

УДК 551.46.0
EDN: ZZEFNY

PACS: 07.20.Ка

Гибридный фотоприемный модуль для оптико-телевизионных систем подводного видения

Ю. К. Грузевич, П. С. Альков, Л. М. Балясный, Д. В. Волков

Показана возможность создания лазерных оптико-телевизионных активно-импульсных систем подводного видения на основе фотоприемных модулей (ФПМ) с чувствительной структурой электронно-оптического преобразователя (ЭОП) III поколения с GaAs «голубым» фотокатодом, чувствительным в спектральном диапазоне прозрачности морской воды $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм, состыкованных с помощью волоконно-оптических элементов с цифровыми крупноформатными КМОП-матрицами, обеспечивающих формирование видеоизображения подводных объектов в рассеивающей морской воде.

Ключевые слова: подводное зрение; ЭОП; активно-импульсная система; импульсный лазер; фотокатод; квантовая эффективность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-70-77

Введение

Высокая чувствительность ЭОП III поколения GaAs «голубым» фотокатодом в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм обеспечивается за счет оптимизации по толщине и составу буферного слоя фотокатодного узла (ФКУ) ЭОП III поколения. За счет из-

менения состава и дизайна буферного слоя ФКУ удалось получить GaAs фотокатод с отрицательным электронным сродством (ОЭС-фотокатод) в составе образцов ФПМ с квантовой эффективностью до 30 % на длине волны второй гармоники 532 нм импульсного Nd:YAG лазера.

Одним из направлений развития оптико-электронных систем для проведения подводных работ, связанных с поиском, обнаружением и опознаванием безэкипажных подводных аппаратов, затонувших объектов, а также выявлением минной опасности и морских диверсантов, борьбой с морским терроризмом, мониторингом трубопроводов, подводных кабелей и скважин является создание оптико-телевизионных систем, которые обеспечивают получение информации о подводных объектах не только с целью их обнаружения и определения местонахождения, но и для их распознавания и идентификации за счет получения изображений этих объектов.

Получить изображения подводных объектов можно с помощью лазерных оптико-телевизионных активно-импульсных систем подводного видения (АИС ПВ), которые обеспечивают формирование видеоизображе-

Грузевич Юрий Кириллович^{1,2}, зам. ген. директора, к.т.н., профессор.

E-mail: yukg@mail.ru

Альков Павел Сергеевич¹, зам. техн. директора, к.т.н.

E-mail: pavel_alkov@mail.ru

Волков Дмитрий Владимирович¹, вед. инженер.

E-mail: mitya_volkov_7554@bk.ru

Балясный Лев Михайлович¹, гл. конструктор.

E-mail: baliaska@mail.ru

¹ ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ».

Россия, 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2.

² МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025

После доработки 10.02.2025

Принята к публикации 14.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Грузевич Ю. К., Альков П. С., Волков Д. В., Балясный Л. М., 2025

ния подводных объектов в рассеивающей морской воде на основе применения активно-импульсного метода наблюдения, предложенного русским ученым – профессором А. А. Лебедевым в 1936 г. [1]. Метод заключался в освещении наблюдаемого пространства импульсами оптического излучения с длительностью меньшей, чем время распространения импульсов до объектов наблюдения, и в синхронизированном приеме отраженных от данных объектов наблюдения оптических сигналов. Такой метод обеспечивает наблюдение ограниченного по глубине окружающего подводного пространства и резко уменьшает зависимость наблюдения от условий освещенности объектов наблюдения и окружающих их фонов (толща воды или донная поверхность), а также естественных оптических помех – это морская вода и водоросли, а также находящиеся в ней растворённые и взвешенные вещества органического и неорганического происхождения. Таким образом, применение активно-импульсного метода формирования подводных видеоизображений позволяет устранить «паразитное» влияние помехи обратного рассеяния подсвечивающего оптического излучения, которые накладываются на полезное изображение наблюдаемых подводных объектов, снижая их контраст и, следовательно, дальность видимости, а зачастую, полностью теряя видимость подводных объектов, в особенности при пониженной прозрачности морской воды.

