

УДК 621.372.061

Ю.В. Вунтесмери, канд. техн. наук

## Модель теплопереноса в геликоновом венти́ле

**В работе рассмотрен стационарный режим теплопереноса внутри геликонового вентиля. Предложена одномерная модель, позволяющая оценивать распределение температуры внутри геликонового вентиля в зависимости от величины рассеиваемой мощности.**

**A stationary regime of heat transfer inside the structure of helicon isolator is considered in this paper. A proposed one-dimensional model allows to evaluate the temperature distribution along the axis of helicon isolator depending on the magnitude of power dissipation.**

**Ключевые слова:** *геликоновый венти́ль, рассеиваемая мощность, теплоперенос, тепловая задача.*

### Введение

Геликоновые вентиля являются невзаимными пассивными устройствами, работа которых основана на невзаимных эффектах распространения поляризованных по кругу геликоновых волн в замагниченной плазме полупроводника [1]. Основным элементом геликонового вентиля является геликоновый резонатор, представляющий собой плоскопараллельную пластину полупроводника, в которой реализован размерный резонанс геликоновой волны.

Геликоновый венти́ль является развязывающим устройством. Одной из его важнейших характеристик является предельная мощность поглощения при обратном включении.

Ограничение на предельную мощность поглощения вентиля определяется главным образом сильной зависимостью параметров геликонового резонатора от температуры. Температурные зависимости характеристик геликонового резонатора подробно рассмотрены в [3]. Показано, что при повышении температуры материала резонатора происходит смещение его резонансной частоты и уменьшение добротности и, как следствие, уменьшение обратного затухания и рост прямых потерь геликонового вентиля.

Таким образом, актуальной задачей является повышение предельной мощности рассеяния геликоновых вентилях путем снижения рабочей температуры геликоновых резонаторов за счет теплоотвода.

Целью настоящей работы является моделирование зависимости температуры геликонового резонатора от рассеиваемой мощности,

оценка предельно допустимой рассеиваемой мощности и поиск путей ее повышения.

Задача отвода тепла от геликонового резонатора тесно связана с конструкцией геликонового вентиля.

### 1. Конструкция геликонового вентиля

Геликоновый венти́ль представляет собой геликоновый резонатор с двумя ортогонально намотанными на него катушками индуктивности, помещенный в зазор магнитной системы, в котором создается сильное постоянное магнитное поле. Конструкция вентиля представлена на рис. 1.

Геликоновый резонатор представляет собой квадратную пластину полупроводника с соотношением толщины и поперечных размеров порядка 1:10. Для изготовления резонаторов используют узкозонные сильно легированные полупроводники n-типа с высокой подвижностью носителей. В настоящее время это, как правило, антимонид индия, легированный теллуром (n-InSb).

Катушки индуктивности наматывают медным лакированным проводом ПЭВ толщиной 0.18 мм вплотную. Пустоты при намотке заполняют теплопроводной кремнийорганической пастой КПТ-8. Полюсные наконечники и корпус магнитной системы изготавливают из стали СТЗ. Между ними располагаются постоянные магниты, изготовленные из сплавов Sm-Co или Nd-Fe-B. Зазор между полюсами магнитной системы также заполняется пастой КПТ-8.

Снаружи торцы магнитной системы соединяются с массивными радиаторами, такими, что при дальнейшем рассмотрении их температуру будем считать постоянной.

Из конструкции геликонового вентиля видно, что выделяющееся внутри резонатора тепло, будет распространяться преимущественно вдоль оси вентиля. Решение трехмерного уравнения теплопроводности для такой конструкции в общем случае затруднительно. Поскольку применяемые в геликоновых вентилях геликоновые резонаторы имеют поперечные по отношению к направлению распространения геликоновой волны размеры много больше толщины, то можно пренебречь распространением тепла в поперечном направлении и считать, что мощность рассеивается равномерно по площади резонатора. Тогда задачу теплопроводности геликонового вентиля можно свести к одномерному приближению.

