

УДК 535.231.62,621.315.538.945.

Моделирование тепловых полей в многоэлементных  
сверхпроводящих приемниках теплового излучения.

М.А.Басараб, А.А.Гончаренко, С.Н.Кулиш, В.И.Агафонов, В.Г.Грицай.

Реализация многоэлементных приемников инфракрасного излучения (ИК-приемников) на основе сверхпроводящих материалов дает возможность существенно улучшить такие их характеристики, как чувствительность, разрешающая способность, постоянная времени, по сравнению с полупроводниковыми ИК-приемниками [1,2], что дает реальным создание устройств для регистрации малоконтрастных быстропротекающих тепловых процессов и движущихся объектов [3,4]. Для достижения предельных характеристик ИК приемников на сверхпроводящих материалах необходимо решить ряд проблем, связанных с оптимизацией их геометрических и тепловых параметров и, что наиболее существенно, определить температурный рельеф в двухслойной системе сверхпроводниковая пленка - диэлектрическая подложка, ибо именно такие приемники находят наиболее широкое применение [2,3,6]. В большинстве работ, например [2,3,6], постановке задачи теплопереноса в ИК приемниках уделяется недостаточно внимания. Они анализируются и решаются при предположениях не адекватных физической ситуации, что приводит к результатам имеющим ограниченное применение. В [7] приведена постановка задачи теплопереноса, учитывающая практически все физические явления в ИК приемнике, но даже численная реализация решения этой задачи вызывает серьезные трудности. В данной работе указаны пути преодоления этих трудностей.

Статья посвящена анализу процессов теплообмена и построению адекватной математической модели на примерах ИК приемников изображенных на рис. 1, 2. Детализация приемников не нарушает общности задачи, т.к. возникающие при их функционировании процессы теплообмена являются общими для наиболее часто встречающихся конструкций фотоприемных устройств (ФПУ).

Для описания схемы функционирования ИК приемника введем обозначения в соответствии с рис. 1:  $\Omega$  - область, занимаемая подложкой;  $\partial\Omega$  - граница области  $\Omega$ ;  $\Omega_i$  - область, занимаемая одной сверхпроводящей полоской;  $\Omega_0 = \bigcup_{i=1}^n \Omega_i$  - область полоски, где  $n$  - количество полосок;  $\partial\Omega_0$  - граница области  $\Omega_0$ ;  $\vec{n}$  - единичная нормаль к области занятой ФПУ. Теплофизические параметры задачи:  $T, T_1$  - температура соответственно в полоске и подложке; аналогично  $\lambda, \lambda_1$  - теплопроводности;  $\rho, \rho_1$  - плотности,  $C, C_1$  - удельные теплоемкости;  $t$  - время протекания теплообмена.

Функционирование приемника происходит следующим образом. До некоторого момента  $t_0$  он находится в сверхпроводящем состоянии при температуре  $T_n$ . В момент  $t_0$  на приемник падает тепловой поток от исследуемого объекта  $q_u$  (рис. 1б), а на некоторую часть  $\partial\Omega'_i$  сверхпроводящей полоски подается световой поток  $q_\lambda$ , выполняющий роль коммутирующего. Световой поток частично поглощается диэлектрической подложкой, а его основная часть идет на нагревание участка  $\partial\Omega'_i$ . В силу технических особенностей изготовления приемника, возникающие на границе раздела сверхпроводящая полоска-подложка, термическое сопротивление Капицы при криогенном уровне температур ничтожно мало, что дает идеальный тепловой контакт на этом участке. Предполагается соизмеримость площади светового пятна с шириной сверхпроводящей полоски.

432.

