

УДК 621.383.292.017.7

Состояние работ и перспективы развития термоэлектрического охлаждения для фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения

Г. А. Аракелов

Государственный научный центр Российской Федерации ГУП «НПО «Орион»»,
Москва, Россия

Технический уровень фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения (ФЭПП) с термоэлектрическими охладителями (ТЭО) в основном определяется двумя факторами: добротностью Z применяемых термоэлектрических материалов (ТЭМ) и степенью конструкторско-технологического совершенства как ТЭО в отдельности, так и ФЭПП в целом. Исследования сверхрешеток с квантовыми ямами позволили реализовать Z в три-четыре раза больше, чем у известных ТЭМ на базе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 . В плане конструкторско-технологической оптимизации рассматриваемых изделий предпочтение завоевали многоплощадочные вакуумные ФЭПП на базе многокаскадных микроминиатюрных ТЭО.

В аппаратуре, работающей в средневолновом ИК-диапазоне, включающем в себя атмосферное окно 3–5 мкм, в котором сосредоточена весомая доля слабо нагретых тел, с успехом используются ФЭПП, охлаждаемые специальными микрохолодильниками. В то же время известно, что специфической особенностью миниатюрных рефрижераторов, работающих по циклам Джоуля–Томсона, Клода, Стирлинга и др., является так называемый “масштабный” фактор, т. е. сильная зависимость их термодинамического КПД ($\eta_{\text{тд}}$) от приведенной холодопроизводительности ($Q_{\text{пр}}$). При $Q_{\text{пр}} < 1$ Вт $\eta_{\text{тд}}$ таких холодильных систем резко падает, что приводит к невозможности

создания высокоэффективных малогабаритных охлаждающих устройств, работающих на указанных принципах. Недостатками механических рефрижераторов являются сложность конструкции, наличие подвижных частей, сравнительно низкий ресурс, необходимость проведения профилактических ремонтных работ.

Одновременно существует отдельный класс микроминиатюрных охладителей — ТЭО, в которых холод генерируется за счет изменения энергетического состояния “электронного газа” при прохождении тока через специальные полупроводниковые структуры. Перспективность применения ТЭО в ФЭПП обуславливается уникальным набором принципиальных технических преимуществ перед любыми другими разновидностями холодильной техники, а именно: отсутствие масштабного фактора, малые габаритные размеры, масса, энергопотребление и время выхода на режим, простота конструкции, высокая надежность, бесшумность при эксплуатации, практически неограниченный ресурс, отсутствие микрофонного эффекта, независимость от ориентации в пространстве и т. д. В связи с этим в настоящее время особую популярность приобрело новое поколение ФЭПП с ТЭО [1].

Технический уровень ФЭПП с ТЭО в основном определяется двумя факторами: термоэлектрической добротностью Z применяемых ТЭМ и степенью конструкторско-технологической оптимизации как ТЭО в отдельности, так и ФЭПП в целом. Касаясь первого фактора, можно отметить, что все современное термоэлектрическое приборостроение базируется на применении ТЭМ на основе халькогенидов висмута и сурьмы Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 со значением термоэлектрической добротности $Z = (2,8-3,1) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Критически осмысливая сложившееся положение, можно зафиксировать, что за последние 20 лет отсутствует какой-либо существенный прогресс по уровню Z у этих полупроводниковых материалов. Более того, многие современные теоретические и экспериментальные исследования вышеуказанных ТЭМ показывают, что их возможности в рассматриваемом аспекте практически исчерпаны. Тем не менее систематические поиски новых типов ТЭМ принесли свои положительные результаты. В частности, как это указано в [2], наибольшие успехи сопутствовали исследованиям сверхрешеток с квантовыми ямами. Здесь понятие “квантовая яма” используется для обозначения области ТЭМ, в которой средняя потенциальная энергия носителей заряда ниже, чем вне ее. Создавая чередование квантовых ям (например путем послойного напыления материалов), можно образовать некую периодическую структуру, в которой наблюдается существенное возрастание Z .