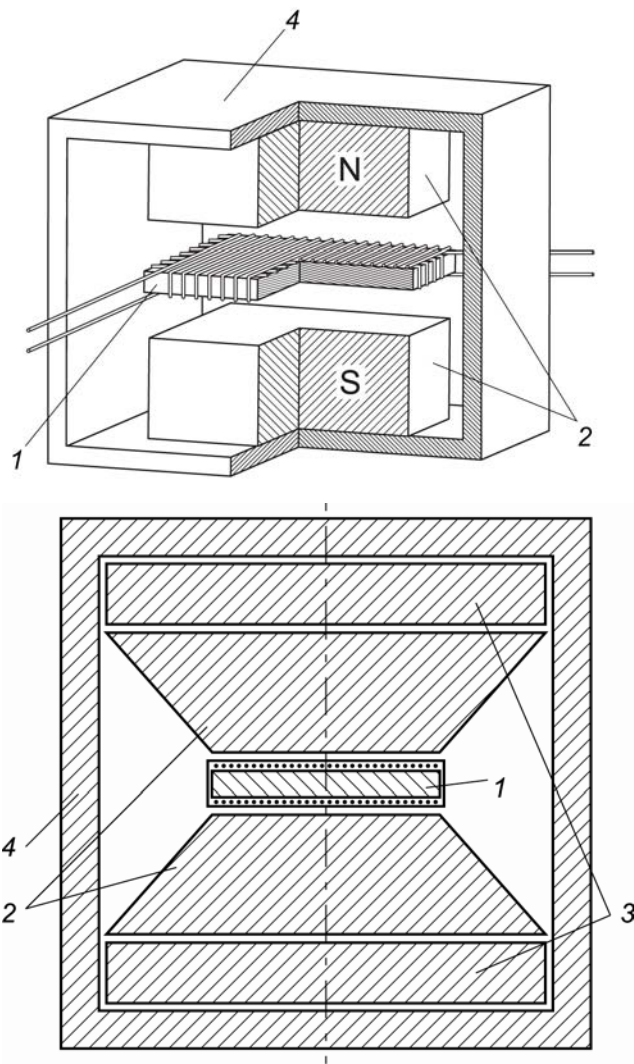


Рис. 1. Конструкция геликонового вентиля:  
1-геликоновый резонатор с катушками связи,  
2-полюсные наконечники, 3-постоянные магниты,  
4-корпус вентиля

**2. Модель теплопереноса в геликоновом вентиле**

Задача о распространении тепла в геликоновом вентиле сводится к одномерной тепловой задаче для слоистой среды с распределенными источниками тепла.

Методы решения таких задач описаны в [4,5].

Теплопроводящая структура в модели будет представлять собой внутренний слой (собственно резонатор) с теплопроводностью  $\lambda_0$  и толщиной  $2d$  и восемь внешних слоев, каждый из которых характеризуется теплопроводностью  $\lambda_i$  и толщиной  $h_i$ . Наружный слой соприкасается с радиатором, температуру которого считаем постоянной и равной  $T_0$ .

Координатную ось расположим вдоль оси вентиля (перпендикулярно слоям), начало ко-

ординат поместим в центре геликонового резонатора.

Выделение тепла происходит только во внутреннем слое. Стационарное уравнение теплопроводности для него можно записать в виде:

$$\lambda_0 \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} + f(x) = 0, \quad (1)$$

где  $f(x) = \frac{2P}{\pi S} \cos^2\left(\frac{\pi}{2d}x\right)$  - функция распределения источников тепла по толщине резонатора,  $P$  - суммарная рассеиваемая мощность,  $S$  - площадь резонатора,  $x = -d \dots d$ .

Прямое интегрирование полученного уравнения дает следующее общее решение:

$$T(x) = -\frac{2P}{\lambda_0 \pi S} \left[ \frac{x^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\pi}{2d}x\right) + C_1 x + C_2 \right] + T_0 \quad (2)$$

Здесь последнее слагаемое означает, что температура резонатора, в отсутствие рассеиваемой мощности, однородна и равна  $T_0$ .

Ввиду симметрии системы, дальнейшую задачу будем решать только для положительного направления координатной оси.

Температуры на границах оставшихся слоев при известной температуре на границе первого слоя и известном потоке мощности со стороны резонатора определяются рекурсивным алгоритмом по формулам, представленным в [5].

В результате, выражение для распределения температуры вдоль оси примет вид:

$$T(x) = \begin{cases} -\frac{2P}{\lambda_0 \pi S} \left[ \frac{x^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\pi}{2d}x\right) + C_1 x + C_2 \right] + T_0, & x = -d \dots d \\ -\frac{2P}{\lambda_0 \pi S} \left[ \frac{d^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} + C_1 d + C_2 \right] + T_0 - \frac{P}{\pi S} \sum_{k=1}^N \frac{h_k}{\lambda_k}, & x = \pm(d + h_N), \\ & N = 1 \dots M \end{cases} \quad (3)$$

где  $M$  - число слоев модели.

