

1. Сканирующий эллипсометр может быть использован для контроля чистоты поверхности фотокатодов до и после других операций, например удаления GaAs-подложки или травления AlGaAs-стопорного слоя. Контроль может производиться как перед загрузкой фотокатодов в сверхвысоковакуумную камеру "активировки" и сборки, так и in-situ во время нанесения цезиево-кислородного покрытия, для чего эллипсометр должен быть встроен в вакуумную камеру.

Авторы выражают благодарность В. Г. Кесслеру, Е. В. Спесивцеву, А. Г. Борисову, В. И. Швецу и С. В. Рыхлицкому из Института физики

полупроводников СО РАН за помощь при проведении исследований

#### Л и т е р а т у р а

1. Кисс Р. Дж., Крузе П. В., Патли Э. Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985. — 328 с.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. — М.: Мир, 1981. — 583 с.
3. Волков В. Г. Приборы ночного видения новых поколений// Специальная техника. 2001. № 5.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2006 г.

## High resolution scanning ellipsometry as test method of NEA-photocathode surface cleanliness in image intensifier tubes manufacture

A. V. Dolgikh

Joint Stock Company "Katod", Novosibirsk, Russia

I. A. Leonov

Politecnico di Milano, Milan, Italy

*In this paper a possibility of scanning ellipsometer use as means to test surface cleanliness of GaAs-photocathode in image intensifier tubes manufacture is discussed.*

УДК 621.382.53

## Термоэлектрический охладитель Пельтье с дополнительным проводящим элементом

Н. В. Горобец, В. Г. Охрем

Черновицкий факультет Харьковского национального технического университета (ХПИ), г. Черновцы, Украина

*Исследована работа термоэлектрического охладителя Пельтье с дополнительной проводящей перемычкой заданного сопротивления, которая расположена между горячей и холодной его сторонами и соединяет p- и n-ветви, в режиме максимального снижения температуры.*

Термоэлектрические охлаждающие устройства эффективно используются для снижения рабочей температуры разного рода микросенсоров, микроэлектронных приборов и т. д. Они применяются в метрологии, медицине и других отраслях.

В наиболее распространенных охладителях основным элементом является термопарный элемент (рис. 1), который состоит из полупроводниковых ветвей p- и n-типа проводимости 1, коммутацион-

ной перемычки 2 и термостатированных токоподводов 3.

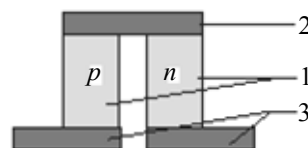


Рис. 1. Термопарный полупроводниковый термоэлемент

При соответствующем направлении тока пере-  
мычка 2 вследствие действия эффекта Пельтье ох-  
лаждается. Величина максимального перепада  
температуры  $(\Delta T)_{\max}$  определяется параметром  
термоэлектрической эффективности, температу-  
рой термостата  $T_0$  и величиной тока, и получить  
бóльший перепад температуры, чем  $(\Delta T)_{\max}$ , с по-  
мощью термодарного элемента невозможно. Для  
достижения дополнительного охлаждения исполь-  
зуют методы каскадирования [1, 2]. Каскадиро-  
ванные охладители — это громоздкие устройства,  
которые содержат значительное число коммута-  
ционных переключателей, керамических прослоек, пая-  
ных контактов, что приводит к ряду недостатков.

Паяные контакты влияют на термоэлектриче-  
ские характеристики приборов, а керамические  
прослойки — на их тепловые процессы. Можно  
указать также на влияние материалов припоев и  
флюсов, которые используются при сборке термо-  
батарей, а также на значительную трудоемкость  
изготовления таких приборов.

Указанные недостатки каскадированных тер-  
моэлектрических охладителей предопределяют  
поиск путей их замены более простыми конструк-  
тивно и, возможно, более эффективными с точки  
зрения максимального снижения температуры.

Цель настоящей работы — создание термо-  
электрического охладителя, более простого в кон-  
структивном отношении, чем каскадированный, не  
уступающего ему по глубине охлаждения.

### Физическая модель и результаты исследований

На рис. 2 дана принципиальная схема охлади-  
теля, у которого ветви  $p$ - и  $n$ -типа проводимости  
замкнуты вспомогательным проводящим элемен-  
том с контактами. Такое замыкание ведет к по-  
глощению тепла Пельтье на контактах, что в свою  
очередь усиливает эффект охлаждения термоэле-  
мента. В частности, должна увеличиться глубина  
термоэлектрического охлаждения.

