6. Energy influx measurements with an active thermal probe in plasma-technological processes / R. Wiese, H. Kersten, G. Wiese, R. Bartsch // EPJ Techniq. Instrum. 2015. Vol. 2. P. 1–10.

7. Substrate heating and cooling during magnetron sputtering of copper target / V. I. Shapovalov, A. E. Komlev, A. S. Bondarenko, P. B. Baykov, V. V. Karzin // Phys. Lett. A. 2016. Vol. 380, № 7–8. P. 882–885.

8. Thermal processes during reactive sputtering of hot titanium target / E. A. Minzhulina, V. I. Shapovalov, V. V. Smirnov, A. V. Zav'aylov, V. S. Levitskiy // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. 857. P. 1–4

9. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // Vacuum. 2019. Vol. 161. P. 324–327.

V. A. Pavlov, V. I. Shapovalov, D. S. Shestakov, A. V. Kochyn, A. V. Rudakov, A. E. Shabalin
Saint Petersburg Electrotechnical University

SHORTENING THE DURATION OF OBSERVATION OF THE SUBSTRATE HEATING KINETICS URING MAGNETRON SPUTTERING OF A COPPER TARGET

The kinetics of heating and cooling of the substrate during magnetron sputtering of a copper target has been investigated. A thermocouple sensor with a sensitive element in the form of a copper disk is used to study the kinetics of thermal processes on substrates. It was found that the kinetic dependence of heating is exponential. To reduce the duration of observation of this process, it is proposed to use the extrapolation of the kinetic dependence to the stationary state region. The relative extrapolation error was used as a criterion for choosing a shortened observation interval. A technique for reducing the duration of the experiment is proposed. It is universal in nature for installations similar in type and structure to the one used in this work. For its application in each practical case, it is necessary to carry out one long-term experiment in which the process of heating the substrate reaches a steady state.

Magnetron, target, substrate, sputtering, thermal process

УДК 533.59

А. Н. Соколов, М. З. Щедринский, К. В. Рыбас, М. Г. Воробьев,
В. А. Синькова, А. И. Колдыба
Филиал АО «Корпорация „Комета“» – «НПЦ ОЭКН»

Л. Н. Розанов, М. П. Ларин
ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

Стенд для исследования тепловых режимов фотоприемных устройств космического применения

Представлено описание конструкции термовакуумного стенда для исследований тепловых режимов фотоприемных устройств. Приведены параметры применяемых измерительных приборов, вакуумная и электрическая схемы стенда. Термовакуумный стенд позволяет экспериментально моделировать различные тепловые воздействия в широком интервале температур на крупноформатные фотоприемные устройства космического применения различных типов при имитации штатных условий эксплуатации бортовой аппаратуры в части вакуумных и температурных воздействий. Термовакуумный стенд позволяет определять температуры в заданных точках конструкции фотоприемного устройства в диапазоне от 83 до 350 K, теплоприток от фоточувствительного элемента и корпуса фотоприемного устройства с учетом влияния конструкции оптической системы, давление и спектр масс газов внутри вакуумной камеры стенда в реальном времени.

Термовакуумный стенд, тепловой режим, фотоприемное устройство

В составе бортовой аппаратуры космического назначения широко применяются различные типы крупноформатных фотоприемных устройств [1]. Крупноформатные фотоприемные устрой-

ства, применяемые для дистанционного зондирования Земли, функционируют в интервале температур от 70 до 190 К, при этом рабочая температура поддерживается в диапазоне не более ±3 К. Для охлаждения до рабочей температуры и обеспечения функционирования ФПУ в заданном температурном диапазоне в составе бортовой аппаратуры применяют системы криостатирования на основе микрокриогенных систем и системы терморегулирования на основе радиаторов-излучателей [2]. Тип и основные характеристики (холодопроизводительность, энергопотребление, масса) применяемой системы криостатирования/терморегулирования зависят от рабочей температуры и значения теплопритока от ФПУ. В связи с этим одной из основных задач при проектировании систем криостатирования/терморегулирования является определение значения теплопритока от ФПУ.

