рис. В.4) и многомодульных ЭОП I поколения (рис. В.5), открывших целую эпоху в создании скрытных средств ночного наблюдения и прицеливания.

В 1970-х гг. были созданы совершенные пассивные ЭОП НВ на основе ЭОП с микроканальными пластинами (МКП), совершивших перелом в технике ночного видения. Поэтому не случайно 1970-е гг.



Рис. В.4. Внешний вид шестикамерного ЭОП 0 поколения

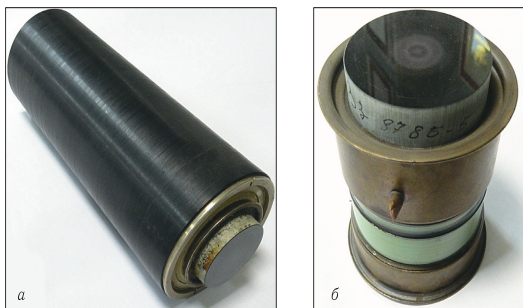


Рис. В.5. Внешний вид многомодульного ЭОП I поколения (а) и модуля (б), из которого он состоит

получили название «золотой век» ночного видения, а созданным преобразователям специалисты по ночному видению дали название ЭОП II поколения (рис. В.6).

По-прежнему основные требования к параметрам и характеристикам ЭОП и приборам на их основе определялись силовыми ведомствами как в нашей стране, так и за рубежом. Коммерческие применения ЭОП появились только в последнее время. Специальные применения ЭОП в приборах и системах ночного видения имели два интенсивных направления развития.

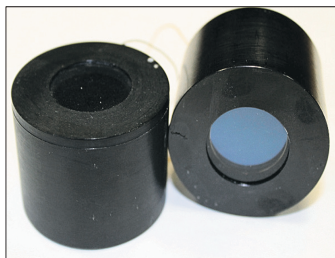
Первое направление развития началось с середины 1970-х гг. и было связано с внедрением ЭОП II поколения. Основным элементом ЭОП II поколения является МКП, применение которой позволило не только снизить массу и габариты ЭОП, но и значительно ограничить эффект бляминга, который возникает в приборах и системах ночного видения



Рис. В.6. Внешний вид ЭОП II поколения

на основе ЭОП I поколения при освещении фотокатода интенсивными источниками оптического излучения. В ЭОП II поколения, так же как и в ЭОП 0 и I поколений, использовались мультищелочные фотокатоды и волоконно-оптические входные и выходные окна. Серийное освоение ЭОП II поколения стимулировало появление десятков тысяч различных ОЭП НВ для оснащения вооружения и военной техники. Примерно 2/3 приборов ночного видения (прицелы ночного видения, монокуляры, приборы вождения автобронетанковой техники и другие наблюдательные системы ночного видения) были созданы на основе инверторных ЭОП II поколения.

Оставшаяся часть, порядка 1/3 приборов, была создана на основе ЭОП II⁺ поколения (с электростатической планарной фокусировкой) (рис. В.7).

Рис. В.7. Внешний вид ЭОП II⁺ поколения

Сначала эти разработки не были столь очевидными, так как планарная конструкция, которая позволяла только значительно уменьшить массогабаритные параметры ЭОП и существующие конструкции очковых, не обеспечивала требуемого качества сформированного изображения. Только после завершения разработки высокоразрешающих МКП и малогабаритных волоконно-оптических поворотников — «твистеров» программа создания и серийного освоения ЭОП II⁺ поколения завершилась успехом. Структура бипланарного ЭОП II⁺ поколения приведена на рис. В.8. На основе ЭОП II⁺ поколения были созданы очки ночного видения (ОНВ) с однократным увеличением для вождения транспортных средств, прицелы ночного видения, монокуляры и другие малогабаритные наблюдательные приборы ночного видения.



Рис. В.8. Структура бипланарного ЭОП II⁺ поколения

Нельзя не отметить серьезной технической проблемы, с которой столкнулись при использовании в ранних ЭОП II поколения ключевого элемента — микроканальной пластины (МКП), которая использовалась в структуре преобразователя для первичного электронного усиления. Ранние МКП обладали целым рядом существенных недостатков, которые в конце 1970-х гг. пытались преодолеть. Это, в первую очередь, долговечность, разрешение и геометрический шум. При этом альтернативным подходом был возврат к аналогам ЭОП I поколения, состоящим только из фотокатода и экрана. Некоторые зарубежные фирмы инициировали разработку ЭОП II⁺ поколения без МКП. Эти усилия привели к созданию преобразователей с низким коэффициентом преобразования (100–150 раз), что привело к быстрому прекращению данных разработок.

С начала 80-х гг. прошлого века в нашей стране и за рубежом началась разработка следующего — третьего поколения преобразователей (рис. В.9), более успешная, чем программа создания ЭОП II и II⁺ поколений. Этим объясняется повышенный интерес к данному

научному и технологическому направлению как опто-электронных предприятий, занимающихся разработкой и серийным освоением элементной базы ночного видения, так и предприятий, заинтересованных в оснащении своей продукции современными ночными опто-электронными приборными комплексами, существенно повышающими эффективность их применения и обеспечивающими конкурентоспособность различных видов вооружений и военной техники на внутренних и внешних рынках.

