

## Radiation recombination at the irradiation of atomic clusters by intense femtosecond laser pulses

*V. P. Krainov, A. V. Sofronov*

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*New mechanism is suggested for generation of hard x-ray radiation at the interaction of atomic clusters with intense femtosecond laser pulses. Electrons which are ejected from the cluster due to outer ionization, can get again inside the neighboring cluster interacting with the Coulomb field of positively charged cluster produced by outer ionization. During the transition from continuum to the ground state in this Coulomb field, electrons emit spontaneously photons with the energy of several keV.*

PACS: 03.75.-b

УДК 536.5

## Расчет температурного поля трехслойного термоэлектрического преобразователя, пронизаемого газом

*Г. С. Хагба*

Абхазский государственный университет, г. Сухум, Абхазия

*Проведено исследование трехслойного термоэлектрического преобразователя (ТЭП) из сплавов SiGe. Рассмотрена математическая модель ТЭП, которая дает возможность учитывать влияние теплообмена на тепловыделяющие и теплопоглощающие спай ветви термоэлемента. Получено распределение температуры в поперечном сечении ТЭП. Определены распределения температур для термоэлектрического материала  $T_3(y)$  и коммутационных пластин  $T_1(y)$ ,  $T_2(y)$ .*

PACS: 02.90.+p

### Введение

В математической теории ТЭП в общем случае должны быть учтены условия тепло- и массообмена в источнике и стоке теплоты, теплоперенос в термобатарее, представляющей собой многослойную стенку, электроперенос в цепи термобатарея—нагрузка—внешний источник, а также условия сопряжения всех элементов устройства. В таком виде математическая модель ТЭП достаточно громоздка и весьма специфична, т. е. удовлетворяет лишь конкретному сочетанию узлов ТЭП.

Для получения более универсальных методов расчета функции источника и стока теплоты выражают через соответствующие граничные условия, которые играют роль условий однозначности для уравнения теплопроводности термобатарей. Исходя из общих представлений о процессах, происходящих в ТЭП, возможные варианты сочетаний режимных и геометрических параметров термоэлектрических устройств можно разделить на

две группы, каждая из которых соответствует различным теплофизическим моделям изучаемого объекта. В одной из групп термоэлемент играет роль термического сопротивления, включенного между источником и стоком теплоты (т.н. классическая схема), в другой — роль интенсификатора теплообмена (схема с боковым теплообменом — термоэлемент типа "ребро", пронизаемые и рекуперативные слои). Соответственно, взаимосвязь выходных и конструктивных параметров термоэлемента будет существенно различна.

Таким образом, задача разделяется на внешнюю (расчет внешних теплообменных устройств) и внутреннюю (расчет собственной термобатареи). Для получения такого решения рассматриваемой задачи необходимо применять численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений [1, 2].

Использование одномерных моделей пронизаемого термоэлемента позволяет проводить расчет лишь в тех случаях, когда его термическое со-

противление в поперечном направлении мало. В реальных условиях такая модель может быть использована для расчета термоэлементов, выполненных из материалов с высокой теплопроводностью. В остальных случаях сказывается двухмерность температурного поля, проявляющаяся в возникновении существенных поперечных градиентов температуры в области теплопоглощающего спая. Кроме того, применение одномерной модели не дает возможности провести оптимизацию конструкции по геометрии и условиям теплообмена, так как в ней не отражено влияние поперечного размера  $a$ .

### Решение двумерной задачи теплопроводности при подвижном теплоносителе

Решение двумерной задачи теплопроводности для пронизываемого термоэлемента методологически основывается на результатах работ [3—5]. Решение осуществляется при использовании следующей математической модели для полупроводникового термоэлемента на базе SiGe, схематично изображенного на рис. 1.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{q_v}{\chi_s}, \quad (1)$$

где  $q_v$  — тепловой поток в объеме  $V$ ;

$\chi_s$  — коэффициент теплопроводности среды.

Для продуваемого теплоносителя использовано уравнение энергии в виде дифференциального уравнения третьего порядка.