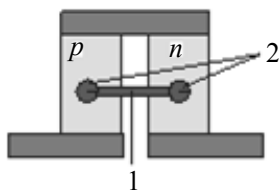


Рис. 2. Термоэлемент Пельтье с закороченными ветвями:  
1 — проводящий элемент; 2 — контакты

На рис. 3 представлен двухъярусный термоэле-  
мент, который имеет верхнюю и нижнюю части,  
ветви скоммутированы переключателями 1 и 2. Пере-  
мычка 1 играет роль дополнительного проводяще-  
го элемента, через который ответвляется ток  $I_1$ ,

вследствие чего (эффект Пельтье) он охлаждается,  
что в свою очередь приводит к понижению темпе-  
ратуры нижних торцов верхнего яруса термоэле-  
мента. В результате температура верхней пере-  
мычки понизится по сравнению с температурой,  
которая получилась бы с помощью отдельного  
термоэлемента. Вдоль ветвей нижней части термо-  
элемента протекает ток  $I$ : через переключку 1 —  
ток  $I_1$ , а верхняя часть термоэлемента обслужи-  
вается током  $I_2$ .

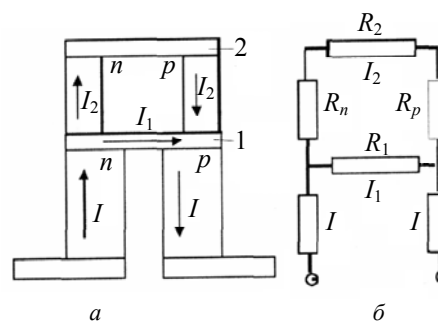


Рис. 3. Двухъярусный термоэлемент Пельтье:  
а — принципиальная схема термоэлемента; б — эквивалент-  
ная электрическая схема термоэлемента

Ниже приведен расчет глубины охлаждения,  
которая достигается с помощью двухъярусного  
термоэлемента. Считается, что распределение  
температуры одномерно.

Эквивалентная тепловая схема  $i$ -й ветви, где  $i = n$   
или  $p$  означает тип проводимости материала ветви  
термоэлемента, дана на рис. 4. Считая, что мате-  
риал ветвей однороден с независимыми от темпе-  
ратуры кинетическими коэффициентами, а темпе-  
ратура одномерна, запишем уравнение для  
распределения температуры в виде

$$\chi_i \frac{\partial^2 T_{ki}}{\partial x^2} + \rho_i j_{ki}^2 = 0, \quad (1)$$

где  $k$  — номер части ветви;

$T_{ki}$  — соответствующая температура;

$\chi_i$  и  $\rho_i$  — удельные теплопроводность и электриче-  
ское сопротивление, соответственно.

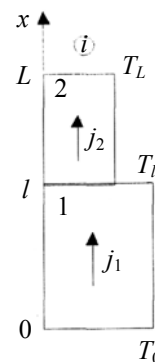


Рис. 4. Схема  $i$ -й ветви для расчета распределений  
температуры:

1 и 2 — нижняя и верхняя части ветви;  $j_1$  и  $j_2$  — плотности токов;  $l$  и  $L$  — размеры частей 1 и 2 вдоль оси  $x$ ;  $T_0$ ,  $T_l$ ,  $T_L$  — температуры на границах частей 1 и 2

Уравнение (1) рассмотрим при таких граничных условиях:

$$T_{1i}(0) = T_0, \quad T_{1i}(l) = T_l, \quad T_{2i}(l) = T_l, \quad T_{2i}(L) = T_L. \quad (2)$$

Решение задач (1), (2) легко находится. Распределения температур в частях 1 и 2 имеют вид

$$T_{1i}(x) = \frac{\rho_i j_{1i}^2}{2\chi_i} x(l-x) + \frac{T_l - T_0}{l} x + T_0; \quad (3)$$

$$T_{2i}(x) = \frac{\rho_i j_{2i}^2}{2\chi_i} x(L+l-x) + \frac{T_L - T_l}{L-l} x - \frac{T_L l - T_l L}{L-l} - \frac{\rho_i j_{2i}^2}{2\chi_i} Ll, \quad (4)$$

где  $j_{1i} = I/S_{1i}$ ,  $j_{2i} = I_2/S_{2i}$ ;  $S_{1i}$ ,  $S_{2i}$  — площади поперечных сечений соответствующих частей ветвей.