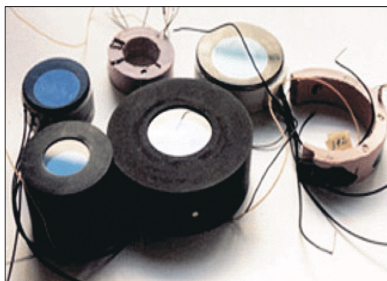


Рис. В.9. Внешний вид ЭОП III поколения



Рис. В.10. Внешний вид ЭОП III⁺ поколения

В начале 1990-х гг. из всех предприятий, специализирующихся на разработке и серийном производстве современных ЭОП, только две американские фирмы: «ITT Night Vision» и «Litton Electro-Optical Systems» (в настоящее время «L-3 Communication»), освоили серийный выпуск ЭОП III поколения. К этому времени продолжались работы по созданию отечественного ЭОП III поколения. С 1986 г. в НИИ элек-

тронных приборов был создан значительный научно-технический задел по созданию отечественного ЭОП III поколения, разработки которого были начаты еще в 1982 г. В конце 1980-х гг. специалистами НИИ электронных приборов были изготовлены первые образцы нового поколения преобразователей, но их серийный выпуск так и не был организован.

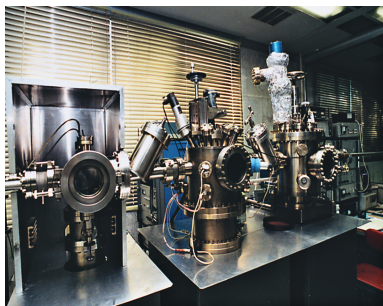
В 1994 г. для серийного освоения ЭОП III поколения в Москве был создан Федеральный научно-производственный центр ОАО «НПО «Геофизика-НВ», который объединил российских ученых и специалистов, занимавшихся разработкой ЭОП III поколения и техникой ночного видения на их основе.

В 1995 г. ОАО «НПО «Геофизика-НВ» совершило научно-технических прорыв, который завершился серийным освоением производства отечественного ЭОП III поколения и ликвидацией монополии США на данный высокотехнологичный продукт. В эти непростые для отечественной оптико-электронной промышленности годы на производственно-технологической базе ОАО «НПО «Геофизика-НВ», обладавшей развитой научно-исследовательской и промышленно-технологической базой, а также высококвалифицированными специалистами, были созданы уникальные технологии, внедрены новейшие достижения оптико- и микроэлектроники, сверхвысоковакуумной и компьютерной техники. Это позволило ОАО «НПО «Геофизика-НВ» создать специализированное технологическое оборудование для серийного выпуска ЭОП III и последующих поколений (рис. В.11), а также изготавливать механические, оптические и электронные компоненты и узлы любой степени сложности и обрабатывать новейшие технологические процессы для серийного производства ЭОП III поколения. Практически была решена проблема оснащения серийного производства всеми комплектующими материалами и элементами отечественного производства.

До настоящего времени только две страны — Россия и США (по два предприятия в каждой стране) освоили серийный выпуск данной высокотехнологичной продукции — ЭОП III поколения, основной особенностью которого является применение GaAs фотокатода с отрицательным электронным родством (ОЭС), фоточувствительность которого в несколько раз выше чувствительности стандартного мультищелочного фотокатода в максимуме излучения ночного неба.

Использование в структуре ЭОП III поколения GaAs ОЭС-фотокатода привело также к серьезным требованиям к другим основным компонентам ЭОП.

Во-первых, применение в ЭОП III поколения GaAs ОЭС-фотокатода потребовало на 3 порядка более высокого вакуума в его объеме, чем фотокатод ЭОП II и II⁺ поколений, а также использования специальных оптических стекол для входных окон, линейный коэффициент температурного расширения (ЛКТР) которых практически не отличается от ЛКТР монокристаллического GaAs ОЭС-фотокатода.



а



б

Рис. В.11. Специализированное технологическое оборудование ОАО «НПО «Геофизика-НВ» для серийного выпуска ЭОП III и последующих поколений

Во-вторых, что во много раз важнее, GaAs ОЭС-фотокатод требует на несколько порядков меньше ионов обратной связи, наличие которых присуще работе МКП. Для преодоления данной проблемы была разработана технология нанесения на входную поверхность МКП предельно тонких диэлектрических пленок (5–6 нм), которые получили название ионно-барьерных пленок. Данные пленки эффективно защищают GaAs фотокатод, но ценой значительного увеличения (на 25–30 %) шума усиления и снижения реальной фоточувствительности преобразователя.

