

Ultra-violet photodetectors based on GaN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ epitaxial layers

N. M. Schmidt, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, A. S. Usikov,
E. E. Zavarin

Ioffe Physico-Technical Institute, St.-Petersburg, Russia

A. V. Govorkov, A. Ya. Polyakov, N. B. Smirnov

State Institute of Rare Metals (GIREDMET), Moscow, Russia

MSM photodetectors and Schottky barrier photodetectors over spectral range 200–365 nm with characteristics close to those of the best foreign analogs, in particular, leakage current density of about 10^{-8} A/cm², have been obtained using domestic GaN grown by MOCVD on sapphire substrates of (0001) orientation. The characteristics of $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ Schottky barrier photodetectors have been given. The effect of epilayer structural peculiarities on electro-physical properties of the epilayers and on parameters of the UV photodetectors has been investigated. Random distribution of charged centers, which is associated with domain boundaries of the mosaic structure being typical of III-nitrides, has been shown to result in a low Schottky barrier height, a high leakage current, and persistent photoconductivity in undoped GaN. The introduction of low Si concentration minimizes the effect as well as allows the Schottky barrier height to be obtained close to the difference between work functions of GaN and metal.

УДК 621.565-181.4

Некоторые результаты разработки ряда модульных МКС Сплит-Стирлинг

М. В. Липин, А. В. Громов

ООО НТК "Криогенная техника", Омск, Россия

Представлены результаты разработки ряда модульных микрокриогенных систем (МКС) Сплит-Стирлинг, предназначенных для комплектации тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания всех родов войск и коммерческого применения. Описаны три конструктивных варианта МКС. Разработанные МКС позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) различного типа на температурном уровне (75–80) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,5 Вт. МКС 1-го класса предназначена для работы с тепловыми нагрузками 0,8–2,5 Вт, 2-го класса — 0,4–0,9 Вт, 3-го класса — 0,3–0,5 Вт. Приведены результаты исследований и испытаний МКС в различных условиях.

Более чем за 40 лет существования ОАО "Сибкриотехника", дочерним предприятием которого является ООО НТК "Криогенная техника", создана и постоянно совершенствуется методика расчета и проектирования ГKM Стирлинга, подобраны материалы и конструктивные решения, обеспечившие работоспособность интегральных ГKM Стирлинга до 5000 ч средней наработки до отказа. Изготовленные МКС подтвердили свою высокую надежность при

использовании в космических аппаратах серий "Космос", "Салют", "Метеор-3", "Ресурс-01", "Фобос". Однако развитие фотоэлектроники и тепловизионных приборов побуждает к дальнейшим работам по совершенствованию конструкции МКС Стирлинга, в том числе по созданию МКС Сплит-Стирлинг, в которых компрессор и охладитель отнесены на некоторое расстояние друг от друга.

По заказу МО России нашим предприятием ведутся разработка и освоение в серийном производстве унифицированных модульных МКС для комплектов модулей 1—3-го классов. В рамках ОКР разрабатываются конструкции трех классов базовых микрокриогенных систем (МКС) Сплит-Стирлинг с линейным приводом, предназначенных для криостатирования многоэлементных фотоприемников (ФП) перспективных модульных тепловизионных приборов (ТВП) нового поколения, создаваемых в Федеральной комплексно-целевой программе развития систем тепловидения и приборов ночного видения.

Разрабатываемые МКС имеют характеристики на уровне самых современных зарубежных аналогов по военным стандартам стран НАТО и предназначены для комплектации тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания всех родов войск и коммерческого применения.

Внешний вид ГКМ показан на рис. 1.