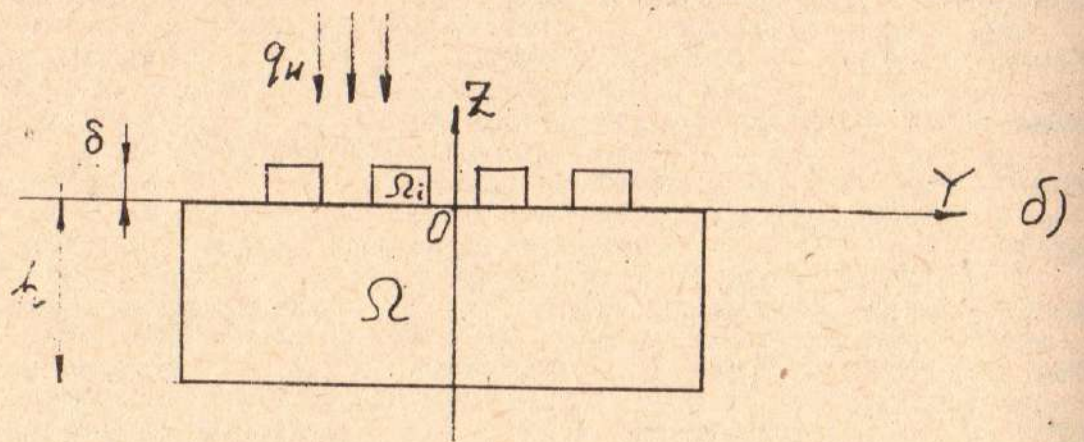
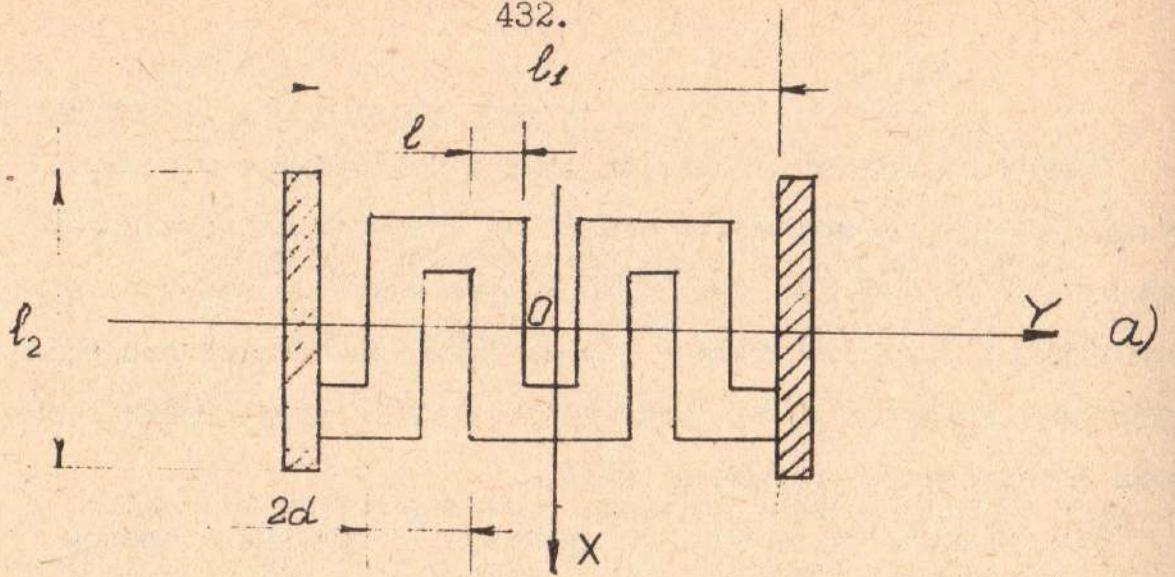