Третьим требованием, обусловленным применением GaAs ОЭС-фотокатода, является необходимость сплавления тонкой пластинки монокристалла GaAs с плоским стеклянным входным окном ЭОП. Поэтому в конструкции ЭОП III поколения исключается применение инвертор-

ной электростатической линзы, которая требует сферической поверхности фотокатода. В середине 1980-х гг. в США была предпринята попытка создания ЭОП III поколения с электростатической линзой с уменьшением 25:1. Разработанная структура такого инверторного ЭОП III поколения была очень длинной и смогла найти применение только в прицелах ночного видения. Данное техническое решение просуществовало недолго и давно забыто. В настоящее время используются только ЭОП III поколения с электростатической бипланарной фокусировкой.

Отличительной особенностью ЭОП III поколения с GaAs ОЭС-фотокатодом является замена входного волоконно-оптического окна на стеклянную пластину. Для ЭОП I поколения применение волоконно-оптического входного окна было принципиально необходимо для стыковки отдельных каскадов ЭОП при создании многокаскадных ЭОП не внутри вакуумного объема, а через волоконно-оптические пластины (рис. В.5). В структуре инверторного ЭОП II поколения также принципиально применение входных волоконно-оптических окон для создания сферы на внутренней поверхности, на которую наносится мультищелочной фотокатод. Входные стеклянные окна для современных ЭОП появились только тогда, когда возникла необходимость использования полупроводниковых монокристаллов GaAs для ОЭС-фотокатодов ЭОП III поколения. Известно, что GaAs фотокатод плохо совместим с волоконно-оптическими материалами, так как технологически гетерозепитак-сильная структура GaAs-AlGaAs для изготовления фотокатода выращивается на отдельной GaAs подложке, а затем сплавляется со стеклом при высокой температуре ($> 600^{\circ}\text{C}$), при которой может произойти деформация волокон с нарушением его структуры. В начале 2000-х гг. были завершены разработки технологии изготовления ЭОП III поколения с волоконно-оптическим входным окном. Однако это привело к сильному удорожанию стоимости изготовления ЭОП III поколения, которые к тому же имели худшую чувствительность, пространственное разрешение и чистоту поля зрения, чем стандартные ЭОП III поколения со стеклянным входным окном.

Как было отмечено выше, в 1980-е гг. было доказано преимущество планарной фокусировки в ЭОП III поколения. В результате проведенных НИОКР объем серийного производства ЭОП III поколения превысил все объемы серийного выпуска инверторных ЭОП. К концу 2010 г. только в США было закуплено более 800 тыс. образцов современной техники ночного видения на основе ЭОП III поколения (очков ночного видения для пилотирования вертолетов и управления транспортными средствами, а также прицелов и монокуляров ночного видения для экипировки бойцов и др.), серийный выпуск которых продолжается до сих пор.

В 1990-е и 2000-е гг. в нашей стране и за рубежом продолжался серийный выпуск ЭОП III поколения. Считалось, что в ближайшее время не ожидается серьезных достижений в улучшении параметров

и характеристик ЭОП, однако появились первые сообщения о новых технологиях, которые опровергли данное мнение. Разработки, проводимые в эти годы, завершились увеличением фоточувствительности, пространственного разрешения, отношения сигнал/шум и других параметров и характеристик преобразователей. Кроме того, совершенствование технологии изготовления МКП привело к однородности усиления каналов, что позволило уменьшить отношение длины канала к его диаметру до $(40-50) : 1$. Это обеспечило возможность понизить рабочее напряжение и улучшить однородность усиления МКП.

В конце 1990-х гг. серийные производители ЭОП III поколения приступили к реализации программы создания так называемого «беспленочного» ЭОП III поколения за счет исключения с входной поверхности МКП тонкой ионно-барьерной пленки, которая закрывает входные отверстия каналов МКП. Основной задачей данной пленки является блокирование положительных ионов, появляющихся внутри каналов МКП, которые под действием приложенного электрического поля возвращаются назад и повреждают GaAs фотокатод. Толщина пленки выбирается таким образом, чтобы фотоэлектроны могли с минимальными потерями пройти через данную пленку и попасть в каналы МКП. Двойная функция, выполняемая ионно-барьерной пленкой толщиной порядка 5–6 нм, подобна функциям, выполняемым алюминиевым слоем, нанесенным на люминофор экрана ЭОП. Чаще всего в качестве материала ионно-барьерной пленки применялся Al_2O_3 , хотя положительные результаты также были получены при использовании SiO_x .

Два фактора позволили решать данную проблему. Первый фактор заключался в том, что базовая технология ЭОП III поколения была освоена до совершенства, поэтому первоначальные затраты были достаточно низкими и вероятность успеха была высока. Кроме того, экспериментальные исследования базировались на стандартном ЭОП III поколения и поэтому отсутствовали проблемы, несвязанные с основными направлениями исследования. Вторым фактором было применение статистического управления производственным процессом и проведение анализа изменений технологий, которые позволили математически проанализировать полученные результаты, обусловленные внесением изменений в некоторые технологические процессы. В результате значительно сократились затраты и сроки разработки новой модификации ЭОП III поколения.