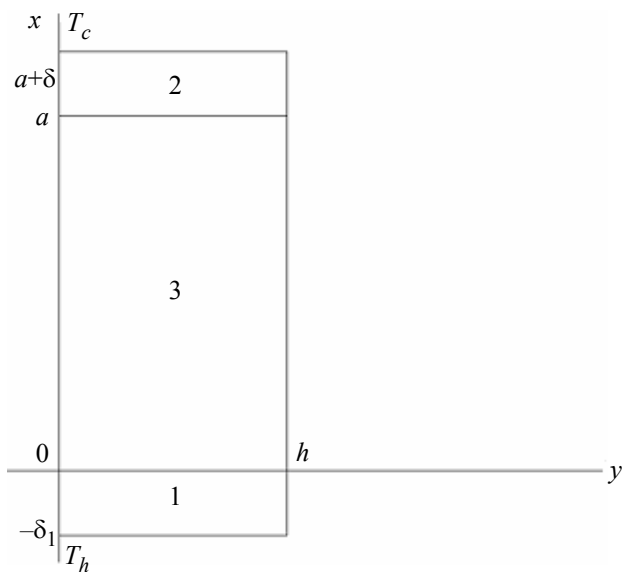


Рис. 1. Расчетная схема ветви термоэлемента:

1, 2 — коммутационные пластины; 3 — термоэлектрический материал

В одномерной постановке задача, как известно, сводится к системе уравнений:

$$T(y) = t(y) + \frac{r}{2St} \frac{dt}{dy}; \quad (2)$$

$$\frac{dt}{dy} = \frac{\chi}{\rho V c_p S P} \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{q_v}{\rho V c_p} P, \quad (3)$$

где  $r$  — внутреннее сопротивление термоэлемента;

$St$  — критерий Стантона;

$\rho$  — плотность термоэлемента;

$c_p$  — удельная теплоемкость при const давлении;

$S$  — площадь термоэлемента;

$P$  — периметр термоэлемента;

$\chi$  — коэффициент теплопроводности термоэлемента;

$V$  — объем термоэлемента.

Эта система путем подстановки (2) в (3) сводится к линейному дифференциальному уравнению третьей степени, допускающему аналитическое решение, которое и будет использовано как вышеупомянутое уравнение энергии для продуваемого теплоносителя, т. е.

$$\frac{d^3 T}{dy^3} + \frac{2St}{r} \frac{d^2 T}{dy^2} - \frac{2\alpha P}{\chi_r} \frac{dT}{dy} + \frac{q_v}{\chi_s} \frac{2St}{r} = 0,$$

где  $\alpha$  — коэффициент термоЭДС.

Критерий Стантона может быть определен как отношение локальной поверхностной теплопередачи к произведению условной теплопередачи, равной величине  $\rho U c_p$ .

$$St = \frac{q}{\rho U c_p (T_h - T_c)},$$

где  $U$  — массовая скорость потока газа.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} T(x, y) \Big|_{x=-\delta_1} &= T_h, & 0 \leq y \leq h; \\ \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0, y=h} &= 0; \\ -\delta_1 \leq x \leq a + \delta_2, & & T(x, y) \Big|_{x=a+\delta_2} = T_c, \\ 0 \leq y \leq h; & & -\delta < x < 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Границы распределения температур при  $x = -\delta_1$  равно  $T_h$ -среды, тогда  $y$  меняется от 0 до  $h$ . Распределение температур в поперечном сечении равно нулю при  $y_0 = 0$  и  $y = h$ . Координата ( $x$ ) меняется от  $-\delta_1$  до  $a + \delta_2$ , когда температура в поперечном сечении меняется по осям ( $x, y$ ) при  $x = a + \delta_2$  и равняется  $T_c$ .