В лабораториях многих зарубежных стран успешно воспроизводятся такие ТЭМ различного химического состава со значением $Z \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [2]. В октябре 2001 г. зарегистрирован патент США на устройство и материал с резко увеличенной термоэлектрической добротностью [3]. Прогнозируется, что в обозримом будущем будут достигнуты рекордные значения $Z = (11-13) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [2]. Такие ТЭМ по вполне понятным научно-техническим и организационным причинам не скоро выйдут на промышленный уровень, тем не менее они знаменуют огромный успех в области термоэлектрического материаловедения, что в целом открывает широкие перспективы для нового качественного прорыва техники термоэлектрического приборостроения. Применительно к ФЭПП с ТЭО это означает, что если, к примеру, при температуре 300 К цоколя ФЭПП, тепловом сопротивлении 3 К/Вт теплосбрасывающего радиатора (естественно-конвекционное охлаждение) и мощности 6 Вт энергопотребления ТЭО 48-площадочный фоточувствительный элемент (ФЧЭ) с пло-

щадью подложки $5 \times 11 \text{ мм}^2$ охлаждается до температуры порядка 200 К, то в случае применения новых ТЭМ с $Z = 13 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при прочих равных условиях удалось бы реализовать охлаждение на уровне 140—150 К.

Одновременно с усовершенствованием ТЭМ разработчики ТЭО самое серьезное внимание уделяют конструкторским и технологическим аспектам проектирования, видя в них реальный резерв для дальнейшей оптимизации теплотехнических и энергомассовых характеристик рассматриваемых изделий на основе комплексного учета специфических особенностей их эксплуатации в составе ИК-аппаратуры.

Основные технические требования к ТЭО, встраиваемым в ФЭПП, вытекают из необходимости обеспечения:

максимально возможных перепадов температур в условиях жестких ограничений по массогабаритным характеристикам ТЭО и возможности по сбросу тепла;

хорошей функциональной совместимости ТЭО и установленных на его теплопоглощающей поверхности ФЧЭ;

работоспособности в любом пространственном положении;

электрических и теплотехнических параметров ТЭО в течение времени минимальной наработки (10 000 ч) в пределах времени, равного минимальному сроку сохраняемости (15 лет) при одновременном воздействии повышенных механических перегрузок (вплоть до 1500 g).

Следует отметить, что вышеуказанные требования к конструкциям ТЭО, как и соответствующие технические мероприятия по их реализации, являются взаимосвязанными, что можно проиллюстрировать следующими примерами.

Задача обеспечения максимально возможных перепадов температур в условиях жестких ограничений массогабаритных характеристик и возможностей по сбросу тепла наиболее кардинальным способом решается путем применения вакуумной теплоизоляции в качестве рабочей среды ФЭПП, что обеспечивает существенное снижение так называемых “паразитных” тепловых потоков к ТЭО и, соответственно, уменьшение значений его потребной холодопроизводительности. Последнее, в свою очередь, позволяет реализовать минимальную потребляемую мощность ТЭО. При этом оптимизируется весьма важное достоинство ТЭО, а именно, возможность его микроминиатюризации без ухудшения энергетических, температурных и других характеристик. Ввиду отсутствия конвективных тепловых потоков использование вакуумной теплоизоляции целесообразно и для обеспечения стабильности и работоспособности ФЭПП с ТЭО в любом пространственном положении. Таким образом, в случае необходимости с помощью многокаскадного ТЭО реализовать повышенные перепад температур (более 90 К) и надежность изделия применение вакуумной теплоизоляции является безальтернативным. В свою очередь этот фактор определяет многие конструктивные и технологические особенности ТЭО, в том числе спектр основных и вспомогательных материалов, методов обезгаживания и т. д.

На рис. 1 представлен универсальный модуль охлаждения (МО) на базе ТЭО, который фактически является полуфабрикатом ФЭПП. Такой модуль наиболее удобен для потребителя, который, имея тот или иной ФЧЭ и герметизирующую крышку с оптическим входным окном, может самостоятельно и оперативно сформировать необходимый ему ФЭПП. МО состоит из многокаскадного ТЭО 2, цоколя 5, токовыводной системы 4 и термодатчика 3. В комплект МО может также входить гетерный узел 1, газопоглотитель которого обеспечивает многократное активирование в процессе хранения и эксплуатации ФЭПП.