Успешным результатом считается удовлетворение критерию надежности ЭОП. Этот параметр определяется типом эксплуатационных испытаний, которые включают повышение температуры, периодическую вибрацию и длительную постоянную засветку ЭОП с яркими периодическими всплесками. Испытания на надежность завершаются, когда в ЭОП появляются дефекты или, чаще всего, когда чувствительность, коэффициент преобразования и отношение сигнал/шум понижаются ниже определенного уровня. Эти условия можно создавать как для

тельно, так и ускоренно и более строго, чем реальное использование ЭОП в реальных условиях эксплуатации. Это делает результаты таких испытаний более впечатляющими. Учитывая, что в ЭОП II⁺ поколения отсутствует ионно-барьерная пленка, их ресурс составляет 2000–5000 часов, в то время как ЭОП III поколения с ионно-барьерной пленкой может эффективно демонстрировать бесконечную надежность. Как это ни парадоксально, стандартные ЭОП III поколения обычно проходят испытания на надежность и через 10000 часов у них не наблюдается какой-либо деградации чувствительности, коэффициента преобразования, отношения сигнал/шум и других параметров. Отечественные и зарубежные серийные изготовители ЭОП III поколения неоднократно пытались тем или иным путем вывести из строя стандартные ЭОП III поколения, чтобы можно было получить дефектный преобразователь для его использования при корректировке технологий. Проведенные исследования показали, что основной причиной уменьшения надежности являлись дефекты ионно-барьерной пленки. Это неудивительно, так как у ранних ЭОП III поколения без ионно-барьерной пленки ресурс не превышал 1000 часов. Однако если удастся избавиться от ионно-барьерной пленки, то можно получить увеличение отношения сигнал/шум, так как у «беспленочных» ЭОП III поколения удалось снизить фактор шума до 1,5–1,6 по сравнению с 2,0 у стандартных ЭОП III поколения. Это означает, что при равных чувствительностях фотокатодов «беспленочные» ЭОП III поколения будут иметь отношение сигнал/шум на 25–30 % выше, чем у стандартных ЭОП III поколения. Поскольку качество ЭОП зависит от отношения сигнал/шум и обратно пропорционально фактору шума МКП, а также учитывая, что высокочувствительный GaAs фотокатод ЭОП III поколения теряет часть фоточувствительности на ионно-барьерной пленке за счет частичного поглощения в ней фотоэлектронов, то очевидно, что введение в структуру ЭОП III поколения ионно-барьерной пленки существенно снижает уровень его параметров. Другим негативным последствием применения ионно-барьерной пленки является требование существенного увеличения (в 4–6 раз) напряжения между фотокатодом и МКП с целью обеспечения фотоэлектронов энергией, достаточной для прохождения сквозь пленку и создания необходимой статистики умножения. Более того, применение ионно-барьерной пленки в ЭОП усложняет технологию изготовления и контроль качества ЭОП III поколения, а также увеличивает такие дефекты в ЭОП, как яркие точки и эмиссионные процессы. Ионно-барьерная пленка может также заряжаться при более низких приложенных напряжениях, когда выключается источник питания при высоких уровнях освещенности фотокатода. Зарядка пленки может привести к снижению контраста сформированного изображения или его стиранию. Только применение активно-импульсного режима позволяет обеспечить работу ЭОП при высоких уровнях освещенности фотокатода без эффекта зарядки пленки. Однако работа ЭОП в активно-импульсном режиме из-за применения

ионно-барьерной пленки требует более высокого напряжения. Наконец, чем выше приложенное напряжение на катодном промежутке, обусловленное ионно-барьерной пленкой, тем больше требуется катодный промежуток между фотокатодом и МКП, чтобы избежать дефектов ЭОП, возникающих при больших электрических полях. Учитывая, что пространственное разрешение и размер ореола в современных бипланарных преобразователях (ЭОП II⁺ и III поколений) является линейной функцией катодного промежутка, для увеличения пространственного разрешения и уменьшения ореола в изображениях от ярких точечных источников оптического излучения необходимо стремиться к уменьшению катодного промежутка. Исторически ореолы в ЭОП III поколения были заметно больше, чем в ЭОП II⁺ поколения. Только недавно удалось в ЭОП III поколения с ионно-барьерной пленкой обеспечить катодный промежуток практически такой же, как в ЭОП II⁺ поколения.

Типичным результатом экспериментальных исследований «беспленочных» ЭОП III поколения было падение ресурса в десятки раз. Каждый серийный производитель ЭОП III поколения изготовил по несколько «беспленочных» ЭОП III поколения с ресурсом более тысячи часов. Это было достигнуто за счет существенного сокращения газовой выделения в МКП. Для изготовления МКП для «беспленочных» ЭОП III поколения были использованы материалы, обладающие намного меньшим газовыделением, чем применяемые ранее. Кроме того, дополнительно была увеличена десорбция газа в процессе изготовления ЭОП. Считалось, что применение данных методов позволит понизить уровень остаточного газа, чтобы обеспечить удовлетворительную надежность и высокое отношение сигнал/шум.