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \alpha_0 (T_h - T_c) + \chi \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} = 0;$$

$$\alpha_1 (T_h - T_c) + \chi \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = -\frac{q_v}{\chi};$$

$$T \Big|_{y=0} = T_0.$$

Решение уравнения (4) получено методом Фурье в виде суммы бесконечного ряда.

$$T(x, y) = C_1 \exp(k_1 y) + C_2 \exp(k_2 y) + C_3 y + C_4 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ C_5 \operatorname{sh} \mu_n \frac{y}{a} + C_6 \operatorname{ch} \mu_n \frac{y}{a} + \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + 0,5 \sin 2\mu_n} \times \left[ \frac{q_v \left( \frac{a}{\mu_n} \right)^2}{\chi \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2} - \frac{C_1 k_1}{k_1 - \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2} - \frac{C_2 k_2}{k_2 - \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2} \right] \right\} \cos \mu_n \frac{x}{a}, \quad (5)$$

где  $\mu_n$  — корни трансцендентного уравнения

$$\frac{\mu_n}{Bi} = \operatorname{ctg} \mu_n.$$

Постоянные  $C_5, C_6$  определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} C_5 \operatorname{ch} \mu_n \frac{h}{a} + C_6 \sin \mu_n \frac{h}{a} = -\frac{h}{a} \left[ \frac{q_0}{\chi} + T'(h) \right], \\ -C_5 \frac{\mu_n h}{Bix a} + C_6 = \frac{h}{Bix} T'(0). \end{cases} \quad (6)$$

При этом распределение температур в термоземле описывается выражением

$$T_2(y) = T_0 + F_2(A, B, C, Y).$$

Для режима ТЭП в качестве масштаба целесообразно использовать максимально допустимую рабочую температуру ( $T_0 = T_{\omega}$ ) или располагаемый перепад температур  $T_0 = T_{\omega} - t_0 = T_h - T_c$ , но для температуры стока теплоты  $T_0 = t_0 = T_c$ , где  $T_h$  — температура горячей среды,  $T_c$  — температура холодной среды.

$$\text{Здесь } A = \frac{4St}{dk}; \quad B = \sqrt{\left( \frac{A}{2} \right)^2 + \frac{4\alpha p}{\chi dk}};$$

$$C = \frac{Z\chi\Delta T^2 dk}{h^2(m+1)^2 4\alpha\Pi},$$

где  $m = \frac{Ru}{r}$  — коэффициент нагрузки,  $m \approx 1$ ;

$d$  — диаметр термоземле.

$$T_2(y) = T_0 + \frac{4St}{dk} + 8 \sqrt{\frac{St}{dk^2} + \frac{4\alpha P}{\chi dk}} + \frac{Z\chi\Delta T^2 dk}{h^2(m+1)^2 4\alpha \frac{a}{h}}. \quad (7)$$

Введены обозначения  $Z = \frac{\alpha^2 \delta}{\chi}$ ,  $q_v = \alpha(T_h - T_c)$ ;

$$\Delta T = T_h - T_c, \quad St = \frac{Nu}{Re} = \frac{\alpha l^2 \rho}{\chi}.$$

Соответственно, для температур  $T_1(y)$  и  $T_2(y)$  общее решение имеет вид:

$$\begin{cases} T_1(y) = C_1 \exp(n, y) + C_2 \exp(-n, y) + \frac{j^2 \rho}{n^2 x} + T_0, \\ T_2(y) = C_3 + C_4 y - \frac{j\rho}{2x} y^2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\exp(-n, y)$  — температура коммутационных пластин, разделяющих источник и исток теплоты, определяется параметром переноса  $n$  и длиной ребра термоземле при  $y = h$ ;

$n$  — параметр переноса;

$j$  — плотность тока.