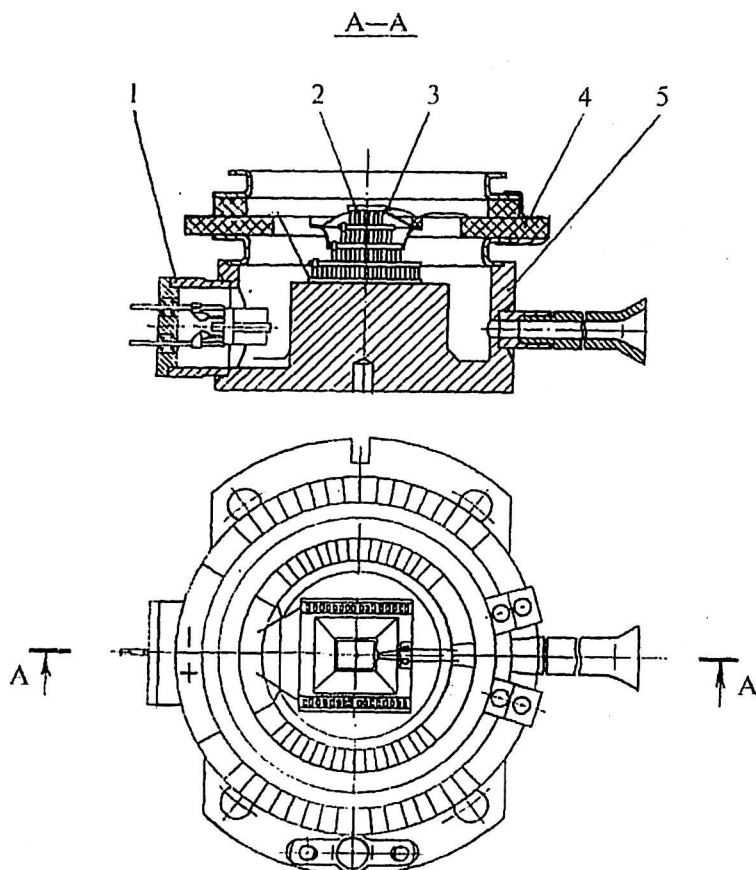


Рис. 1. Общий вид МО ФЭПП

Наиболее важной составной частью МО ФЭПП, определяющей его электрические, теплотехнические и эксплуатационные характеристики, является многокаскадный ТЭО.

Из специфики эксплуатации ФЭПП следует, что из всех возможных режимов работы ТЭО наиболее благоприятным является режим максимальной энергетической эффективности ($\epsilon_{\text{макс}} = Q/P$, где ϵ , Q , P — холодильный коэффициент, холодопроизводительность и потребляемая мощность, соответственно), который характеризуется наименьшими затратами мощности для генерирования заданного количества холода. Режим $\epsilon_{\text{макс}}$ является предпочтительным также в том смысле, что его реализация наиболее эффективно обеспечивает согласование потребляемой мощности ТЭО с ограниченными возможностями рассеяния тепла в реальной ИК-аппаратуре.

Решение проблемы теплосброса связано также с созданием слаботочного ($I < 2$ А) ТЭО, в котором можно свести к минимуму дополнительные тепловыделения на токоведущих проводниках ТЭО и за счет несовершенства электрических коммутаций ветвей термоэлементов. При этом одновременно обеспечивается хорошая функциональная совместимость ТЭО с источником питания ИК-аппаратуры, так как питание слаботочного ТЭО осуществляется при относительно повышенном значении падения напряжения, соответствующем или приближающемся к нормальному ряду.

Рассмотренные концептуальные направления разработки определяют общую архитектуру многокаскадного ТЭО (рис. 2). В первую очередь необходимо определить наиболее оптимальный вариант электропитания ТЭО.