Реализация технологии активно-импульсного режима привела к созданию приборов, обеспечивающих подводное видение на экране телевизионного монитора за счет комбинированных оптико-телевизионных, лазерных и оптических технических решений. Практическое значение активно-импульсного режима заключается в достижении рекордной дальности формирования изображений подводных объектов по сравнению с другими оптическими и оптико-электронными приборами, в том числе, с высокочастотными гидролокаторами секторного обзора, работающими в идентичных условиях [2].

Переход на качественно новый уровень получения визуальной видеoinформации расширил ограниченные естественным образом возможности человеческого глаза для наблюдения подводных объектов в спектраль-

ном диапазоне прозрачности морской воды, при определенных уровнях освещенности подводного пространства наблюдения, обеспечивающих дальность наблюдения в зависимости от прозрачности морской воды, позволяя оператору вести наблюдение под водой в полной темноте даже в отсутствии солнечного излучения. При этом обеспечивается качественное формирование изображений удаленных подводных объектов в сильно рассеивающей морской воде, когда при использовании стандартных телевизионных камер, работающих совместно с прожекторами, практически невозможно обнаружить и распознать подводные объекты.

Для решения поставленной проблемы АИС ПВ могут располагаться на подводных обитаемых и необитаемых комплексах, телеуправляемых подводных аппаратах и других подводных объектах (рис. 1а). Однако, для решения целого ряда задач использование АИС ПВ в составе подводных аппаратов связано с большими техническими сложностями. В таких случаях целесообразно проводить поисково-спасательные работы с помощью АИС ПВ, установленных на летательных аппаратах (ЛА), например, вертолете (рис. 1б) или беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). При этом время поиска подводных объектов с борта ЛА значительно сокращается за счет увеличения площади охватываемого района.

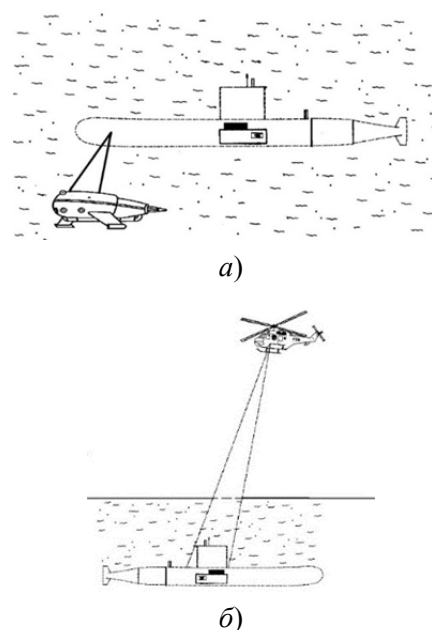


Рис. 1. Схема формирования изображения активно-импульсной системой подводного видения

В связи с этим возникает задача формирования изображения подводных объектов и оценки качества изображения, регистрируемого лазерной АИС ПВ через взволнованную границу раздела «воздух-вода», которое ухудшается, в основном, в результате воздействия следующих основных факторов:

- большая часть излучения, попадающего на поверхность моря, поглощается и рассеивается морской водой, что приводит к ограничению глубины наблюдаемого пространства;

- отраженный сигнал от подводных объектов очень слабый, а фоновый шум океана велик, что напрямую влияет на обработку и формирование изображения;

- многократное рассеяние и флуктуации в распределении подводной освещенности, вызванные случайным характером преломления излучения на взволнованной поверхности приводит к размытию изображения подводных объектов нарушению топологии изображения.

Для получения изображения подводных объектов и решение задачи оценки качества изображения используется теория переноса изображения подводных объектов через взволнованную водную поверхность и толщу воды. До настоящего времени основные усилия были направлены на установление аналитических соотношений между статистически средними характеристиками изображения и условиями наблюдения не полностью усредненного изображения. Решение задачи правильного описания характеристик не полностью усредненного изображения может быть значительно упрощена при условии, когда время распространения одного зондирующего лазерного импульса до наблюдаемого подводного объекта и обратно через границу раздела «воздух-вода», а также инерционность ФПМ оптико-телевизионной регистрирующего канала системы должны быть намного меньше характерного времени изменения формы взволнованной морской поверхности, которую можно считать «замороженной» в течение времени формирования одного изображения. При таком подходе можно оценить искажения, которые вносят в статистически среднее изображение процессы многократного рассеяния и поглощения излучения в водной среде и случайного преломления на взволнованной границе [2].