Конструктивно крупноформатное ФПУ представляет собой корпус, внутри которого расположен фоточувствительный элемент (ФЧЭ). Оптический сигнал проходит через фильтр и входное окно и попадает на ФЧЭ. Поддержание рабочей температуры ФЧЭ осуществляется с помощью теплопровода, соединенного с системой криостатирования/терморегулирования. К ФЧЭ присоединены электрические провода, соединенные с электронной частью ФПУ. На рис. 1 показано схематичное изображение ФПУ, где *1* – фильтр; *2* – входное окно; *3* – фоточувствительный элемент; *4* – корпус; *5* – разъем с проводами; *6* – теплопровод.

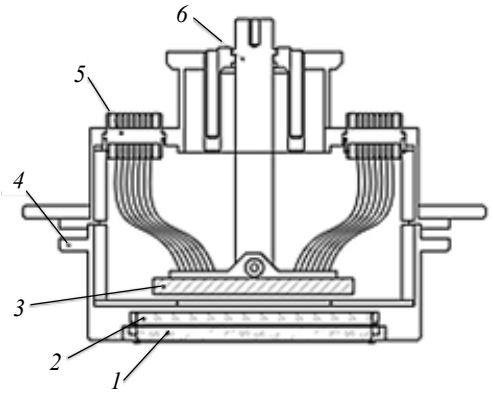

Рис. 1

Значение теплопритока ФПУ в штатных условиях эксплуатации зависит от конструкции ФПУ, тепловыделения электронных элементов ФПУ, крепления ФПУ к оптической системе, температуры условной окружающей среды [3]. Под температурой условной окружающей среды для ФПУ понимается температура окружающих устройств, с которыми ФПУ имеет тепловые связи, – это оптическая система и вакуумный объем, в котором ФПУ расположен.

Известен стенд для проведения термовакуумных испытаний крупноформатных фотоприемных устройств [4], однако он обладает рядом недостатков, основные из которых – невозможность обеспечения высокого вакуума, а также моделирования влияния оптической системы на теплоприток к ФПУ.

Для исследования тепловых параметров ФПУ в режимах, близких к штатным условиям эксплуатации, был разработан стенд, конструкция и параметры которого представлены далее.

Стенд включает в себя термовакуумную камеру с откачными средствами; комплект контрольно-измерительных приборов, соединенных с персональным компьютером; комплект средств обеспечения теплового режима; передвижной стол, на котором закреплена термовакуумная камера; программное обеспечение, установленное на персональном компьютере; комплект вспомогательного оборудования, обеспечивающего проведение испытаний.

Конструктивно термовакуумная камера представляет собой цилиндр диаметром 444 мм и длиной 570 мм с двумя торцевыми крышками. На боковой поверхности вакуумной камеры расположены патрубки различных диаметров для подключения криоадсорбционного насоса, вакуумметра, масс-спектрометра.

Одна из торцевых крышек термовакуумной камеры представляет собой жидкостной проточный теплообменник, который совместно с криотермостатом обеспечивает температуру внутренней поверхности передней крышки в диапазоне от –50 до 30 °С (рис. 2). К другой торцевой крышке присоединен проточный теплообменник в виде цилиндрического экрана, имеющий отражающее покрытие диаметром 384 мм и длиной 377 мм, охлаждаемый газообразным азотом до температуры –40 °С с помощью криостата (рис. 3). Также на этой крышке установлен фланец с разъемами для подключения электрических кабелей. Обе торцевые крышки установлены через уплотнения из вакуумной резины. На корпусе вакуумной камеры установлены криостат I уровня, обеспечивающий поддержание температуры фоточувствительного элемента ФПУ в диапазоне от 83 до 95 К, и криостат II уровня, обеспечива-