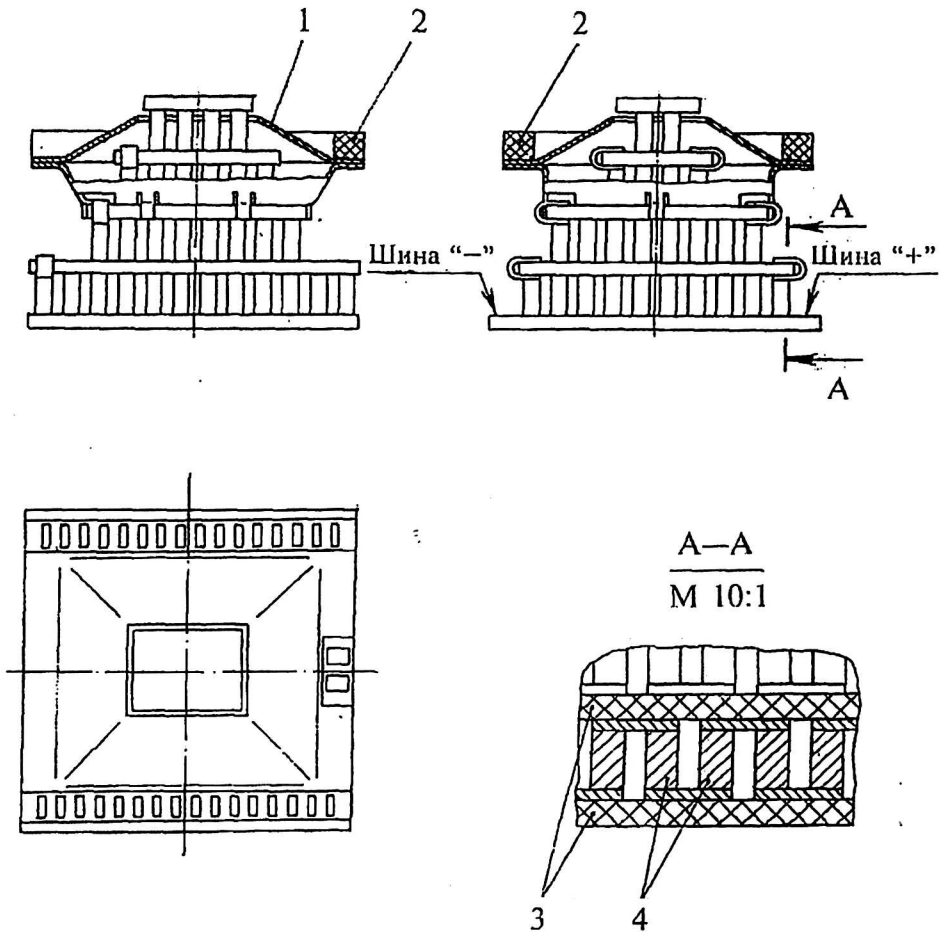


Рис. 2. Конструкция четырехкаскадного ТЭО

На практике используются, как правило, параллельный и последовательный способы питания термоэлементов каскадов ТЭО. В первом случае термоэлементы соседних каскадов включаются параллельно между собой, причем термоэлементы верхнего каскада непосредственно припаиваются к коммутационным пластинам нижнего. Основное преимущество такого способа питания по сравнению с последовательным — отсутствие межкаскадных теплопереходов. К недостаткам параллельного электропитания можно отнести:

различные значения токов в пределах каждого каскада (ток крайних ветвей больше тока внутренних);

сравнительно большой по величине ток и малое падение напряжения питания;

различные размеры крайних и внутренних ветвей;

трудности унификации и необходимость проектирования и изготовления ТЭО в каждом отдельном случае.

Кроме того, ТЭО с числом каскадов более двух и параллельным способом питания более энергоемок по сравнению с аналогичным ТЭО с последовательным способом питания [4].

ТЭО с последовательным электропитанием ветвей термоэлементов свободен от этих недостатков и поэтому предпочтителен.

На рис. 2 в качестве примера представлен четырехкаскадный ТЭО с последовательным способом питания термоэлементов, отличительной чертой которого является интегральное его исполнение, когда сборка ветвей термоэлементов 3 и теплопереходов 1 в изделие обеспечивается в рамках единого технологического процесса. В целях минимизации паразитных перепадов на теплопереходах они являются едиными, т. е. общими между двумя соседними каскадами. Межкаскадные теплопереходы имеют на каждой своей стороне отдельные рисунки коммутации ветвей термоэлементов, строго ориентированные друг на друга.