Следовательно, для практического использования данного метода для обнаружения и распознавания с борта ЛА в реальном времени малогабаритных подводных объектов в условиях взволнованной рассеивающей морской воды, регистрирующий канал АИС ПВ должен быть создан на основе быстродействующего ФПМ, высокочувствительного в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, а подсвечивающий канал – на основе высокоэффективного импульсного лазера, излучающего в спектральном диапазоне прозрачности морской воды.

Спектральная характеристика пропускания морской воды в оптическом спектральном диапазоне приведена на рис. 2, из которого видно, что морская вода прозрачна только в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм. При этом поглощение оптического излучения в УФ спектральном диапазоне в $\sim 10^9$, а в ИК области спектра в $\sim 10^6$ превышает поглощение в рабочей (сине-зеленой) области спектра [3].

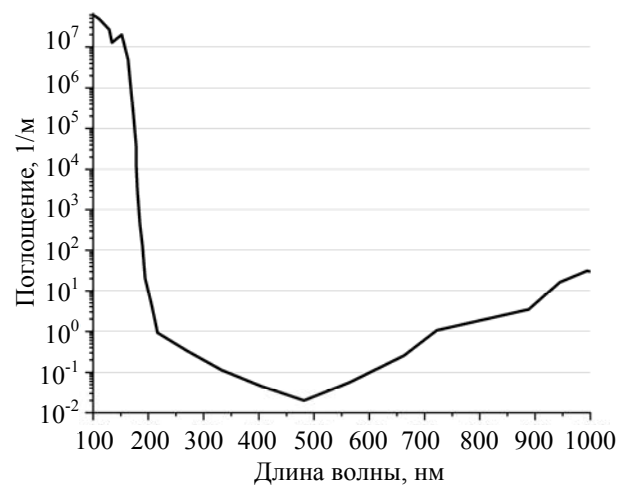


Рис. 2. Спектральная характеристика пропускания морской воды

В настоящее время на рынке отсутствуют оптико-телевизионные системы подводного видения, удовлетворяющие по всей совокупности современным требованиям. Поэтому работа по созданию АИС ПВ потребовала проведения комплексных фундаментальных исследований для разработки принципиально новых технологий и технических решений, обеспечивающих значительное повышение дальности действия АИС ПВ, установленной

на борту ЛА, и улучшение качества сформированного изображения подводных объектов за счет создания:

- быстродействующих, высокоразрешающих цифровых ФПМ, высокочувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм;
- быстродействующих, высокоэффективных, малогабаритных импульсных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, используемых для подсветки различных подводных объектов;
- перестраиваемого цифрового контроллера управления, осуществляющего формирование синхронизирующих и управляющих импульсов, поступающих на ФПМ и подсвечивающий импульсный лазер, а также в осуществляющего распределение лазерных импульсов в стробе по заданному закону, позволяющему уменьшить влияние помех обратного рассеяния от естественных оптических помех на изображение цели наблюдения;
- специализированных вычислителей и программного обеспечения.

Ключевым элементом, обеспечивающим обнаружение и распознавание малогабаритных, низкоконтрастных подводных объектов в отсутствии подсвечивающего солнечного излучения, на больших глубинах на фоне морского дна и в условиях сильно рассеивающей водной среды, является специально разработанный ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» ФПМ на основе ЭОП III поколения, чувствительного в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, состыкованного с цифровой КМОП-матрицей высокого разрешения, которые обеспечат с высоким быстродействием формирование многократно усиленных изображений подводных объектов [4]. ОАО «НПО Геофизика-НВ» были проведены исследовательские работы по созданию и модернизации активно-импульсных оптико-телевизионных систем на основе ЭОП III поколения с GaAs ОЭС-фотокатод. На рис. 3 приведены спектральные характеристики различных фотокатодов, чувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм [4].