Используя правила Кирхгофа для схемы, представленной на рис. 3, б, можно записать

$$I_1 R_1 = I_2 (R_n + R_p + R_2), \quad I = I_1 + I_2,$$

откуда легко находим токи  $I_1$  и  $I_2$

$$I_1 = \frac{R_n + R_p + R_2}{R_n + R_p + R_1 + R_2} I; \quad I_2 = \frac{R_1}{R_n + R_p + R_1 + R_2} I.$$

$R_n$  и  $R_p$ , которые входят в эти два выражения и обозначены на эквивалентной электрической схеме, представляются выражениями

$$R_n = \frac{\rho_n}{S_{2n}} (L-l); \quad R_p = \frac{\rho_p}{S_{2p}} (L-l).$$

С учетом вышеизложенного можно записать

$$j_{2n} = K \frac{I}{S_{2n}}; \quad j_{2p} = -K \frac{I}{S_{2p}},$$

где

$$K = \frac{R_1}{R_n + R_p + R_1 + R_2};$$

$R_1$  и  $R_2$  — сопротивление перемычек 1 и 2, соответственно (см. рис. 3).

Условие нулевой холодопроизводительности охладителя имеет вид

$$-\chi_p \left. \frac{dT_{2p}}{dx} \right|_{x=L} + \alpha_p j_{2p} T_L - \chi_n \left. \frac{dT_{2n}}{dx} \right|_{x=L} + \alpha_n j_{2n} T_L = 0. \quad (5)$$

Запишем также условие каскадирования:

$$\begin{aligned} & \left( -\chi_p \left. \frac{dT_{2p}}{dx} \right|_{x=l} + \alpha_p j_{2p} T_l \right) S_{2p} + \\ & + \left( -\chi_n \left. \frac{dT_{2n}}{dx} \right|_{x=l} + \alpha_n j_{2n} T_l \right) S_{2n} = \\ & = \left( -\chi_p \left. \frac{dT_{1p}}{dx} \right|_{x=l} + \alpha_p j_{1p} T_l \right) S_{1p} + \\ & + \left( -\chi_n \left. \frac{dT_{1n}}{dx} \right|_{x=l} + \alpha_n j_{1n} T_l \right) S_{1n}. \end{aligned} \quad (6)$$

Последнее условие означает, что тепло, которое выделяется на нижних торцах верхней части охладителя, является тепловой нагрузкой нижней его части. Подставив в (5) и (6) выражения (3) и (4), а также учитывая выражения для плотностей токов, получим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) (L-l) K^2 I^2 + \\ & + (\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}) \frac{T_l - T_L}{L-l} - \Delta \alpha K I T_L = 0; \\ & - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) (L-l) K^2 I^2 + (\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}) \times \\ & \times \frac{T_l - T_L}{L-l} - \Delta \alpha K I T_l = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) I^2 + \\ & + (\chi_p S_{1p} + \chi_n S_{1n}) \frac{T_0 - T_l}{l} - \Delta \alpha I T_l = 0 \end{aligned}$$

это система двух линейных алгебраических уравнений относительно  $T_L$  и  $T_l$ . Решения имеют вид

$$T_L = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) (L-l) K^2 I^2 + \frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} T_l}{\frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} + \Delta \alpha K I};$$

$$T_l = \frac{U}{V},$$

где

$$U = -\frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) (L-l) K^2 I^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{1p}} + \frac{\rho_n}{S_{1n}} \right) I I^2 - \frac{\chi_p S_{1p} + \chi_n S_{1n}}{L-l} T_0 - \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\rho_p}{S_{2p}} + \frac{\rho_n}{S_{2n}} \right) (L-l) K^2 I^2}{\frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} + \Delta \alpha K I};$$

$$V = -\frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} + \Delta \alpha (K-1) I - \frac{\chi_p S_{1p} + \chi_n S_{1n}}{L-l} + \frac{\left( \frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} \right)^2}{\frac{\chi_p S_{2p} + \chi_n S_{2n}}{L-l} + \Delta \alpha K I}.$$