В многокаскадных микроминиатюрных ТЭО весьма важную роль играет технология ветвей термоэлементов, которая должна обеспечивать минимальное электрическое сопротивление переходных контактов, роль которого с уменьшением длины ветвей и понижением температуры все более возрастает и становится определяющей. Расчеты показывают, что в многокаскадных ТЭО величина этого параметра не должна превышать $5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

Необходимо отметить, что минимальное электрическое сопротивление спаев — не единственное требование, предъявляемое к способам и материалам для коммутации ветвей термоэлементов. Они должны обеспечивать как механическую прочность при воздействии циклических вибрационных, ударных и температурных нагрузок, так и стабильность электрических и теплотехнических параметров ТЭО в течение длительного времени. Во многом успешная реализация этого комплекса требований определяется тем, насколько эффективно удастся решить проблему по исключению диффузии коммутационных материалов во внутренний объем ветвей термоэлементов и тем самым предотвратить неуправляемые процессы диффузионного легирования ТЭМ посторонними примесями. Наиболее радикальным способом по нивелированию этих негативных явлений является создание на торцах ветвей термоэлементов 4 барьерного антидиффузионного металлического покрытия, которое, кроме того, обеспечивает:

снижение энергетических потерь в местах контакта ТЭМ с коммутационным материалом, что, как было показано выше, особенно сказывается в многокаскадных ТЭО с малой высотой ветвей;

оптимизацию технологического процесса нанесения коммутирующих припоев;

расширение номенклатуры применяемых припоев, в том числе высокотемпературных, что является основным средством повышения теплостойкости ТЭО.

По своим физико-химическим свойствам лишь некоторые металлы совместимы с ТЭМ на основе Bi_2Te_3 . Как показали исследования, наилучшими металлами для формирования барьерных покрытий являются никель и кобальт. Они обладают наименьшей диффузией в ТЭМ, не создают интерметаллидов с его компонентами и устойчивы к окислению на воздухе. Эффективность их применения в качестве контактного покрытия зависит от качества подготовки соответствующей поверхности ТЭМ и способа нанесения покрытия. При этом прочность сцепления (адгезия) барьерного антидиффузионного металлического покрытия с ТЭМ должна быть сопоставима с пределом его прочности на разрыв и составлять величину порядка 2—2,5 кгс/мм².

Весьма важным элементом четырехкаскадной ТЭО является металлический тепловой экран (материал — медь), установленный на теплопоглощаю-

шей поверхности второго каскада вокруг низкотемпературных каскадов. Имея более низкую температуру по сравнению с температурой корпусных элементов ФЭПП, тепловой экран "перехватывает" часть "паразитных" теплопритоков к наиболее холодным частям ТЭО. Более того, поскольку эта часть теплового потока к ТЭО не "прокачивается" через все ее каскады, а сбрасывается на более высокотемпературные, холодильный коэффициент ϵ ТЭО несколько возрастает. Как следствие увеличивается на 2–3 К и перепад температур, реализуемый ТЭО.

На тепловом экране размещены керамические контактные платы 2 с отдельными металлизированными площадками, на которых осуществляется промежуточный монтаж выводов площадок ФЧЭ и термодатчика (ТД), установленных на теплопоглощающей поверхности ФЭПП.

При прочих равных условиях использование промежуточного монтажа выводов ФЧЭ и ТД на тепловой экран позволяет примерно в три раза снизить кондуктивные теплопритоки к теплопоглощающей поверхности ТЭО.

Таким образом, сформулированные в статье основные конструктивные и технологические концепции по созданию многокаскадных микроминиатюрных ТЭО прошли многочисленные позитивные апробации в ходе создания современных ФЭПП нового поколения, что позволяет с высокой степенью достоверности утверждать об оптимальности вышеописанных технических решений.

Литература

1. Аракелов Г. А. // Journal of Thermoelectricity. Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 1993. V 1. № 1. P. 59–61.
2. Булат Л. П. // Холодильная техника. 1999. № 7. С. 12–14.
3. Venkatasubramanian R. Пат. 6300150 США. Thin-Film thermoelectric device and Sabrication method of same; Опубл. 09.10.2001.
4. Лукишкер Э. М., Вайнер А. Л., Сомкин М. Н., Водолагин В. Ю. Термоэлектрические охладители. — М.: Радио и связь, 1983.

State of works and development prospects of thermoelectric cooling for photoelectric semiconductor detectors

G. A. Arakelov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The technical level of PESD with TEC is basically determined by two factors: a figure of merit Z of used thermoelectric materials (TEM) and a degree of design and engineering perfection of both TEC, separately, and PESD, as a whole. Researching of superlattices with quantum wells allowed to realize Z 3–6 times as much in comparison with known TEMs based on Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 . As to design and engineering optimization of discussed items at present multi-area vacuum RESDs based on multi-stage microminiature TECs are preferable.