Из приведенных характеристик видно, что на длине волны 532 нм чувствительностью в спектральном диапазоне $\Delta\lambda =$

$(400\div 550)$ нм обладают следующие фотокатоды:

- тонкий мультищелочной фотокатод S-20 (до 15 % квантовой эффективности);
- ОЭС-фотокатод на основе GaAs (не менее 25 % квантовой эффективности);
- ОЭС-фотокатод на основе GaAsP (более 50 % квантовой эффективности) [5].

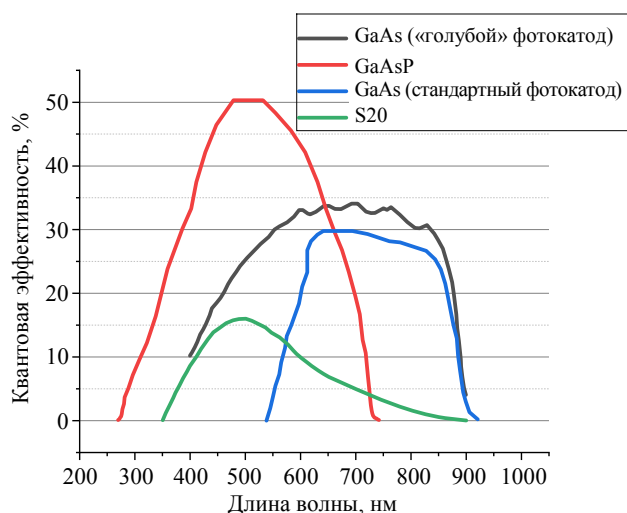


Рис. 3. Спектральные характеристики фотокатодов

Проведенный анализ показал, что ЭОП II⁺ поколения на основе мультищелочных фотокатодов типа S-20 обладают целым рядом недостатков, ограничивающих их применение в составе ФПМ для АИС ПВ:

- во-первых, имеют значительно более низкую фоточувствительность по сравнению с другими типами фотокатодов;
- во-вторых, имеют высокое удельное сопротивление фотокатодов, которое не позволит осуществлять стробирование короткими импульсами (до десятков наносекунд).

На рис. 3 приведена спектральная характеристика стандартного ОЭС фотокатода на основе GaAs, который предназначен для ЭОП III поколения, используемых в приборах ночного видения. Учитывая, что коротковолновая граница фоточувствительности ОЭС фотокатода определяется толщиной и составом его буферного слоя, который находится на поверхности входного окна ЭОП перед активным слоем GaAs, то квантовая эффективность стандартного GaAs фотокатода на длине волны 532 нм даже меньше, чем у мультищелочного фотокатода S-20.

В настоящее время ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» производит ЭОП III поколения со стандартными фотокатодами на основе GaAs с буферным слоем $Ga_{0,4}Al_{0,6}As$ толщиной порядка 1 мкм и активным слоем GaAs толщиной порядка 1,5 мкм. При таком соотношении толщин слоев ФКУ спектральный диапазон работы ЭОП III поколения на основе данного ФКУ $\Delta\lambda = (590\div 930)$ нм и такой ЭОП предназначен для работы в составе приборов ночного видения, в которых чувствительность ФКУ в сине-зеленой области спектра ухудшает работу приборов ночного видения.

Для обеспечения высокой чувствительности ЭОП III поколения с ОЭС-фотокатодами на основе GaAs в спектральном диапазоне пропускания морской воды (рис. 2), необходимо предусмотреть в конструкции ФКУ тонкий буферный слой порядка 0,01 мкм. Однако, при изготовлении ФКУ с таким тонким слоем возможны его повреждения при механических и химических воздействиях. Поэтому принято решение дополнительно к тонкому буферному слою изготовить слой переменного состава (градиентный слой) общей толщиной 0,1 мкм.

Конструкция такой структуры ФКУ приведена на рис. 4. Монокристаллическая подложка 6 химически удаляется травлением после термокомпрессионного соединения со стеклом, а стопорный, слой 7 химически удаляется после стравливания подложки 6.