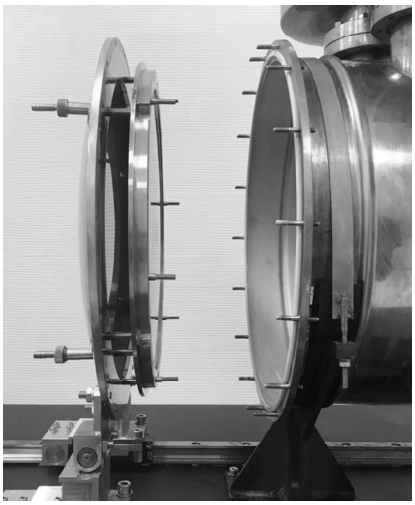

Рис. 2

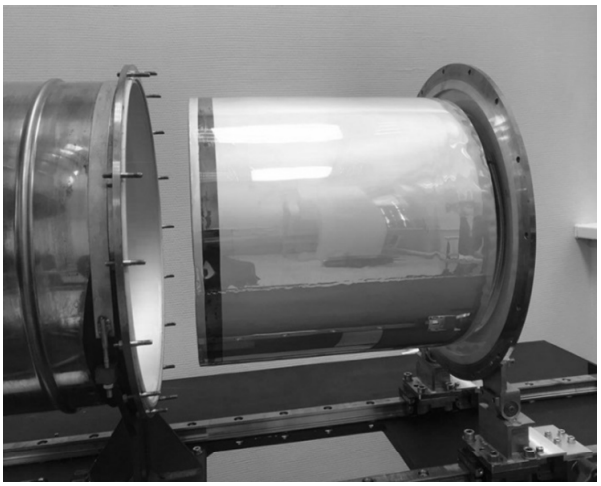

Рис. 3

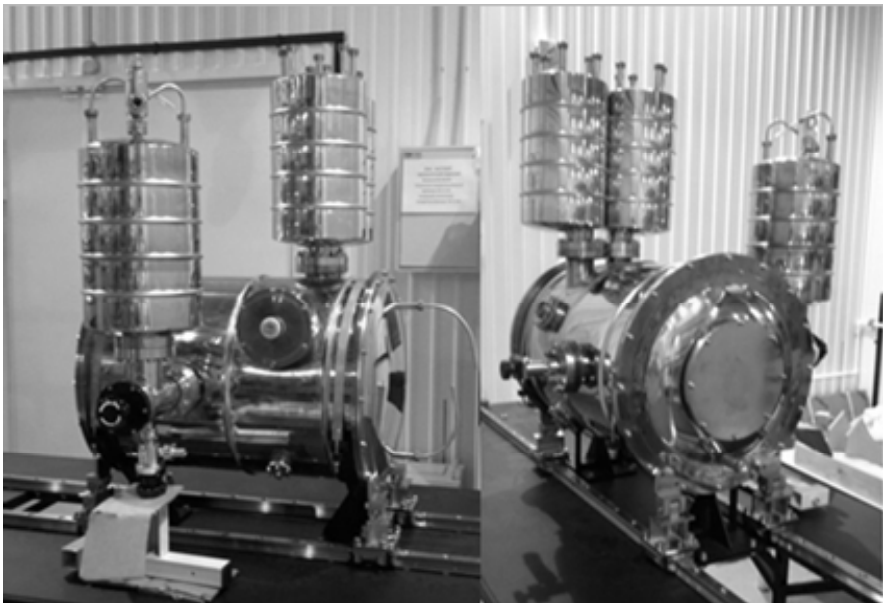

Рис. 4

ющий поддержание температуры корпуса ФПУ в диапазоне от 160 до 293 К. Габариты каждого криостата: диаметр 200 мм, высота 314 мм.

Общий вид стенда представлен на рис. 4.

К существенным достоинством стенда относится возможность моделирования влияния от конструктивных элементов оптической системы на ФПУ. Для моделирования температурного воздействия конструкции оптической системы на ФПУ применен жидкостной проточный теплообменник, который также служит передней крышкой вакуумной камеры, на которой крепится сборка, состоящая из детали, соединяющей ФПУ и оптическую систему. Другой теплообменник моделирует воздействие температуры условной окружающей среды, в которой находится корпус ФПУ. Криостаты моделируют температурные воздействия системы криостатирования/терморегулирования.

Для обеспечения высокого вакуума внутри термовакуумной камеры применены безмасляные средства откачки. Форвакуумная откачка термовакуумной камеры осуществляется безмасляным спиральным насосом типа Edwards xDs10i через фланец KF25, высоковакуумная откачка – криоадсорбционным насосом типа НСЖА-6.3 через фланец CF63, что позволяет обеспечить давление внутри вакуумной камеры $5 \cdot 10^{-6}$ торр.

Применение криоадсорбционного насоса обусловлено такими преимуществами перед турбомолекулярным насосом, как отсутствие вибраций и электромагнитных наводок, функционирование в течение не менее двух суток без заливки жидким азотом, отсутствие электрического питания.