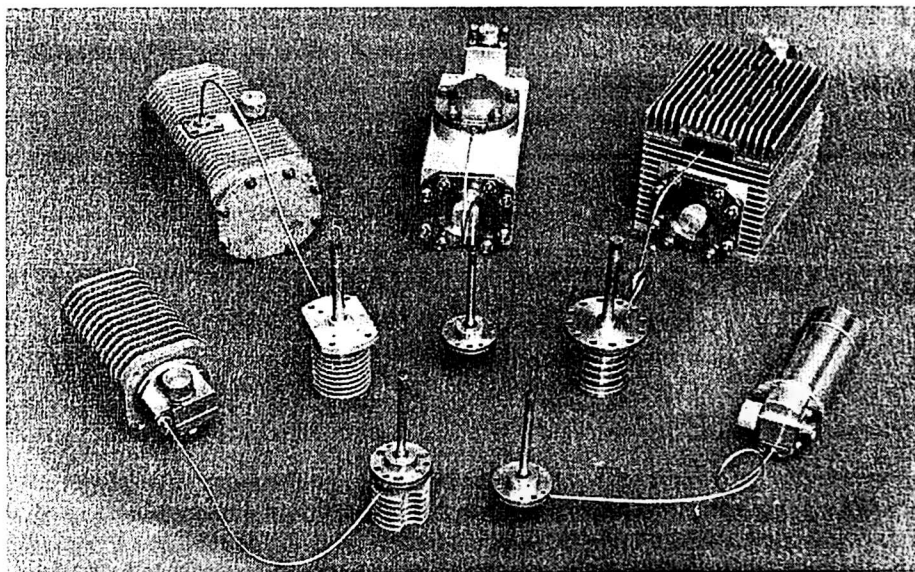


Рис. 1. ГКМ Сплит-Стирлинг

Важнейшие характеристики разрабатываемых МКС (в наиболее жестких условиях эксплуатации) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	Модули МКС			
	1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс
Диаметр/длина колодца ФП, мм	9/72,5	6/71	6/71	6/71
Максимальная тепловая нагрузка от ФП при температуре (80 ± 2) К, Вт	1,3	0,75	0,4	0,3
Приведенная к температуре криостатирования суммарная масса ФП, г, не более	10	7	4	3,5

Окончание табл. 1

Показатели	Модули МКС			
	1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс
Время выхода на рабочий режим, мин, не более	5	5	5	10
Потребляемая мощность, Вт, не более:				
	в пусковом режиме	120	100	45
в рабочем режиме	70	50	20	8
Питание от сети постоянного тока, В	27 ⁺² ₋₃	27 ⁺² ₋₃	12 ₋₂	12 ₋₂
Температура окружающей среды, °С		От -50 до +50		
Средняя наработка на отказ, ч	10000	10000	10000	3000
Масса ГКМ, кг, не более	4	2	1,25	0,8

Разработанные МКС позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) различного типа на температурном уровне (75÷80) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,5 Вт. МКС 1-го класса предназначена для работы с тепловыми нагрузками 0,8—2,5 Вт, 2-го класса — 0,4—0,9 Вт, 3-го класса — 0,3—0,5 Вт.

Предъявляемые к МКС требования имеют исключительно жесткий характер [1]. Превышение требуемого КПД для наших МКС по сравнению с зарубежными вызвано в первую очередь несовершенством отечественных ФП, теплоприток которых более чем в 2,5 раза превышает достигнутый зарубежный уровень (например, для 3-го класса — при повышенной температуре окружающей среды 0,4 Вт — для отечественных ФП, и 0,15 Вт — для зарубежных).

Как видно из табл. 2, допускаемые нормативы энергопотребления в рабочем режиме для зарубежных МКС 3-го класса в 1,75 раз выше, чем для отечественных.