Постоянные  $C_1$ — $C_4$  определяются из системы уравнений (8), а  $C_5, C_6$  — из системы уравнений (6).

$$\begin{cases} C_1 = \frac{j\rho y^2 (y+1) + \frac{j\rho}{2x} y^4}{\exp(n, y)}; \\ C_2 = \frac{2j\rho}{x} y^2 (y+1) + \frac{j^2 \rho}{2x} + \frac{j^2 \rho}{2x} y^4 - \frac{j\rho}{2x} y^2; \\ C_3 = \frac{j\rho}{2x} y^3 + \frac{j\rho}{2x} y^2 = \frac{j\rho}{2x} y^2 (y+1); \\ C_4 = \frac{i\rho}{2x} y^3; \\ C_5 = \frac{-\frac{h}{a} \left( \frac{q}{x} + T'(h) \right)}{\operatorname{ch} \mu_n \frac{h}{a} + \frac{\mu_n h}{Bix a} + \frac{h}{Bix} T'(0) \cdot \operatorname{sh} \mu_n \frac{h}{a}}; \\ C_6 = \frac{\frac{h}{a} \left( \frac{q}{z} + T'(h) \right)}{\operatorname{ch} \mu_n \frac{h}{a} + \frac{\mu_n h}{Bix a} + \frac{h}{Bix} T'(0)}. \end{cases} \quad (9)$$

Подставляя постоянные  $C_1$ — $C_6$  в ряд Фурье (5), получим

$$T(x, y) = \frac{j\rho y^2 (y+1) + \frac{j\rho}{2x} y^4}{\exp(n, y)} \exp(k, y) + \frac{2j\rho}{x} y^2 (y+1) + \frac{j^2 \rho}{2x} + \frac{j^2 \rho}{2x} y^4 - \frac{j\rho}{x} y^2 \cdot \exp(k_2 y) + \frac{j\rho}{2x} y^4 + \frac{j\rho}{2x} y^3 + \sum_{n=1}^{\infty} \times \left\{ \frac{\frac{h}{a} \left( \frac{a}{x} + T'(h) \right)}{\operatorname{ch} \mu_n \frac{h}{a} + \frac{\mu_n h}{Bix a} + \frac{h}{Bix} T'(0) \cdot \operatorname{sh} \mu_n \frac{h}{a}} \cdot \sin \mu_n \frac{y}{a} + \right.$$

$$+ \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + 0,5 \sin 2\mu_n} \left[ \frac{a \left( \frac{a}{\mu_n} \right)^2}{x} - \frac{\exp(n, y)}{k_1 - \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2} - \frac{2j\rho}{x} y^2 (y+1) \frac{j^2\rho}{2x} + \frac{2j\rho}{x} y^4 - \frac{S\rho y^2}{2x} \right] \left. \vphantom{\frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + 0,5 \sin 2\mu_n}} \right\} \cos \mu_n \frac{x}{a},$$

$$\left( k_2 - \frac{\mu_n}{a} \right)^2$$

где  $n = \frac{\alpha \Pi}{\chi}$ ;

$\Pi$  — периметр ветви термоэлемента  $k_1 = n_1 y$ ;  
 $k_2 = n_2 y$ .

Таким образом, на данном этапе получено распределение температуры в термоэлектрическом преобразователе в поперечном сечении по осям  $T(x, y)$ . Наша задача — получить распределение температур на каждом слое, что можно достичь, подставляя (9) в (8) и (7). В конечном итоге получаем распределение температур и для термоэлектрического материала  $T_3(y)$ , и для коммутационной пластины  $T_1(y)$  и  $T_2(y)$ .

$$T_1(y) = \left\{ \frac{j\rho}{x} y^2 (y+1) + \frac{j\rho}{x} y^4 \right\} \times$$

$$\times \cos \mu_n \left\{ \frac{2j\rho y^2}{0,05x} (y+1) + \frac{j^2\rho}{2x} + \frac{j^2\rho}{2x} y^4 - \frac{j\rho}{2x} y^2 \right\} \times$$

$$\times \exp \frac{7,5\alpha}{x} + \frac{j^2 j x^2}{0,25\alpha^2} + T_c;$$

$$T_2(y) = T_c + \frac{0,2\alpha l^3 \rho^2}{dk} + 8 \sqrt{\frac{0,05\alpha^2 \rho^4 l^2}{\chi^2} + \frac{4\alpha\rho}{\chi dk}} +$$