Рис. 1

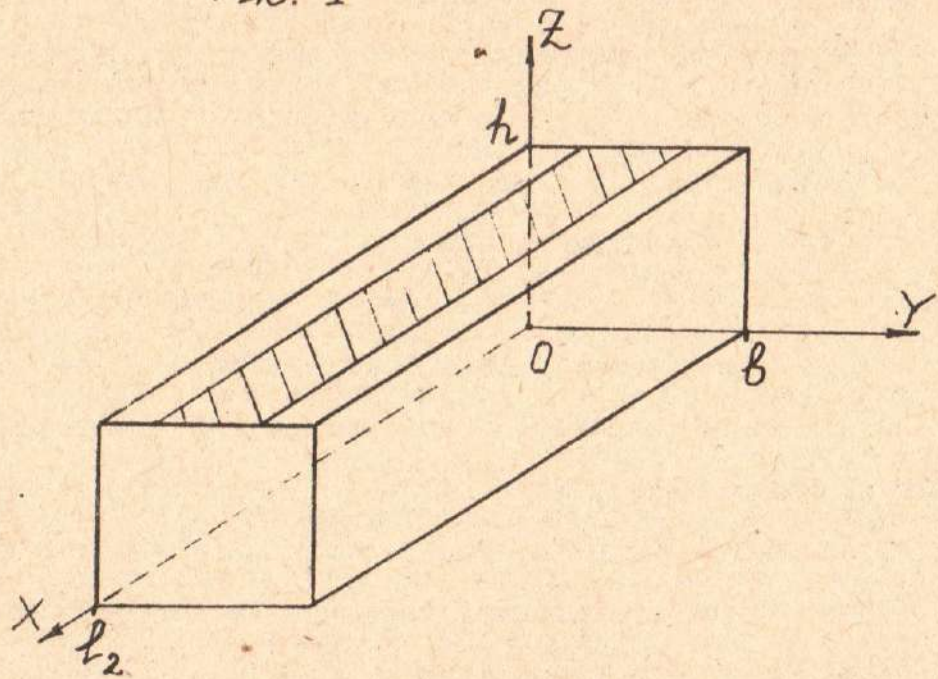


Рис. 2

При распространении тепла в системе полоска-подложка происходит радиационный и конвективный теплообмен с окружающей средой. Периметр подложки термостатирован. Нагревание коммутирующим излучением происходит до изменения температуры на фиксированную величину  $\Delta T$ . Одновременно с подачей  $q_A$  по сверхпроводящей полоске пропускается транспортный ток, что приводит к выделению Джоулева тепла  $q_j$  на опрашиваемом участке, обусловленное появлением резистивных свойств полоски. В результате участок опроса нагревается до температуры  $T_j$ . Известна температура нормально-го режима полоски  $T_c$ . Устройство отключается, т.е. отключаются потоки  $q_j, q_A$ , в тот момент, когда выполняется соотношение  $T_c = \Delta T + T_j + T_u$ , из которого находится  $T_u$  - температура, обусловленная тепловым потоком от исследуемого объекта. Процесс повторяется столько раз, сколько имеется точек опроса.

Учет геометрии области, зависимости теплофизических параметров от температуры, сложный теплообмен в системе полоска-подложка-окружающая среда приводит к сложной математической модели устройства, описываемой краевой задачей для системы нелинейных нестационарных уравнений [7], решение которой получить практически невозможно [9]. В то же время геометрические и функциональные особенности ИК приемника, а также специфичность физических процессов протекающих в нем, дают возможность упростить приведенную математическую модель.

Литературные данные [2-6,8] свидетельствуют о том, что процессы в ИК приемнике имеют быстротекущий характер, так, например, время выхода приемника на стационарный режим имеет величину порядка  $10^{-2}$  с, при этом мало изменяются температурные поля ( $\Delta T < 5K$ ). В этом интервале изменения температур теплофизические характеристики сверхпроводящей полоски и подложки можно считать постоянными,

что приводит к линеаризации уравнений. Предположение о радиопрозрачности подложки при незначительных тепловых мощностях коммутирующего излучения ( $10^{-4}$  Вт) в сочетании с малыми временами их делают достоверными предположения о малом радиационном теплообмене ИК приемник - окружающая среда, а наличие неглубокого вакуума, который и является этой средой, дает возможность смоделировать ситуацию отсутствием конвективного теплообмена. В идеале на боковой поверхности подложки ( $\partial\Omega_h$ ) поддерживается постоянная температура  $T_H$ . В этом случае тепловые поля в многоэлементном сверхпроводниковом ИК приемнике описываются следующей начально-краевой задачей.

$$\begin{aligned} c\varrho \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \Delta T + q_j, \quad \bar{x} \in \Omega_0, \\ c_1\varrho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \lambda_1 \Delta T_1, \quad \bar{x} \in \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{x} = (x, y, z)$ . Начальные условия

$$T(\bar{x}, 0) = T_1(\bar{x}, 0) = T_H.$$

Краевые условия.