В начале 1998 г. для «беспленочных» ЭОП III поколения был разработан импульсный источник питания с автоматической обратной связью. В отличие от ранее используемого обычного источника питания с постоянным напряжением на электродах в ЭОП III поколения, импульсное питание позволяет регулировать величину электронного потока на входе МКП при высоких уровнях освещенности, удерживая МКП от насыщения, что предотвращает «смаз» и «заплывание» изображений. Импульсное питание также обеспечивает уменьшение размера ореола или блюминг изображения, который появляется вокруг ярких источников света, например подфарников автомобиля, при наблюдении их в ОЭП НВ на основе ЭОП III поколения.

Импульсное питание и малый размер ореола являются наиболее важными особенностями ЭОП III поколения при использовании их в пилотажных ОНВ, так как пилоты постоянно сталкиваются с различными уровнями освещенности, а также естественными и организованными точечными оптическими помехами. Применение ЭОП III поколения с импульсным источником питания в монокулярах и ОНВ для экипировки военнослужащих позволяют использовать данные приборы ночного видения в городских условиях, когда быстро меняется

освещенность и в угловое поле приборов попадают уличные фонари и другие интенсивные «точечные» источники света, при этом нет необходимости снимать ОНВ.

В декабре 1999 г. специалисты по приборам ночного видения, признав значительное повышение уровня параметров и характеристик «беспленочных» ЭОП III поколения с импульсным питанием, а также уменьшение размера ореола, решили присвоить созданным преобразователям название ЭОП IV поколения. Однако уже на следующий год произошли неприятности по двум основным причинам:

- в начале срока службы «беспленочные» ЭОП III поколения имели значительно лучшие параметры, чем стандартные ЭОП III поколения, затем они быстро деградировали, в то время как ЭОП III поколения с ионно-барьерной пленкой оставались с тем же высоким уровнем параметров в течение всего срока службы;

- «беспленочные» ЭОП III поколения оказались намного дороже в производстве и эксплуатации, чем стандартные ЭОП III поколения.

Поэтому специалисты ночного видения сняли название ЭОП IV поколение с «беспленочных» ЭОП III поколения с импульсным источником питания и признали данное направление совершенствования ЭОП неперспективным.

Другим фактором изменения названия ЭОП IV поколения обратно на ЭОП III поколения явилась разработка и внедрение «тонкопленочного» ЭОП III⁺ поколения (рис. В.10), у которого уровень параметров соответствовал и даже превышал основные параметры ЭОП IV поколения. При создании таких преобразователей было установлено, что уменьшение толщины ионно-барьерной пленки до размеров в 10000 раз тоньше человеческого волоса намного перспективнее, чем ее удаление, так как такое техническое решение позволяет достичь уровня параметров и характеристик ЭОП IV поколения, сохранив при этом долговечность преобразователей. Направление по созданию «беспленочных» ЭОП III поколения было признано неперспективным, так как ни один из серийных производителей современных ЭОП не смог обеспечить повторяемость успешных результатов.

Основные тенденции развития техники ночного видения.

Техника ночного видения на основе ЭОП всегда находилась под угрозой исчезновения. Считалось, что рано или поздно с развитием тепловидения предпочтение будет отдаваться тепловизорам, а не приборам ночного видения на основе ЭОП, и это будет только вопрос времени. По мнению отечественных и зарубежных специалистов, это время придет, но не в обозримом будущем, так как сторонники ЭОП постоянно совершенствуют топологию структур ЭОП, внедряют новые материалы для фотокатодов, создают новые технологии финишной сборки, вводят жесточайший контроль качества на всех этапах изготовления ЭОП для существенного увеличения дальности действия техники ночного видения, а также улучшения качества изображения

при одновременном снижении энергопотребления, массогабаритных параметров и стоимости ЭОП.

В настоящее время приоритет в развитии техники ночного видения принадлежит ЭОП НВ на основе ЭОП как приборам:

- более высокоразрешающим, высокочувствительным, малогабаритным и с низким энергопотреблением;
- более информативным за счет наличия тени в изображении объектов;
- обладающим возможностью обнаружения объектов при условии, когда отсутствует тепловой контраст между объектом и фоном;
- обладающим возможностью работы под водой и во влажной атмосфере и др.

Ключевым элементом ЭОП НВ является ЭОП, действие которого основано на многократном усилении (в десятки тысяч раз) потока оптического излучения от естественных источников излучения (ночного неба, звезд, Луны и т. д.), поэтому дальность действия ЭОП НВ определяется, в первую очередь, уровнем параметров и характеристик ЭОП, а также естественной ночной освещенностью (ЕНО).

В 50-е и 60-е гг. прошлого века в нашей стране и за рубежом были разработаны и серийно выпускались многокаскадные и многомодульные ЭОП с достаточно высоким уровнем характеристик по чувствительности, временному и пространственному разрешению как для приборов военного назначения, так и для научных исследований. К концу 1970-х гг. были освоены в серийном производстве ЭОП с МКП, которые получили название ЭОП II поколения. С начала 1980-х гг. началась разработка принципиально нового поколения ЭОП на основе фотокатодов с отрицательным электронным средством (ОЭС), которые получили название ЭОП III поколения.