Таблица 2

Показатели	Модели микроохладителей			
	Стандарт SADA III	Magnavox MX 7050	MСМГ-1,5А-0,4/80	
Холодопроизводительность в рабочем режиме $Q_{\text{ст}}$, Вт, не менее (при 80 К):				
	при +71 °С	0,20	0,20	—
	при +50 °С	—	—	0,4
при +23 °С	0,35	0,35	—	
Время выхода на режим, $\tau_{\text{вых}}$, мин, не более (до 80 К):				
	при +71 °С	10*	10*	—
	при +50 °С	—	—	5**
при +23 °С	10*	8,5*	—	
Максимальная потребляемая мощность в пуске, $N_{\text{пуск}}$, Вт	35	35	45	
Потребляемая мощность, $N_{\text{потр}}$, Вт, не более:				
	при + 71 °С	35	35	—
	при + 50 °С	—	—	20
при + 23 °С	30	30	—	
Интервал рабочих температур, °С	-54÷+71	-54÷+71	-50÷+50	
Длина трубки, мм	≤305	153	250	
Масса ГКМ, кг, не более	1,0	1,135	1,25	

* Охлаждаемая масса эквивалента 3,4 г меди (~250 Дж).

** Охлаждаемая масса эквивалента 4,0 г меди (~300 Дж).

На изготовленных экспериментальных образцах МКС выполнена проверка на соответствие требованиям ТЗ, в настоящее время проводится цикл работ по отработке электромагнитной совместимости с ФП и фотоприемными устройствами.

Конструктивное устройство разработанных МКС примерно одинаково.

МКС состоит из газовой криогенной машины (ГКМ) и блока управления (БУ), управляющего линейным электроприводом (ЛЭП). Внешний вид ГКМ 1-го класса показан на рис. 2, внешний вид и конструктивное устройство ГКМ 3-го класса — на рис. 3, 4.

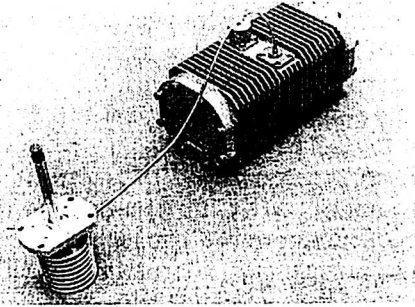


Рис. 2. ГКМ 1-го класса

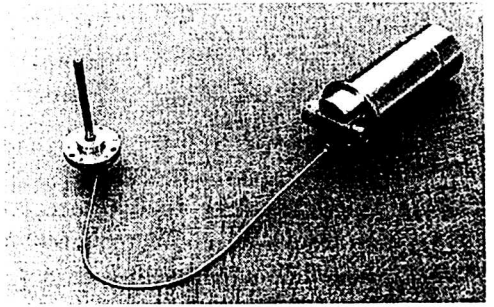


Рис. 3. ГКМ 3-го класса

ГКМ работает по обратному циклу Стирлинга с использованием постоянного количества криоагента (гелия) и состоит из компрессора и охладителя, соединенных трубопроводом, позволяющим изменять ориентацию охладителя относительно компрессора, снизить вибро- и электромагнитные воздействия на компрессор. Допустимые размеры гильзы охладителя являются основным конструктивным параметром, влияющим на термодинамические характеристики МКС.

Из возможных схем стыковки с ФП предпочтение отдано схеме с устройством демпфирующим теплопередающим (УДТ) на головке гильзы и жесткой затяжкой фланцев охладителя и ФП. Вытеснитель со встроенным регенератором делит рабочий объем гильзы охладителя на криогенную и теплую зоны. Вытеснитель приводится в движение перепадом давления газа по регенератору и штоку, совмещенному с корпусом вытеснителя, и перемещается в гильзе с частотой компрессорного поршня, но со сдвигом фаз относительно него, приемлемым для осуществления обратного цикла Стирлинга. Для предотвращения ударов вытеснителя в крайних положениях в конструкции охладителя используются пружины растяжения—сжатия.

Компрессор имеет два линейных электродвигателя (ЛД), каждый из которых состоит из статора с двумя катушками и якоря с двумя рядами магнитов. Якори двигателей соединены со штоками с насаженными втулками поршней, на которых нанесено антрифрикционное покрытие, и осуществляют синхронное оппозитное перемещение в цилиндре, что позволяет полностью уравновесить компрессор.