$$+ \frac{\alpha^2 \delta (T_h - T_c)^2 dk}{16h^2 \alpha \frac{a}{h}} +$$

$$+ \left\{ \frac{j\rho}{2\chi} y^2 (y+1) - \frac{j\rho}{2\chi} y^4 - \frac{j\rho}{2\chi} y^2 \right\} \cos \frac{\delta}{a};$$

$$T_3(y) = \frac{2 \frac{h}{a} \left( \frac{q}{\chi} + T_h \right)}{ch \mu_n \frac{h}{a} + \frac{\mu_n}{Bixa} + \frac{h}{Bix} T_c \cdot sh \mu_n \frac{h}{a}} \times$$

$$\times \exp \left( \frac{0,05\alpha}{\chi} \right) + \frac{j^2 \rho \lambda^2}{0,25\alpha} + T_h. \quad (10)$$

В дальнейшем используем следующие значения для выбранной модели:

$$a = 1 \text{ см}; \quad \delta_1 \text{ и } \delta_2 = 0,1 \text{ см}; \quad j = 1 \frac{\text{А}}{\text{см}^2};$$

$$\rho_1, \rho_2, \rho_3 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$\chi_1 = 3,6 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}}; \quad \chi_2 = 3,5 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}};$$

$$\chi_3 = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}}; \quad d = 0,25 \text{ см}.$$

Таким образом, используя приближение неограниченной пластины [6] для корней характеристического уравнения  $\text{ctg} \mu = \frac{1}{Bi} \mu$ , получим первые его шесть значений:  $\mu_1 = 0,00$ ;  $\mu_2 = 3,14$ ;  $\mu_3 = 6,28$ ;  $\mu_4 = 9,42$ ;  $\mu_5 = 12,56$ ;  $\mu_6 = 15,7$ .

Соответственно, имеем

$$Bix_1 = 0,0; \quad Bix_2 = 0,001; \quad Bix_3 = 0,002; \quad Bix_4 = 0,004;$$

$$Bix_5 = 0,006; \quad Bix_6 = 0,008.$$

Подставляя все шесть значений в (10), получим распределение температур в трехслойном термоэлектрическом преобразователе.

$$T_{1|\mu_1=0} = 125^\circ; \quad T_{1|\mu_2=3,14} = 212^\circ; \quad T_{1|\mu_3=6,28} = 242^\circ;$$

$$T_{1|\mu_4=9,42} = 182^\circ; \quad T_{1|\mu_5=12,56} = 112^\circ; \quad T_{1|\mu_6=15,7} = 212^\circ;$$

$$T_{2|\mu_1=0} = 131,9^\circ; \quad T_{2|\mu_2=3,14} = 125,2^\circ; \quad T_{2|\mu_3=6,28} = 126,9^\circ;$$

$$T_{2|\mu_4=9,42} = 126,9^\circ; \quad T_{2|\mu_5=12,56} = 126^\circ; \quad T_{2|\mu_6=15,7} = 125,9^\circ$$

$$T_{3|\mu_1=0} = 26^\circ; \quad T_{3|\mu_2=3,14} = 90,7^\circ; \quad T_{3|\mu_3=6,28} = 152^\circ;$$

$$T_{3|\mu_4=9,42} = 250^\circ; \quad T_{3|\mu_5=12,56} = 550^\circ; \quad T_{3|\mu_6=15,7} = 910^\circ.$$

Далее строим график зависимостей температур от первых шести корней характеристического уравнения (рис. 2).