Константы интегрирования определяем из граничных условий. Первую – из условия симметрии конструкции геликонового вентиля.

$$\begin{aligned} T(-d) = T(d) &\Rightarrow -\frac{2P}{\lambda_0 \pi S} \left[ \frac{d^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} + C_1 d + C_2 \right] = \\ &= -\frac{2P}{\lambda_0 \pi S} \left[ \frac{d^2}{4} + \frac{d^2}{\pi^2} - C_1 d + C_2 \right] \\ \frac{2d^2}{\pi^2} - 2C_1 d &= 0 \Rightarrow C_1 = \frac{d}{\pi^2} \end{aligned}$$

Вторую – приравнявая температуру корпуса геликонового вентиля фиксированной температуре радиатора.

$$T(d+h_M) = T_0 \Rightarrow -\frac{2P}{\lambda_0\pi S} \left[ \frac{d^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} + C_1d + C_2 \right] + T_0 - \frac{P}{\pi S} \sum_{k=1}^M \frac{h_k}{\lambda_k} = T_0$$

$$-\frac{2P}{\lambda_0\pi S} \left[ \frac{d^2}{4} - \frac{d^2}{\pi^2} + \frac{d^2}{\pi^2} + C_2 \right] - \frac{P}{\pi S} \sum_{k=1}^M \frac{h_k}{\lambda_k} = 0$$

$$-\frac{2}{\lambda_0} \frac{d^2}{4} - \frac{2}{\lambda_0} C_2 - \sum_{k=1}^M \frac{h_k}{\lambda_k} = 0$$

$$C_2 = -\frac{d^2}{4} - \frac{\lambda_0}{2} \sum_{k=1}^M \frac{h_k}{\lambda_k}$$

Окончательное выражение для распределения температуры вдоль оси вентиля имеет следующий вид:

$$T(x) = \begin{cases} T_0 - \frac{2P}{\lambda_0\pi S} \left[ \frac{1}{4}(x^2 - d^2) - \frac{d^2}{\pi^2} \left( \sin\left(\frac{\pi}{2d}x\right) + 1 \right) \right] - \frac{\lambda_0}{2} \sum_{k=1}^M \frac{h_k}{\lambda_k}, & x = 0 \dots d \\ T_0 + \frac{P}{\pi S} \sum_{k=N}^M \frac{h_k}{\lambda_k}, & x = d + h_N, \quad N = 1 \dots M \end{cases} \quad (4)$$

### 3. Эксперименты и анализ

Экспериментальная проверка полученной модели проводилась для геликонового вентиля с резонатором размером  $10 \times 10 \times 1.3 \text{ мм}^3$  из антимонида индия, легированного теллуром с концентрацией донорной примеси  $2.1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  и теплопроводностью  $14 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Для модели теплопереноса выделены слои со следующими характеристиками:

Таблица 1. Слои модели теплопереноса в геликоновом вентиле

№	Материал	Толщина, мм	Теплопроводность Вт/м·К
0	n-InSb	0.65	14
1	Паста КПТ-8	0.05	0.85
2	Медный провод	0.2	380
3	Паста КПТ-8	0.05	0.85
4	Медный провод	0.2	380
5	Паста КПТ-8	0.1	0.85
6	Сталь	10	52
7	Магнит	5	12
8	Сталь	5	52

На рис. 2 представлены расчетные распределения температуры вдоль оси геликонового вентиля при различных величинах рассеиваемой мощности. Расчет производился при  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

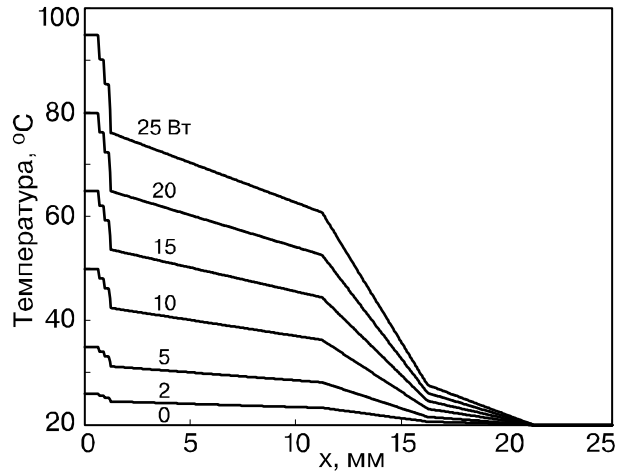


Рис. 2. Распределение температуры вдоль оси геликонового вентиля

На рис. 3 представлена расчетная зависимость разности температур геликонового резонатора и радиатора от величины рассеиваемой мощности. Точками обозначены экспериментальные результаты.