С помощью пакета компьютерных программ Maple проведены числовые расчеты зависимости минимальной температуры от геометрических размеров, электрического сопротивления дополнительного проводящего элемента и величины силы тока. Для расчетов выбраны материальные константы:  $\chi_p = \chi_n = 1,8 \cdot 10^{-2}$  Вт/(см·К);  $\rho_n = \rho_p = 10^{-3}$  Ом·см;  $\Delta \alpha = 4,4 \cdot 10^{-4}$  В/К. Другие величины подбирались с точки зрения минимума температуры  $T_L$ . Для  $S_{1p} = S_{1n} = 0,04$  см<sup>2</sup>,  $S_{2p} = S_{2n} = 0,02$  см<sup>2</sup>,  $L = 0,5$  см,  $l = 0,25$  см при условии, что  $R_2 = 0$ , а температура термостата  $T_0 = 300$  К; была рассчитана зависимость этой температуры от силы тока  $I$  и сопротивления дополнительной проводящей перемычки  $R_1$ . Величина силы тока при указанных параметрах составляет 4,9 А, а сопротивление перемычки ~ 0,02 Ом. Температура  $T_L$  при этом 224 К. Была рассчитана также температура  $T_l$ , которая оказалась равной 265 К.

Результаты расчетов при  $S_{1p} = S_{1n} = 0,06$  см<sup>2</sup>,  $l = 0,08$  см и прочих равных условиях приведены на рис. 5, на котором показаны две проекции зависимости температуры  $T_L$  от величины силы тока и сопротивления  $R_1$ . Видно, что минимальная температура составляет около 212 К, сила тока 16 А, сопротивление перемычки 0,0064 Ом. При этом  $T_l = 268$  К. Оптимизированный термоэлемент, ветви которого изготовлены из того же материала, дает 229 К. Таким образом, наличие дополнительной проводящей перемычки приводит к увеличению глубины охлаждения.

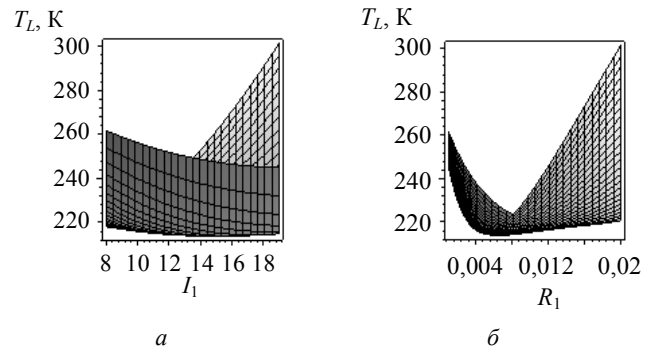


Рис. 5. Зависимость температуры  $T_L$  от силы тока (а) и электрического сопротивления дополнительного проводящего элемента (б)

Рассмотренный двухъярусный термоэлемент в конструктивном отношении выглядит значительно проще двухкаскадного охладителя. Однако эта простота на самом деле кажущаяся. Если попытаться экспериментально реализовать исследованную конструкцию, то возникает проблема материала дополнительной перемычки. Среди металлов нет таких, из которых можно было бы простым способом ее изготовить. Ее сопротивление, как было показано, составляет около 0,02 Ом, поэтому она должна иметь очень малое поперечное сечение, а значит, это должна быть пленка, напыленная на керамику. Если изготовить и применить такую перемычку, то конструкция охладителя мало чем будет отличаться от двухкаскадного устройства. По мнению авторов, материалом для дополнительного проводящего элемента может служить полупроводниковый материал, например антимоид индия. Впрочем, возможно, существуют и другие материалы. К сказанному добавим, что возможны термоэлементы с большим числом ярусов.

### Выводы

Наличие дополнительного проводящего элемента в виде проводящей перемычки, которая соединяет ветви полупроводникового термоэлемента и расположена между холодной и горячей его сторонами, приводит к усилению эффекта термоэлектрического охлаждения. Это обстоятельство может быть использовано для конструирования термоэлектрических охлаждающих устройств, которые при соответствующей доработке могли бы заменить каскадированные охладители для глубокого охлаждения разного рода микроэлектронных приборов.

### Л и т е р а т у р а

1. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник/ Л. И. Анатычук. — Киев: Наук. думка, 1979. — 768 с.

2. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. — М., 1976.

*Статья поступила в редакцию 2 марта 2006 г.*

## **Peltier thermoelectric cooler with additional conducting element**

*N. V. Gorobez, V. G. Okhrem*

Chernivtsi Faculty of Kharkiv National Technical University ( KhPI ), Chernivtsi, Ukraine

*The work of Peltier thermoelectric cooler with the additional conducting switch of specified resistance has been examined in the mode of maximum lowering of temperature. The switch is location between the hot and the cold sides of the cooler and joins p- and n-branches.*

\* \* \*