Описание работы криоадсорбционного насоса приведено в [5].

Контроль вакуума внутри вакуумной камеры осуществляется с помощью широкодиапазонного вакуумметра типа WRG Edwards, работающего совместно с контроллером TIC, контроль вакуума криоадсорбционного насоса – с помощью широкодиапазонного вакуумметра типа MicroIon Plus.

Вакуумногидравлическая схема стенда показана на рис. 5, где обозначены: P1, P2, P3 – вакуумметры; VП1 – вакуумный клапан с ручным приводом; NL – форвакуумный насос; NC – криоадсорбционный насос; KF25 – присоединительный фланец; Азот – выход газообразного азота.

Контрольно-измерительная часть стенда позволяет проводить:

– измерения температуры составных частей ФПУ и вакуумной камеры с применением термометров сопротивления ТМ293-02 и термоэлектрических термометров типа хромель–алюмель;

– измерения давления внутри вакуумной камеры с применением вакуумметров WRG-S Edwards;

– измерение температуры, влажности и давления атмосферного воздуха с применением ТКА-ПКМ и барометра БРС-1М.

– измерения расхода испарившегося газа из криостатов с применением барабанных счетчиков газа Ritter TG3 и TG5;

– измерения спектра масс газовой среды внутри вакуумной камеры с помощью масс-спектрометра Extorr100.