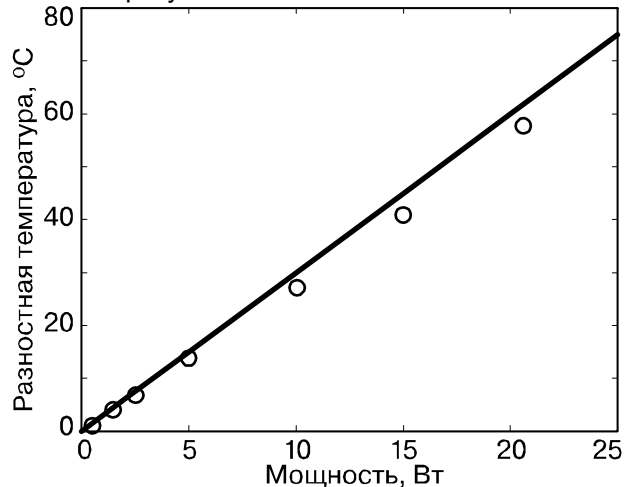
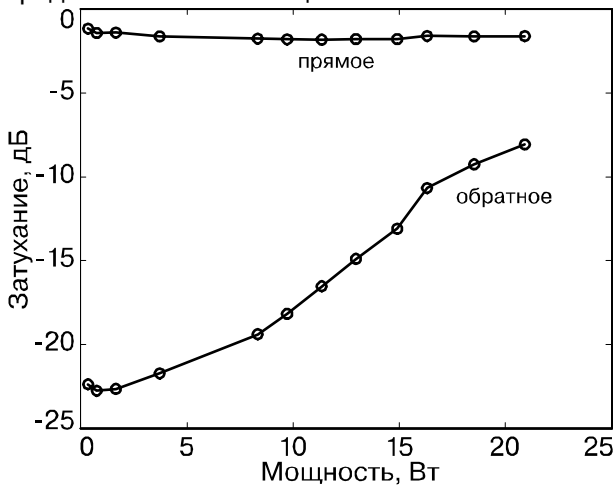


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная зависимости разности температур геликонового резонатора и радиатора от рассеиваемой мощности.

Температура резонатора измерялась термомпарой, холодный спай которой фиксировался при температуре радиатора. Отклонение характеристики от расчетной при высоких мощностях обусловлено рассогласованием вентиля за счет изменения характеристик геликонового резонатора при повышении температуры.

Для оценки предельных значений рассеиваемой мощности следует рассмотреть эксплуатационные характеристики вентиля при различных мощностях. На рис. 4 приведены результаты измерений прямого и обратного затухания

рассмотренного выше геликонового вентиля на средней частоте 35 МГц.



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости прямого и обратного затухания геликонового вентиля от рассеиваемой мощности.

Как видно из рисунка, характеристики вентиля при прямом включении существенно не меняются при изменении мощности в диапазоне 0...25 Вт. При обратном включении геликонового вентиля, обратное затухание сохраняется в допустимых пределах (больше 15 дБ) при мощности менее 12 Вт, а затем уменьшается до уровня 8,1 дБ при мощности 21 Вт. Температура на поверхности геликонового резонатора при этом составляла около 60 °С, что соответствует пороговым значениям характеристик геликонового резонатора для данной концентрации донорной примеси [3].

### Выводы

В работе рассмотрен стационарный режим теплопереноса внутри конструкции геликонового вентиля. Предложена одномерная модель,

позволяющая оценивать распределение температуры вдоль оси геликонового вентиля в зависимости от величины рассеиваемой мощности. Результаты моделирования показали приемлемое согласование с экспериментом.

Дальнейшим развитием работы будет внесение учета рассеиваемой мощности в общую модель невзаимного геликонового трансформатора и устройств на его основе [6]. Также перспективным представляется исследование стационарного теплопереноса в геликоновом вентиле при импульсных режимах работы.

### Литература

1. В.С. Вунтесмери, Ю.В. Завражнов, Г.П. Красилич, Е.Е. Мещеряков. Полупроводниковые вентили для радиопередатчиков КВ и УКВ диапазонов.- Теория и техника радиосвязи 1993, вып.1, с.132.
2. Лауринавичус Л.В., Мажейка Р.Б., Толутис Р.Б. Температурные характеристики геликоновых вентилях на легированном антимо-ниде индия, Известия Вузов СССР – Радио-электроника.- 1980.-Т. XXIV, №7.- С. 86-88.
3. Vountesmery V.S., Vountesmery Y.V. Temperature Characteristics of Broadband Helicon Isolators for Meter and Decameter Waves Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 55, Issue 10, Oct. 2007 Page(s):2097 – 2102.
4. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский Уравнения математической физики, М.: «Наука», 1977, 735 с.
5. В.В. Нащокин Техническая термодинамика и теплопередача, М:«Высшая школа» 1975, 496 с.
6. Vountesmery V.S., Vountesmery Y.V. Model of Helicon Isolator For Meter and Decameter Wave Ranges, Proceedings of the XIV International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications Poland, Gdansk, May 20-22, 2002.