Для обеспечения согласования слоев гетероэпитаксиальной структуры ФКУ по параметрам кристаллической решетки, предельно допустимое количество алюминия в буферном слое не должно превышать 70 %, при котором также обеспечивается хорошее оптическое пропускание ФКУ. Толщина активного слоя ФКУ также имеет большое значение. Умень-

шение толщины рабочего слоя с 1,5 мкм до 0,35–0,45 мкм уменьшает нежелательное поглощение ИК-излучения, снижающего контраст изображения подводных объектов. Кроме того, просветляющее покрытие SiO_2 , толщиной порядка 1,0 нм для ИК области спектра неоптимально для сине-зеленого спектрального диапазона прозрачности морской воды, для которого оптимальной является толщина просветляющее покрытие SiO_2 порядка 0,7±0,75 нм.

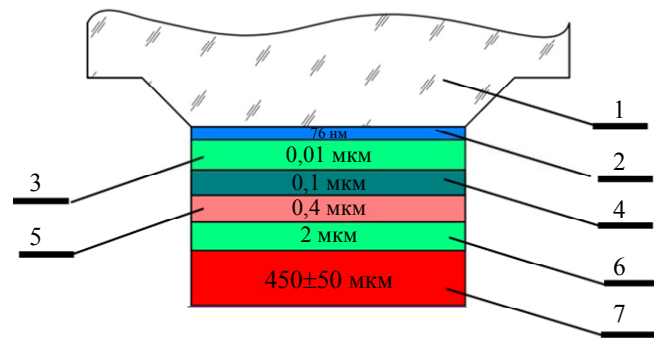


Рис. 4. Схема конструкции ФКУ ЭОП III поколения с ОЭС-фотокатодом на основе GaAs. 1 – стеклянное входное окно; 2 – просветляющий и диффузионно-барьерный слой SiO_2 ; 3 – буферный слой $Ga_xAl_{1-x}As$; 4 – градиентный слой; 5 – активный слой – GaAs; 6 – стопорный слой; 7 – монокристаллическая подложка GaAs

Рассмотренные замечания реализованы ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» в модернизированной конструкции гетероэпитаксиальной структуры ФКУ, значения которых приведены в таблице 1, используемой для создания ЭОП III поколения с ОЭС-фотокатодами на основе GaAs, обладающих высокой чувствительностью в спектральном диапазоне пропускания морской воды. Такие ЭОП получили название ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом.

Таблица 1

№ п. п.	Наименование слоя	Состав слоя	Уровень легирования, см ³	Толщина слоя, мкм
1	2	3	4	5
1	Просветляющий диффузионно-барьерный	SiO_2	–	0,076
2	Буферный	$p-Al_{0,7}Ga_{0,3}As:Zn$	$5,9 \times 10^{17}$	0,01
3	Градиентный переменного состава	$p-Al_{0,7}Ga_{0,3}As$ $p-GaAs:Zn$	$5,9 \times 10^{17}$	0,1
4	Активный	$p-GaAs:Zn$	$6,6 \times 10^{18}$	0,4
5	Стопорный	$p-Al_{0,6}Ga_{0,4}As:Zn$	$5,9 \times 10^{17}$	2,0
6	Подложка	$n-GaAs:Si(100)$	5×10^{17}	450±25

После изготовления ФКУ процесс его активировки и сборки вакуумного блока ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом проводят в сверхвысоковакуумной установке финишной сборки (УФС) [4].

Термическая очистка и активировка ФКУ цезием и кислородом проводят в отдельной камере, а сборку вакуумного блока в другой камере герметизации, что обеспечивает низкий уровень шумов и высокую чувствительность ФКУ.

Для получения высокого квантового выхода в нужном спектральном диапазоне активировку фотокатода проводят с фильтрацией возбуждающего излучения, например, с помощью цветного стекла ЗС8 или интерференционного фильтра.

В результате проведенных работ ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» были созданы образцы ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом с квантовой эффективностью до 25 % на длине волны 532 нм. Спектральная характеристика чувствительности созданных образцов ЭОП III поколения приведена на рис. 5.

Учитывая, что в настоящее время наиболее перспективным фотокатодом для решения задач подводного видения является ОЭС-фотокатод на основе тройного соединения GaAsP, спектральная характеристика такого фотокатода фирмы «HAMAMATSU PHOTONICS» приведена на рис. 3, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» активно работает в этом направлении.