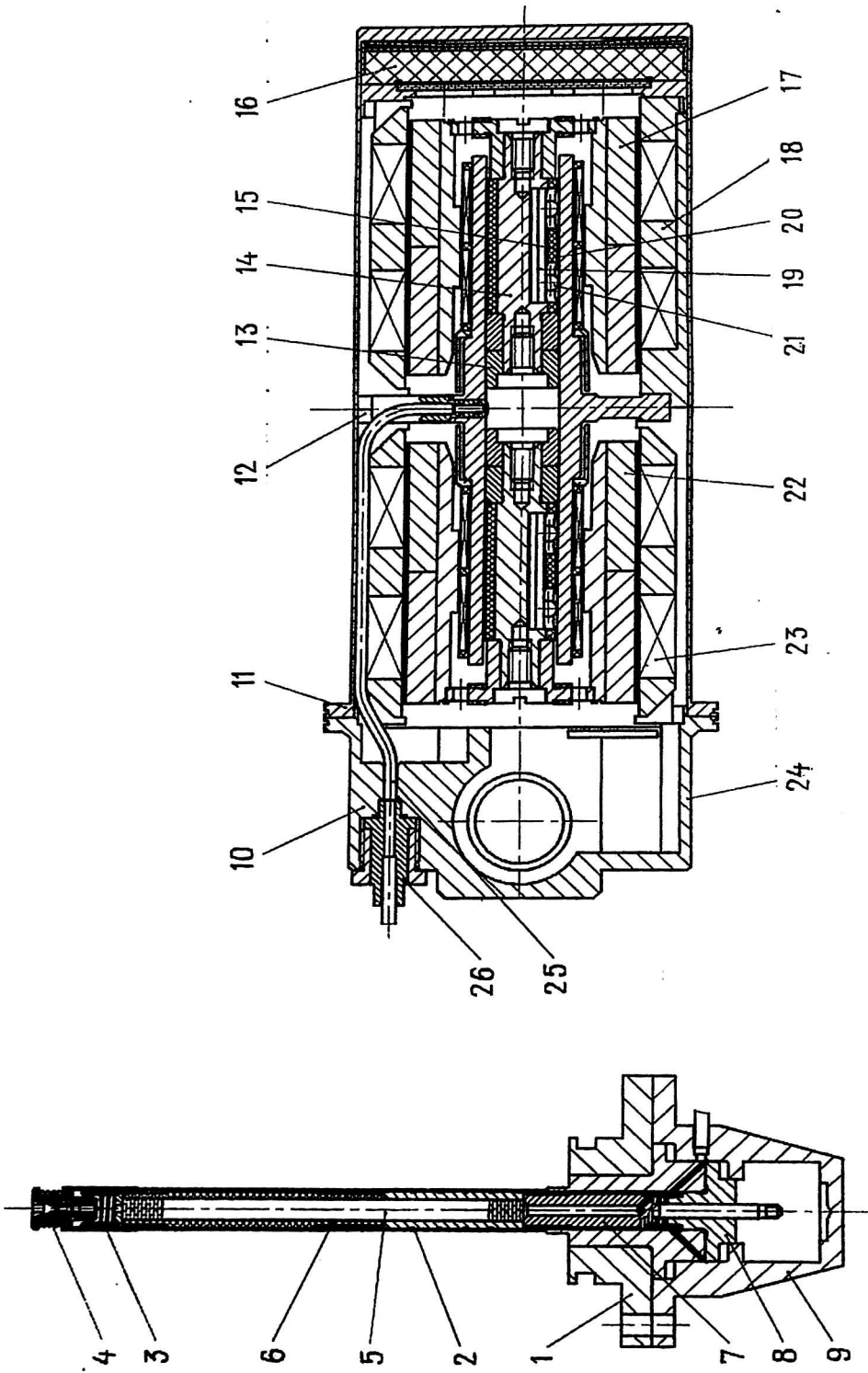


Рис. 4. Машина криогенная газовая:

- 1 — охладитель; 2 — гильза; 3 — головка гильзы; 4 — устройство демпфирующее теплопередающее; 5 — регенератор; 6 — трубка вытеснителя; 7 — корпус вытеснителя со штоком; 8 — втулка; 9 — корпус охладителя; 10 — компрессор; 11 — корпус; 12 — цилиндр; 13 — поршневая втулка; 14 — шток; 15 — планка; 16 — якорь; 17 — адсорбер; 18 — статор; 19 — пружина; 20 — сепаратор; 21 — шарик; 22 — магнит; 23 — катушка; 24 — корпус; 25 — трубопровод; 26 — ниппель

На боковой поверхности штока выполнены продольные дорожки качения, в которые установлены шарики. Положение шариков в дорожке качения фиксируется сепаратором, выполненным из твердосмазочного материала. Шарики жестко фиксируют поршень в радиальном направлении и имеют минимальные потери на трение при продольном перемещении поршня в цилиндре. Это позволяет выполнить зазор в щелевом уплотнении поршня до 5 мкм, а зазор между статором и якорем — до 0,2 мм, что существенно повышает экономичность компрессора.

Крепление компрессора МКС 1-го класса в аппаратуре должно осуществляться за его торцевые поверхности. Отвод тепла от работающего компрессора происходит теплопроводностью через места крепления и естественной конвекцией от оребренных поверхностей.

Крепление компрессора МКС 2-го и 3-го классов в аппаратуре должно осуществляться за цилиндрическую поверхность корпуса с одновременным отводом выделяемого тепла. Массогабаритные характеристики компрессора улучшены за счет того, что тонкостенный корпус компрессора соединен неразъемно (сваркой) с корпусной деталью, замыкающей герметично газовый объем ГKM. Излучающиеся при работе ЛД магнитные поля замыкаются на корпус.

Полученные при испытаниях типовые характеристики МКС 1—3-го классов приведены на рис. 5, там же для сравнения приведены характеристики нескольких зарубежных МКС [2—4].

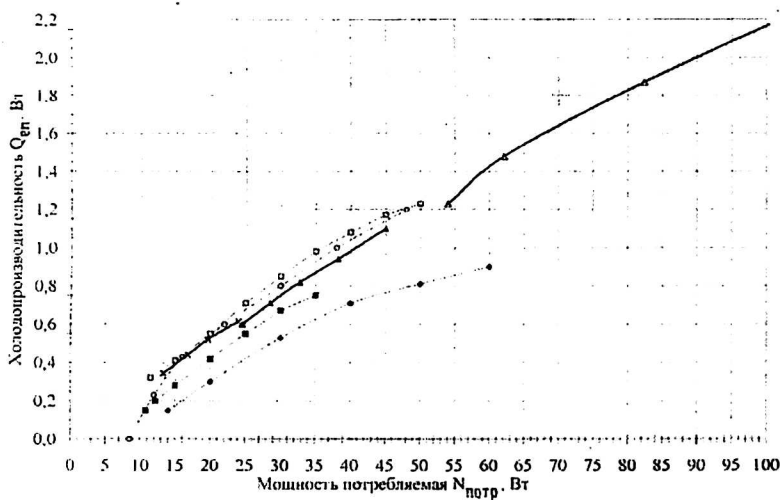


Рис. 5. Характеристики зарубежных и отечественных МКС Слит-Стирлинг при $T_{\text{ос}} = +23^\circ\text{C}$:

- △— МКС 1-го класса; —▲— МКС 2-го класса; —×— МКС 3-го класса;
- Magnavox-MX7055; —○— Hughes 7050H; —◆— Philips UA 7041;
- Magnavox-MX7050

Разработанные МКС предполагается применять в основном для криостатирования ФП с фоточувствительными элементами на основе HgCdTe . Однако в настоящее время прорабатывается возможность расширения сферы применения МКС. Так, для МКС 1-го класса вполне реальной является возможность криостатирования ФП с эффектом квантовых размерных ям

(КВИПов), МКС обеспечивает холодопроизводительность около 1 Вт на температурном уровне 55 К.