Параллельно с разработкой нового поколения ЭОП была завершена разработка и организовано серийное производство современных высокоэффективных малогабаритных приборов и систем ночного видения на их основе, предназначенных, в первую очередь, для комплексной модернизации вооружения и военной техники, обеспечивающей достижение принципиально новых качеств и эффективности их применения в ночных условиях.

Применение нового поколения ЭОП обеспечило повышение уровня основных параметров и характеристик ЭОП НВ (пространственного разрешения, чувствительности, отношения сигнал/шум, коэффициента усиления яркости, ресурса и др.), что привело к увеличению дальности действия ЭОП НВ на их основе в 4–6 раз, а самое главное — обеспечило эффективную работу данных приборов при уровнях ЕНО в десятки раз более низких.

По мнению российских и зарубежных специалистов, еще не все возможности нового поколения ЭОП исчерпаны. Были проанализированы основные направления повышения дальности действия техники

ночного видения на их основе за счет оптимизации совокупности их основных параметров и характеристик, а также проведены сопоставления полученных результатов с ограничениями, обусловленными возможностями человека-оператора и условиями наблюдения. Основные результаты математического моделирования типовых ЭОП НВ показали, что ограничение дальности их действия связано с величиной ЕНО и метеорологической дальностью видения. При нормированной ЕНО на местности, составляющей порядка $5 \cdot 10^{-3}$ лк, качество изображения ночной «сцены» при использовании приборов на основе нового поколения ЭОП в ближайшем будущем уже не будет уступать полученному при высоких уровнях естественной освещенности ($\sim 10^2$ – 10^3 лк) дневными оптико-электронными системами.

В настоящее время одним из направлений работ по совершенствованию ЭОП является расширение их динамического диапазона по освещенности и снижение «запыливания» изображения при высоких уровнях освещенности фотокатода ЭОП ($\sim 10^2$ – 10^3 лк) при одновременном улучшении качества сформированного изображения при низких уровнях ЕНО. Для решения поставленной проблемы используется автоматическое импульсное питание ЭОП. При повышенных уровнях освещенности фотокатода ЭОП (сотни люкс) к зазору между МКП и фотокатодом подключается импульсное напряжение. Длительность и скважность импульсов автоматически устанавливается в зависимости от уровня освещенности фотокатода. Применение в ЭОП автоматического импульсного питания позволило значительно снизить «запыливание» изображения от ярких источников света, а также обеспечить широкий динамический диапазон по освещенности фотокатода, что позволяет эффективно применять технику ночного видения в сумерках, на рассвете и даже днем, но при невысоких уровнях освещенности (до 1000 лк). Кроме того, уменьшение размера ореола привело к улучшению качества изображения окружающего пространства, в пределах которого находится большое количество точечных источников света (уличных фонарей, транспортного осветительного оборудования, огней населенных пунктов и др.).

Другими ограничениями в применении современных серийно выпускаемых ЭОП являются спектральный диапазон и квантовая эффективность фотокатодов, которая уже сейчас достигла почти теоретического предела. Поэтому одним из важнейших направлений развития элементной базы для создания высокоэффективных приборных комплексов и систем ночного видения является создание «интеллектуальных» ЭОП, чувствительных в широкой спектральной области: от УФ ($\lambda = 0,2$ мкм) до ближней ИК ($\lambda = 1,7$ мкм) области спектра с высокой квантовой эффективностью до:

- 80 % в УФ (0,2–0,3 мкм) области спектра;
- 40 % в видимой и ближней ИК (0,4–0,93 мкм) области спектра;
- 20 % в ближней ИК (0,93–1,7 мкм) области спектра.

В этом новейшем поколении ЭОП электронное изображение после усиления МКП считывается с помощью специальной электронно-чувствительной полноформатной кремниевой ПЗС- или КМОП-матрицы, интегрированной в сверхвысоковакуумный объем нового поколения ЭОП (рис. В.12). Телевизионный сигнал с выхода ПЗС- или КМОП-матрицы оцифровывается, обрабатывается встроенным микропроцессором и отображается на микродисплее или передается по каналу связи.

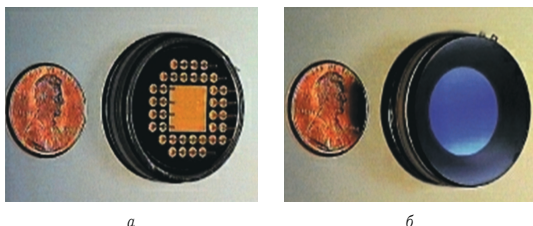


Рис. В.12. Новейшее поколение ЭОП с интегрированной в сверхвысоковакуумный объем КМОП-матрицей

Структурная схема «интеллектуального» ЭОП приведена на рис. В.13. Устройство состоит из пяти функциональных модулей. Модуль 1 представляет собой бипланарную структуру ЭОП, объединяющую полупроводниковый фотокатод с отрицательным электронным средством (ОЭС), МКП и ПЗС- или КМОП-матрицу, преобразующую изображение в электрический телевизионный сигнал. Модуль 2 — это специализированный микропроцессор для цифровой обработки изображений. Модуль 3 — это электронный блок управления ПЗС- или КМОП-матрицей и импульсным источником питания.