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n}, \quad T(\bar{x}, t) = T_1(\bar{x}, t), \quad \bar{x} \in \partial\Omega \cap \partial\Omega_0; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q_n, \quad \bar{x} \in \partial\Omega_0 / (\partial\Omega \cap \partial\Omega_0); \quad \frac{\partial T_1}{\partial n} = 0, \quad z=0; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q_n - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n}, \quad T(\bar{x}, t) = T_1(\bar{x}, t), \quad \bar{x} \in \partial\Omega'_i. \end{aligned} \quad (2)$$

Различные варианты линейной задачи (1), (2) наиболее часто обсуждаются в литературе, тем не менее общее ее решение не получено. Численная реализация решения этой задачи сопряжена со значительными трудностями [9, 10], поэтому мы приведем математическую модель распространения тепловых полей в ИК приемнике учитывающую его геометрию.

Конструктивная особенность ИК приемников на сверхпроводниковых пленках состоит в том, что толщина пленки является малым параметром по сравнению с остальными линейными ее размерами и размерами подложки. Это дает основания для применения метода сосредоточенной емкости [ II ] при определении температурных полей в сложной системе полски-подложка. Задача (I), (2) тогда сводится к уравнению теплопроводности в области  $\Omega$  с измененными соответствующим образом краевыми условиями на той части границы, к которой прилегает пленка. Мы приведем математическую модель теплообмена для случая линейного ИК приемника (рис.2), на которые распадается приемник рис. I и который представляет самостоятельный интерес при реализации на такой конструкции многоэлементного ИК приемника. Эта модель описывается уравнением

$$c\vartheta \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T, \quad \bar{x} \in \Omega, \quad (3)$$

с начальными условиями  $T(\bar{x}, 0) = T_H$

и граничными условиями

$$c\vartheta \delta \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \delta \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + q_u + q_l + q_j \delta,$$

где  $\bar{x}$  принадлежит верхней грани приемника,

а  $q_u = q_j = 0$ , если  $\bar{x} \in \partial\Omega \cap \partial\Omega_0$ , и  $q_l = 0$ ,  
если  $\bar{x} \in \partial\Omega'_i$ ;

$$T(\bar{x}, t) = T_H \quad \text{при } x = 0, l_2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0, b; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

Достоинством приведенной математической модели является то, что в отличие от задачи (I), (2) она решается в одной области и с большой степенью точности, а именно  $\delta/2$ , адекватно описывает физические процессы протекающие в многоэлементном

приемнике ИК излучения при его функционировании. Отметим, что в [ II ] приведены эффективные методы численного решения рассмотренной задачи.

#### Литература.

1. Коноводченко В.А., Дмитриев В.М., Неизотермический сверхпроводящий болометр. Труды ФТИНГ УССР, Харьков, 1968, с.95-124.
2. Веркин Б.И., Дмитриенко И.М., Бандурян Б.Б. и др. Приемники ИК излучения на основе ВТСП. Препринт ФТИНГ АН УССР, 39-88. Харьков, 1988, с.25.
3. Есиков О.С., Крот А.И., Протасов Е.А. и др. ИФЖ. 1991, Т.61, № 1. с.136-140.
4. Есиков О.С., Протасов Е.А. Письма в ЖТФ. 1989.Т.15, вып.20, с.11-14.
5. Кулиш С.Н., Лапин Н.А., Павлов Ю.И. и др. Радиотехнические системы и устройства. Харьков, ХАИ, 1988. с.106-108.
6. Дмитриенко И.М., Бандурян Б.Б., Белоцерковский В.В. и др. ИФЖ, 1990. Т.59, № 6, с.1037.
7. Гончаренко А.А., Грицай В.Г., Кулиш С.Н. ИФЖ.1993. Т.64, № 2. с.238-242.
8. Кириченко Ю.А., Русаков К.В., Тюрина Е.Г. Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1990. Т.3, № 7, с.1385-1409.
9. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.:1975.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.1977.
11. Ержанов Р.Ж., Мацевитый Ю.М., Султанчизин У.М. и др. Сосредоточенная емкость в задачах теплофизики и микроэлектроники. Киев, 1992.