Определена идеология построения матричного ТВП с малым энергопотреблением и использованием МКС Сплит-Стирлинг и ФП интегрального типа, где матрицу предлагается монтировать непосредственно на холодной головке гильзы ГКМ. В этом случае энергопотребление МКС возможно снизить до уровня примерно 8 Вт. Результаты работ позволяют говорить о реальности создания на основе матричных модулей (PtSi) и ГКМ Стирлинга ряда тепловизионных приборов в интересах МО России, в том числе тепловизионного прибора наблюдения (бинокля) и тепловизионных прицелов для РГ и ПЗРК. Криогенные характеристики МКС с интегральной стыковкой с ФП, экспериментально полученные в последнее время, приведены на рис. 6.

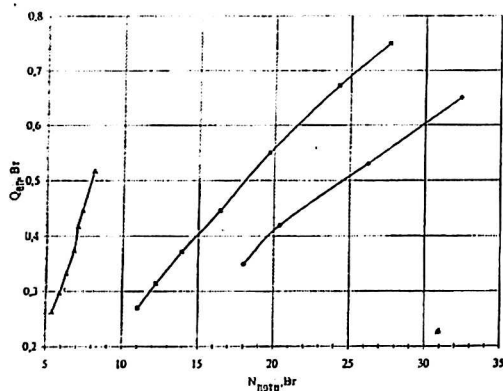


Рис. 6. Зависимость холодопроизводительности Q_{en} от потребляемой мощности $N_{\text{потр}}$ для МКС 3-го и 4-го классов:

◆ — МКС 3-го класса; ■ — МКС Сплит-Стирлинг с интегральной стыковкой; ▲ — микроГКМ с интегральной стыковкой

Таким образом, разработанные опытные и экспериментальные образцы МКС Стирлинга по техническим характеристикам соответствуют современным зарубежным аналогам. Работы по экспериментальному подтверждению их показателей надежности продолжаются.

Л и т е р а т у р а

1. Липин М. В., Бабий Л. А. Сравнение конструкции и термодинамических характеристик зарубежных МКС класса SADA III и отечественных МКС 3-го класса, разрабатываемых в ОКР "Оператор-Ф"//Криогенное и холодильное оборудование и технологии. — г. Омск. 1999. Ч. 2. С. 85—98.
2. de Jonge A. K., Helmonds H. J. Development of long-life multi-purpose cryocoolers in the range of 50 to 150 K, with related experiments//Proceedings of the 12-th International Cryogenic Engineering Conference, 1988. P. 549—554.
3. Keung C. S., Narayan R. Compact, dual-piston Stirling cryocoolers for IR imaging systems//SPIE. 1990. V. 2224. P. 180—188.
4. Berry R. Linear Motor Driven Stirling Coolers for Military and Commercial Application//Proc. 27th Intersoc. Energy Couvers. Eng. Conf. Technol. Energy Effie 21st Century. San Diego, Calif, Aug., 3—7, 1992, IETEC-92. V. 5.-Warrendale (Pa). P. 149—154.

Some results of development of the series of Split-Stirling modular microcryogenic systems

M. V. Lipin, A. V. Gromov
NTK "Kriogennaya Tekhnika Ltd.", Omsk, Russia

The results of development of the series of Split-Stirling modular microcryogenic systems (MCSs) intended for use in the thermal image viewing and sighting devices of all fighting arms and commercial application are presented. The three structural variants of the MCSs are described. The developed MCSs allow cryostatting photo-sensitive cells (PSCs) of the different-type photo-detector divices (FDDs) on the temperature level of (75 to 80) K at the MCS heat load of 0,3 to 2,5 W. The 1 st class MCS is intended for use with heat loads of 0,8 to 2,5 W; the 2 nd class MCS - with those of 0,4 to 0,9 W and the 3 rd - for the rang of 0,3 to 0,5 W. The results of the MCS investigating and testing in different conditions are given.