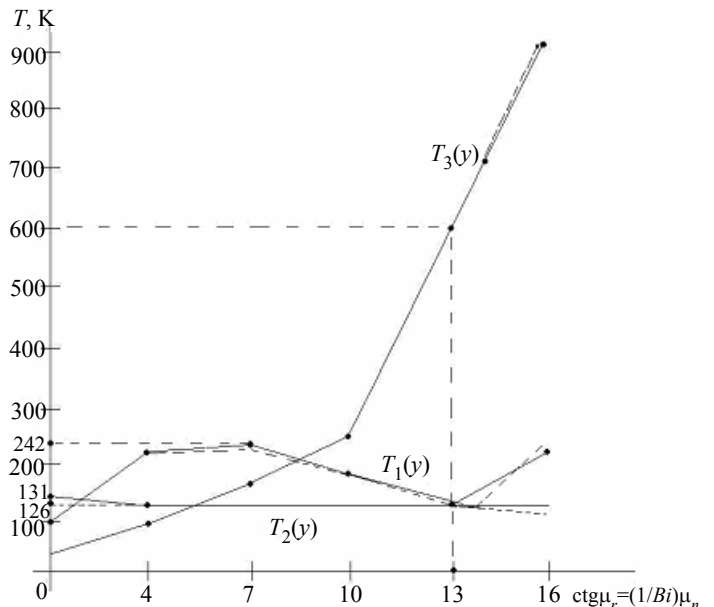


Рис. 2. График зависимостей температур в трехслойном термоэлементе

### Заключение

Рассмотренная математическая модель ТЭП позволяет учитывать влияние теплообмена на тепловыделяющих и теплопоглощающих спаях ветви

термоэлемента. Важным моментом для общей характеристики термоэлемента является то, что использованная модель дает полную информацию о физике процессов, протекающих в исследуемых термоэлектрических преобразователях благодаря учету взаимодействия всех элементов системы: коммутация—термоэлемент—коммутация.

#### Л и т е р а т у р а

1. Коздоба Л. А. Решения нелинейных задач теплопроводности. — Киев: Наук. думка, 1976. — 136 с.
2. Коленко Е. А., Стельбанс Л. С. О коммутации полупроводниковых термоэлементов//Полупроводники в науке и технике. — М.—Л.: 1958. Т. 2. С. 217—298.

3. Котырло Г. К., Лобунец Ю. Н. Двухмерное температурное поле перфорированного термоэлемента, продуваемого газом//Теплотех. пробл. прямого преобразования энергии. 1974. Вып. 5. С. 129—134.

4. Котырло Г. К., Козлюк В. Н., Лобунец Ю. Н. Термоэлектрический генератор с развитой поверхностью теплообмена//Там же. 1975. Вып. 7. С. 85—95.

5. Котырло Г. К., Козлюк В. Н., Лобунец Ю. Н. Об особенностях тепловых систем термоэлектрических устройств с развитой внутренней поверхностью теплообмена//Вестник АН. УССР. 1977. № 2. С. 50—61.

6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М., 1952. С. 155, 191.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2008 г.

## Calculation of a temperature field for the three-layer thermoelectric converter, permeable by gas

G. S. Hagba

Abkhazian State University, Sukhum, Abkhazia

*It is carried out research of the three-layer thermoelectric converter (TEC) from SiGe alloys. Mathematical model of the TEC, which enables the account of influence of heat exchange on heat-generating thermojunctions and heat-absorbing ones of a thermoelement, is considered. Distribution of temperature in a cross-section section of the thermoelectric converter is received. Distributions of temperatures for thermoelectric material  $T_3(y)$  and for switching plates  $T_1(y)$ ,  $T_2(y)$  are defined.*

PACS: 02.90.+p

УДК 535.37

## Определение фазы диоксида циркония на основе термостимулированной люминесценции

Т. М. Сычева, А. В. Гаврилов

Дальневосточный государственный гуманитарный университет, г. Хабаровск, Россия

*Рассмотрена возможность люминесцентного анализа для определения фазового состава диоксида циркония. Установлено, что спектры фото- и рентгенолюминесценции диоксида циркония моноклинной и кубической модификации не имеют характерных особенностей. По данным термостимулированной люминесценции, возможно идентифицировать различные фазы диоксида циркония.*

PACS: 78.60.Kn

#### Введение

Диоксид циркония и композиции на его основе находят широкое применение в качестве твердых электролитов при изготовлении огнеупоров и химически инертных материалов, а также радиаци-

онно стойких покрытий для космических кораблей и ядерных реакторов. Возможность создания функциональных материалов со столь различными свойствами базируется на применении высокотемпературных модификаций диоксида циркония — тетрагональной и кубической.