После цифровой обработки изображения микропроцессором телевизионный сигнал либо преобразуется в изображение на микродисплее, обозначенном на рис. В.13 как модуль 4, либо передается по каналу связи в распределенную систему наблюдения (сеть ночного видения). Для этой цели в состав «интеллектуального» ЭОП входит приемопередатчик (модуль 5), который может использоваться для приема служебной видеоинформации и целеуказания.

Данный ЭОП получил название «интеллектуальный» ЭОП, так как способность «видеть» обеспечивается модулем 1, «думать» — модулем 2, а «говорить и слушать» — модулем 5. Его конструкция не является оригинальной, так как уже используется в низкоуровневых ТВ-системах на основе ЭОП, состыкованного оптической системой или волоконно-оптическим фоконом с полноформатной ПЗС-матрицей. Принципиально новым является предложение разработать ряд унифицированных функциональных модулей 1–5, позволяющих создавать на

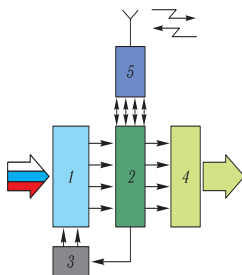


Рис. В.13. Структурная схема «интеллектуального» ЭОП

основе «интеллектуальных» ЭОП интеллектуальные малогабаритные современные системы ночного видения (компактные ночные прицелы, очки ночного видения, НСЦИ и др.). Отличительной особенностью «интеллектуальных» ЭОП по сравнению с предшествующими поколениями ЭОП является возможность встраивания данного ЭОП в интегрированные мультиспектральные системы наблюдения.

Проведенные исследования подтвердили преимущества разработки ЭОП НВ на основе «интеллектуальных» ЭОП, чувствительных в ближнем ИК спектральном диапазоне (до 1,7 мкм), по сравнению с традиционной техникой ночного видения на ЭОП предшествующих поколений за счет:

- резкого увеличения контраста целей на наблюдаемом естественном фоне;
- более высокого уровня естественной ночной освещенности местности по сравнению с уровнем освещенности в спектральном диапазоне чувствительности ЭОП III поколения;
- уменьшения рассеяния атмосферой ИК излучения;
- повышения помехозащищенности от естественных и искусственных источников излучения в видимой области спектра;
- возможности применения высокоэффективных лазеров: Nd:YAG ($\lambda = 1,06$ мкм) и Er:YAG ($\lambda = 1,54$ мкм), используемых для целеуказания.

Ключевым элементом «интеллектуальных» ЭОП для ИК области спектра является фотокатод с барьером Шоттки, созданный на основе гетероструктуры InP/InGaAsP/InP, а для УФ области спектра — ЭОП на основе ОЭС GaN фотокатода.

При создании современных ЭОП НВ на основе «интеллектуальных» ЭОП целесообразно:

- осуществлять цифровую обработку изображений для улучшения качества изображений и передачи их по каналу связи;

- осуществлять интеграцию данных ЭОП с плоскими дисплеями, что позволит обеспечить одновременный вывод на дисплей целеуказания, знакографической и другой дополнительной служебной информации для оператора;

- разрабатывать комплексные оптико-электронные системы, в состав которых будет входить тепловизионный канал, работающий в спектральном диапазоне 8–12 мкм, и «ночной» канал на основе «интеллектуального» ЭОП.

В такой системе оператору отображается синтезированное изображение, когда в более информативное изображение, сформированное ЭОП, интегрируется тепловизионное изображение цели. На рис. В.14 приведено синтезированное изображение, наблюдаемое пилотом в панорамные пилотажные очки ночного видения (рис. В.15), в которое интегрировано меньшее по размеру тепловизионное изображение танка. Для получения тепловизионного изображения на внешней подвеске вертолета устанавливается тепловизор, который синхронно поворачивается с разворотом головы летчика. Положение линии визирования в пространстве определяется системой целеуказания, размещенной на пилотажном шлеме летчика.

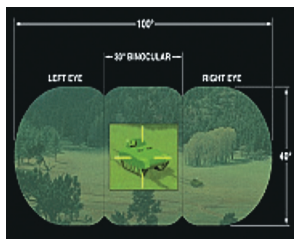


Рис. В.14. Изображение, сформированное ЭОП с интегрированным тепловизионным изображением

В настоящее время разработаны интегральные монокуляры и очки ночного видения на основе «интеллектуальных» ЭОП, в состав которых входит малогабаритный тепловизор на основе микроболометрической матрицы. На рис. В.16 приведен внешний вид очков ночного видения, а на рис. В.17 показано синтезированное изображение, наблюдаемое оператором в такие очки.