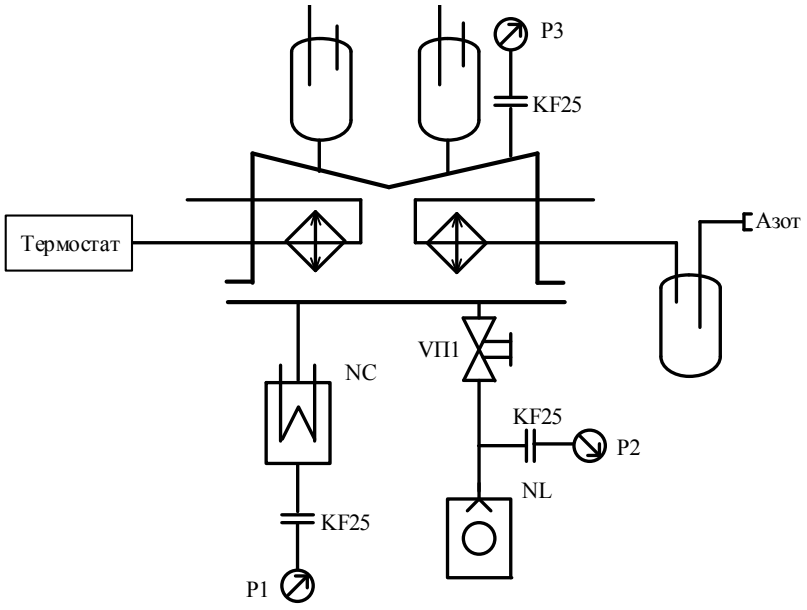

Рис. 5

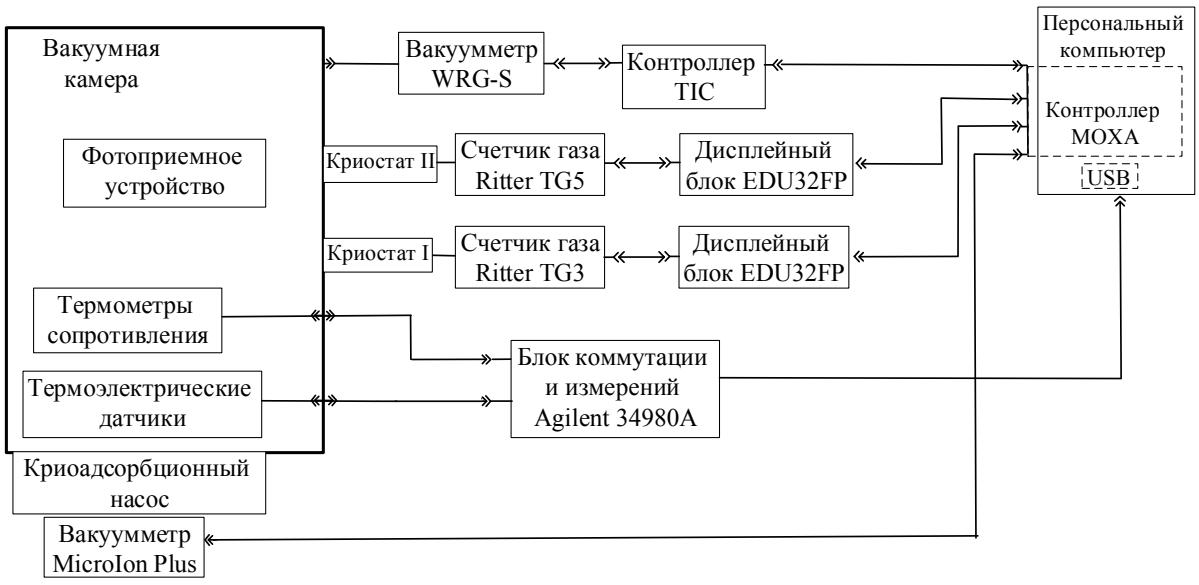

Рис. 6

Таблица 1

Наименование средства измерения	Характеристики средства измерения
Газовый счетчик TG3	Расход: 6…360 л/ч Погрешность измерений: ±0.2 л/ч
Газовый счетчик TG5	Расход: 10…600 л/ч Погрешность измерений: ±0.5 л/ч
Блок коммутации и измерения Agilent 34980A	Минимальный диапазон измеряемых постоянных напряжений от 0 до 100 мВ с шагом 3 мВ Минимальный диапазон измеряемых сопротивлений от 0 до 100 Ом с шагом 3 мОм
Масс-спектрометр Extorr 100XT	от 1 до 100 а.е.м, погрешность 15 %
Вакуумметр WRG-S	от 10^{-7} до 10^{5} Па, погрешность не более 15 %
Вакуумметр Micro-Ion Plus 356	от 10^{-7} до 10^{5} Па, погрешность не более 15 %
ТКА-ПКМ	Диапазон измерений: от 15 до 25°С Погрешность измерений: ±2 °С
Барометр БРС-1М	Диапазон измерений: от 600 до 1100 ГПа Погрешность измерений: ±33 Па
Термометр сопротивления ТМ293-02	Диапазон измерений: от –196 до 200 °С Погрешность измерений: ±0.1 °С
Термоэлектрический датчик, тип Т	Диапазон измерений: от –200 до 400 °С Погрешность измерений: ±0.5 °С