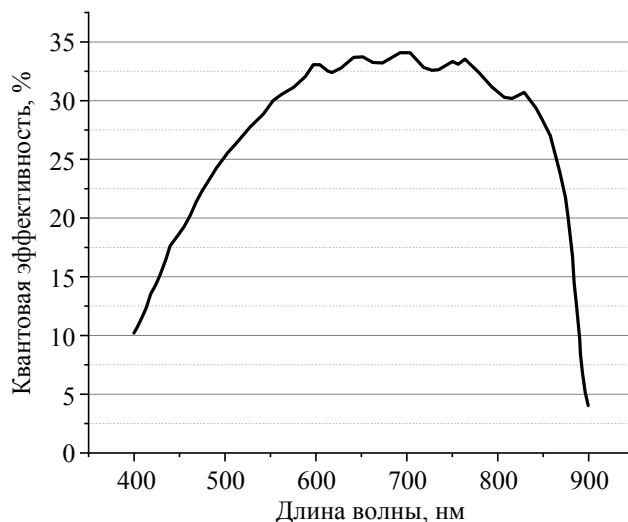


Рис. 5. Спектральная характеристика ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом с оптимизированном по толщине и составу буферного слоя

Для создания АИС ПВ на основе разработанного ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом, высокочувствительного в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» разработан высокоэффективный ФПМ типа «ФПМ-5-1», в котором для получения видеоизображения ЭОП III поколения состыкован с цифровой КМОП-матрицей высокого разрешения и быстродействия через прямой волоконно-оптический элемент (ВОЭ) [4].

Основные параметры разработанного ФПМ типа «ФПМ-5-1» приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование параметра	Значение параметра
Спектральный диапазон чувствительности, мкм	0,4–0,7
Чувствительность интегральная, мкА/лм	2500
Чувствительность спектральная (530 нм), мА/Вт	150
Рабочее телевизионное разрешение по полю, твл	450
Максимальная частота кадров, Гц	100
Отношение сигнал/шум ($E = 10^{-4}$ лк)	20
Напряжение питания, В	12
Ток потребления, мА	250
Формат выходного кадра, пиксель	2200×1024
Разрядность выходного сигнала, бит	12

На рис. 6 показан внешний вид модуля типа «ФПМ-5-1» [4].

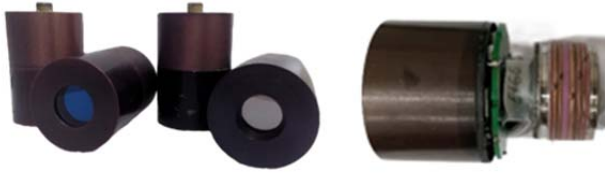


Рис. 6. Внешний вид фотоприемных модулей типа «ФПМ-5-1» и вакуумного блока ЭОП, состыкованный с камерой на основе КМОП-матрицы

Использование волоконного фокона переноса приводит к потерям пространственного разрешения и энергетических характеристик переносимого оптического изображения. Наиболее перспективным развитием приемной системы является использование конструкций, в которых цифровая КМОП-матрица помещается внутри вакуумного объема ЭОП и возбуждается непосредственно электронным пучком, содержащим информацию об изображении подводных объектов. При этом значительно снижаются потери, так как отсутствует фокон для переноса изображения, а усиление электронного потока осуществляется за счет бомбардировки ими обратной стороны специально утоненной КМОП-матрицы. Шумовые характеристики такого гибридного прибора значительно лучше, чем традиционного ФПМ. В настоящее время, как в нашей стране, в частности в ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», так и за рубежом ведется разработка перспективных гибридных ФПМ, также фоточувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды.

Активно-импульсный метод формирования подводных изображений тесно связан с развитием средств импульсной подсветки, и, прежде всего, с созданием высокоэффективных импульсных лазеров. Рабочим телом которого является кристалл Nd:YAG. Разработка современных высокоэффективных импульсных лазеров. Накачка рабочего тела лазера осуществляется диодными светоизлучающими линейками, а модуляция добротности производится электрооптическим затвором. Удвоение частоты генерации (на длине волны 532 нм) осуществляется элементом на основе кристалла КТП (калий титанил фосфата –

KTiOPO₄), что обеспечивает излучение в спектральной области прозрачности морской воды (рис. 2). Разработанные Nd:YAG лазеры обеспечивают при энергии в импульсе от несколько сотен мкДж до десятков мДж длительность импульса (по уровню 0,5) порядка десятков нс.