В последнее время очень часто в публикациях по ночному видению ставится один и тот же философский вопрос: **«Какой облик будет иметь техника ночного видения лет через 20?»** В данной монографии на поставленный вопрос не хотелось бы давать ответ, но вероятно, что лет через 20 в основном будут использоваться технические решения, созданные в начале XXI в. Возможно, применение



Рис. В.15. Панорамные пилотажные очки ночного видения



Рис. В.16. Внешний вид очков ночного видения на основе структуры ЭОП и тепловизора

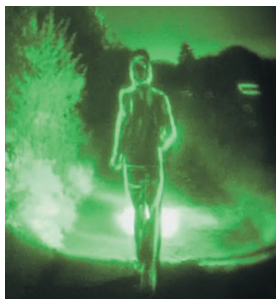


Рис. В.17. Синтезированное изображение, наблюдаемое оператором в ОНВ

цифровой вычислительной техники позволит значительно улучшить качество отображаемой информации, а за счет новых материалов будет улучшен дизайн приборов. Хотя совершенно очевидно, что российские специалисты и их зарубежные конкуренты будут активно искать пути создания новых поколений элементной базы приборов ночного видения. Весьма возможно, что в этот период будет создана принципиально новая элементная база, использование которой приведет к революционным изменениям в возможностях ночного видения.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

1.1. Глаз и его возможности

В огромном спектре электромагнитных волн, простирающемся от гамма-излучения с длиной волны менее сотой доли нанометра до радиоизлучения с длинами волн десятки километров, спектральная чувствительность глаза человека представляет очень узкую полосу — от 0,38 до 0,78 мкм — в видимой области спектра. Несмотря на кажущуюся ограниченность, объем информации об окружающем нас мире, получаемый с помощью зрения, настолько велик и многообразен, что все остальные органы чувств являются дополнением, хотя и могут поставлять информацию, опережающую по времени зрение. Объем информации, поступающий от зрительного анализатора, составляет, по данным науки, 90 % всей информации органов чувств человека. Зрительный анализатор содержит глаз, зрительные нервы и клетки затылочной части коры головного мозга, в которой происходит восприятие и анализ изображения, создаваемого глазом. Глаз осуществляет преобразование изображения наблюдаемого пространства светочувствительным приемником — сетчаткой, состоящей из фоторецепторов двух видов: палочек и колбочек, которые поглощают оптическое излучение и превращают принятый оптический сигнал в нервные импульсы, которые по зрительным нервам передаются в головной мозг.

1.1.1. Строение глаза. Строение глаза и его основные оптические параметры показаны на рис. 1.1 [1.1]. Глаз представляет собой так называемое глазное яблоко, заполненное стекловидным телом 12, которое прозрачно для оптического излучения в видимой и ближней ИК области спектра (рис. 1.5) и заключено в прозрачную оболочку. В передней части глазного яблока расположена выпуклая прозрачная оболочка — роговица 3, за которой находится радужная оболочка 1, пигментные клетки которой определяют цвет глаз. В центре радужной оболочки 1 имеется отверстие — зрачок 2. Кольцевые и радиальные мышцы (мышечный элемент 11) радужной оболочки 1 автоматически (без участия воли человека) под действием сигналов из коры головного мозга обеспечивают регулировку диаметра зрачка в пределах от 2

до 8 мм. При увеличении освещенности сетчатки глаза диаметр зрачка уменьшается, а при уменьшении — увеличивается (рис. 1.7) [1.1].

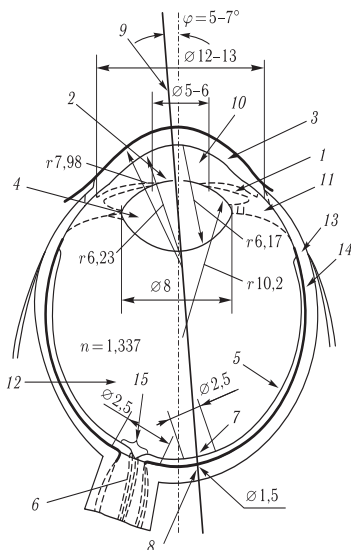


Рис. 1.1. Оптические параметры «стандартного» правого глаза: 1 — радужная оболочка; 2 — зрачок; 3 — роговица; 4 — хрусталик; 5 — сетчатка; 6 — зрительный нерв; 7 — «желтое» пятно; 8 — фовеа; 9 — зрительная ось фиксации; 10 — водянистая влага; 11 — мышечный элемент; 12 — стекловидное тело; 13 — склера; 14 — сосудистая оболочка; 15 — слепое пятно

К мышечному элементу 11 прикреплена двояковыпуклая линза — хрусталик 4, который формирует изображение наблюдаемых объектов на сетчатке 5, выстилающей внутреннюю поверхность глазного яблока. Он может менять кривизну своих оптических поверхностей. За счет этого изображение объектов наблюдения, находящихся на разных расстояниях от глаза, фокусируется хрусталиком 4 на сетчатку 5. Пространство между роговицей и хрусталиком заполнено водянистой влагой 10. К сосудистой оболочке с внутренней ее поверхности прилегает пигментный слой эпитакиальных клеток. Под ним лежит примыкающая к нему сетчатая оболочка (ретины). Она воспринимает формируемое хрусталиком 4 изображение, преобразует его в нервное