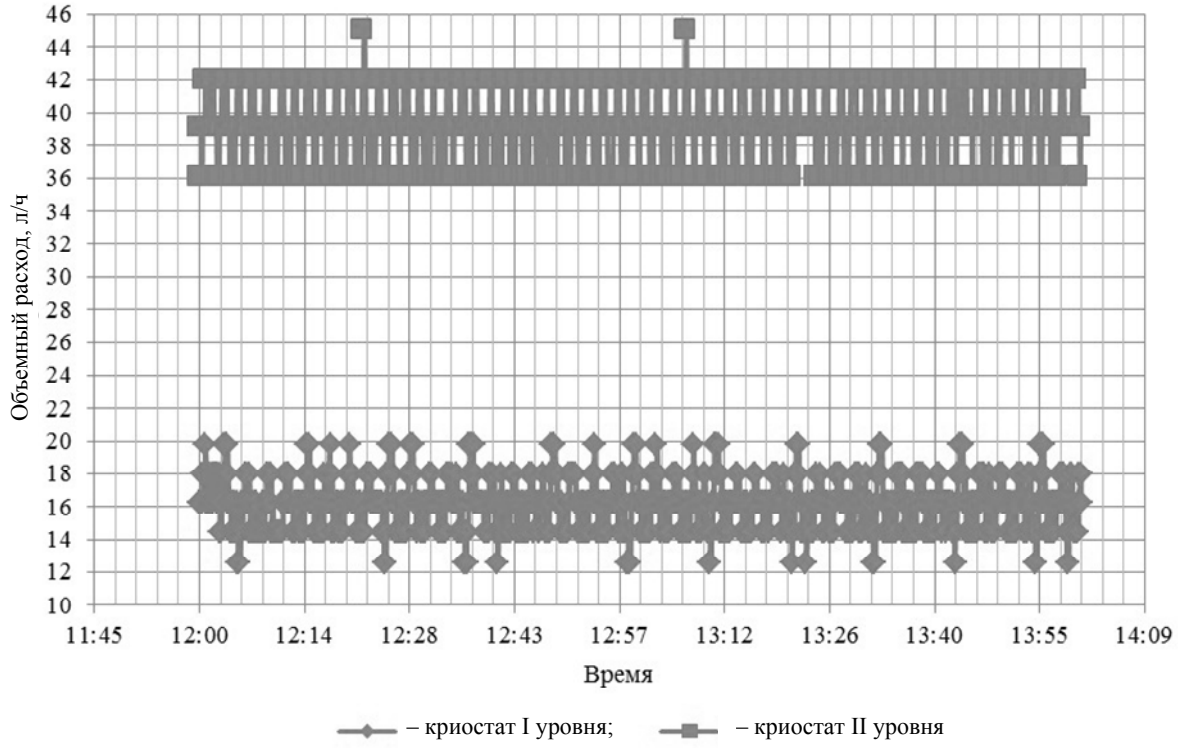

Рис. 7

Данные с указанных приборов передаются на персональный компьютер и записываются в его память. Электрическая схема соединений термовакуумного стенда показана на рис. 6. Основные параметры контрольно-измерительных приборов приведены в табл. 1.

Теплоприток от ФПУ определяется по расходу испарившегося газообразного азота из криостатов при заданной температуре. Для уменьшения влияния окружающей среды на измеряемый теплоприток криостаты имеют два объема, заполняемых жидким азотом, один из которых – охранный, другой – основной.

Результаты измерения расхода газа криостатов I и II уровней приведены на рис. 7.

Современные ФПУ, используемые в космических аппаратах, представляют собой сложные конструкции с теплоизоляцией, тепловыми развязками, конструктивными теплопередающими, оптическими и электрическими элементами. Определение тепловых параметров ФПУ с использованием рассматриваемого стенда позволяет

оценивать качество выполнения сборочно-монтажных работ при изготовлении ФПУ и уровень проработки технологии этих работ при проектировании технологических процессов.

Разработанный стенд для исследования теплового режима крупноформатных ФПУ космического применения различных типов в условиях имитации штатных условий эксплуатации бортовой аппаратуры в части вакуумных и температурных воздействий позволяет определять температуры в заданных точках конструкции ФПУ, теплоприток от ФПУ, спектр масс газов внутри вакуумной камеры стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. М.: Физматкнига, 2012.

2. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / СПбГУАП. СПб., 2002.

3. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры / ЛО «Энергия». Л., 1971.

4. Стенд для проведения термовакуумных испытаний крупноформатных фотоприемных устройств космического применения / Б. Н. Дражников, Я. С. Бычковский, И. С. Кондюшин, К. В. Козлов // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 3. С. 386–389.

5. Розанов Л. Н. Вакуумное технологическое оборудование: учеб. пособие. СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2012.

A. N. Sokolov, M. Z. Schedrinsky, K. V. Rybas, M. G. Vorobev, V. A. Sinkova, A. I. Koldyba
Branch of JSC «Corporation „Kometa“»

L. N. Rozanov, M. P. Larin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

TEST BENCH TO STUDY THERMAL MODES OF PHOTODETECTORS IN AEROSPACE APPLICATIONS

One of the main goal while designing criostatting and thermal control systems of spacecraft is to determine the heat flow from photodetectors. The article describes a thermal vacuum bench for studying the thermal modes of photodetectors. Parameters of the used measuring devices, electrical circuit of connections and vacuum circuit of bench are represented. Thermal vacuum bench allows to experimentally simulate various thermal mode of large-format photodetector of various types for aerospace applications under simulated standard operating conditions of on-board equipment in terms of vacuum and temperature impacts. Thermal vacuum bench allows to determine temperatures at specified points of the photodetector design in the range from 85 to 350 K, heat loads from the photosensitive element and the case of the photodetector, taking into account the influence design of the optical system, pressure and spectrum of gas masses inside the vacuum chamber of the bench in real time.

Thermal vacuum bench, thermal modes, photodetector