Оценка средней мощности лазерного излучения, проведенная разными авторами, в том числе, при натурных испытаниях макета камеры подводного видения, разработанной в ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», показывает, что из-за значительного поглощения и рассеивания лазерного излучения слоем морской воды, необходима значительная импульсная энергия и средняя мощность лазера. Для каждого конкретного применения необходимо оценить требуемые параметры подсвечивающего лазерного излучения, по которым выбирать конкретный лазер.

Заключение

В статье показана возможность создания лазерных оптико-телевизионных активно-импульсных систем подводного видения на основе фотоприемных модулей (ФПМ) с чувствительной структурой ЭОП III поколения с GaAs «голубым» фотокатодом, чувствительным в спектральном диапазоне прозрачности морской воды $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм, состыкованных с помощью волоконно-оптических элементов с цифровыми крупноформатными КМОП-матрицами, обеспечивающих формирование видеоизображения подводных объектов в рассеивающей морской воде.

Высокая чувствительность ЭОП III поколения GaAs «голубым» фотокатодом в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = (400\div 550)$ нм обеспечивается за счет оптимизации по толщине и составу буферного слоя фотокатодного узла (ФКУ) ЭОП III поколения. За счет изменения состава и дизайна буферного слоя ФКУ удалось получить GaAs ОЭС-фотокатод в составе образцов ФПМ с квантовой эффективностью до 25 % на длине волны второй гармоники импульсного Nd:YAG лазера – 532 нм.

Дальнейшее совершенствование АИС ПВ может быть связано с разработкой ОЭС-фотокатодов на основе структуры GaAsP, об-

ладающего в настоящее время квантовой эффективностью до 50 % на длине волны 532 нм [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В. Г. / Специальная техника. 2001. № 5.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазер-

ные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.

3. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. – Л.: Гидрометеиздат, 1991.

4. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.

5. Каталог фирмы «HAMAMATSU PHOTONICS»: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/II_TII0007E.pdf (дата обращения: 01.02.2025).

PACS: 07.20.Ka

Hybrid photodetector module for optical television underwater vision systems

Yu. K. Gruzevich, P. S. Alkov, L. M. Balyasny and D. V. Volkov

Joint Stock Company «RPC GEOFIZIKA-NV»
Bd. 2, 23 Matrosskaya Tishina st., Moscow, 107076, Russia

Received 28.01.2025; revised 10.02.2025; accepted 14.02.2025

The article shows the possibility of creating laser optical-television active-pulse underwater vision systems based on photodetector modules (PDM) with a sensitive structure Third generation Image Intensifier Tubes (IIT Gen. III) with a GaAs "blue" photocathode sensitive in the spectral range of seawater transparency $\Delta\lambda = (400\div550)$ nm, coupled using fiber-optic elements with digital large-format CMOS matrix that provide video images of underwater objects in diffusing seawater. The high sensitivity of the IIT Gen. III on the base of GaAs with "blue" photocathode is ensured by optimizing the photocathode thickness and composition of buffer layer. By changing the composition and design of the photocathode buffer layer, it was possible to obtain a GaAs ECO photocathode in FDM samples with a quantum efficiency of up to 30 % at the wavelength of a pulsed Nd:YAG laser. The article also substantiates the need for additional development a IIT Gen. III with the photocathode based on a triple GaAsP compound, which currently has a quantum efficiency of up to 50 % at a wavelength of 532 nm [5].

Keywords: underwater vision; Image Intensifier Tubes; active-pulse system; pulsed laser; photocathode; quantum efficiency.

REFERENCES

1. Volkov V. G., Special Technics, № 5 (2001).
2. Karasik V. E. and Orlov V. M., Laser location vision systems. Moscow, N. E. Bauman MGTU, 2013.
3. Dolin L. S. and Levin I. M., Theory of underwater vision. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991.
4. Gruzevich Yu. K., Optoelectronic night vision devices. Moscow, FIZMATLIT, 2014.
5. Catalog of the company «HAMAMATSU PHOTONICS»: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/II_TII0007E.pdf (date of access: 01.02.2025).