

УДК 621.3.091.1

А.В. Убайчин

## Оценка возможности определения тепловых аномалий по собственному электромагнитному излучению в непроводящих средах

Рассматривается методика оценки возможности определения собственного электромагнитного излучения тепловых аномалий в диэлектрических средах при помощи радиометра на примере поиска скрытого радиозакладного устройства.

**Ключевые слова:** пассивная радиолокация, радиометр, радиотепловой контраст, радиозакладки, модель радиозакладного устройства, распространение волн в диэлектриках, тепломассообмен.

Анализ современного состояния вопросов противодействия промышленному шпионажу и иностранным техническим разведкам [1] диктует необходимость создания новых, более совершенных приборов для обнаружения радиозакладных устройств (РЗУ).

Наиболее распространенным прибором для обнаружения РЗУ является нелинейный локаатор (НРЛ) [1]. При поиске РЗУ нелинейными радиолокаторами, осуществляемом по наличию в их составе нелинейных элементов – полупроводников, возникает проблема селекции искусственных полупроводников – радиоэлектронных элементов, и естественных – структур типа «металл–окисел–металл» (МОМ), образующихся при контакте двух металлических тел через пленку окисла. В литературе хорошо описаны свойства МОМ-структур, а также способы их селекции. Несмотря на распространенность метода нелинейной локации и широкую номенклатуру НРЛ, в большинстве случаев достоверность способов селекции полупроводников не превышает 30% [1]. Существенным недостатком НРЛ является побочное электромагнитное излучение, возникающее при его работе и оказывающее неблагоприятное воздействие на оператора.

Методы пассивной радиолокации – определение свойств объекта по его собственному электромагнитному излучению, находят широкое применение для задач неразрушающего контроля внутренней температуры тел и поиска тепловых неоднородностей в непроводящих и полупроводящих средах [2]. Измеряя радиотепловой контраст – изменение радиояркостной температуры объекта и окружающей среды, определяются области с физической температурой, отличной от фоновой ( $T_0$ ). Область, в которой расположено РЗУ, вследствие потребления электрической мощности, будет обладать теплоконтрастом ( $\Delta T + T_0$ ).

Целью статьи является попытка описания методики обнаружения РЗУ по их собственному электромагнитному излучению, а не по наличию полупроводников в его составе.

**Модель радиозакладного устройства.** Простейшие РЗУ состоят из микрофона, устройства обработки и передатчика, непрерывно излучающего в радиоэфир. Наличие РЗУ такого типа в помещении легко определяется при помощи классических средств обнаружения: НРЛ, сканеры радиоэфира, детекторы высокочастотного поля и т.д.

Наиболее типичными местами установки РЗУ для несанкционированного снятия акустической информации являются помещения [3]. Имитируя наиболее вероятный случай размещения РЗУ с минимизацией визуального демаскирующего признака, местом установки является однородная диэлектрическая среда (случай, приближенный к размещению РЗУ в конструкциях, выполненных из строительных материалов типа: кирпич, бетон, штукатурка и т.д.).

Как показано в [3], наиболее часто применяются РЗУ, работающие в пассивном режиме записи акустического сигнала. Такие устройства находятся в экранирующем корпусе, что в значительной степени препятствует их обнаружению при помощи НРЛ (воздействие зондирующего излучения имеет недостаточный уровень для возникновения нелинейного отклика от искусственных полупроводниковых элементов РЗУ) и детекторов СВЧ-поля. Они передают накопленную информацию в сжатом виде по радиоканалу, что делает невозможным их обнаружение при помощи сканеров радиоэфира. В состав РЗУ, работающих в пассивном режиме записи, входят: микрофон (М), согла-

сущее усилительное устройство (СУУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), память (П), микроконтроллер (МК), передатчик (ПК) (рис. 1).

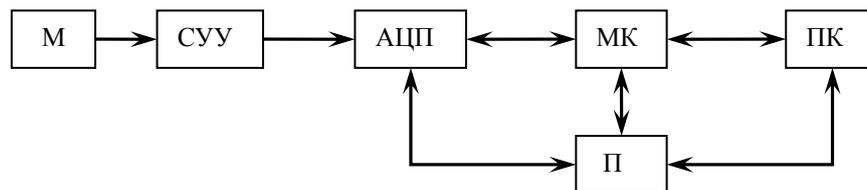


Рис. 1. Структурная схема радиозакладного устройства

Акустический сигнал поступает на микрофон и преобразуется в электрический, СУУ служит для обработки сигнала – усиление, фильтрация, нормирование. АЦП преобразует принятый электрический сигнал в цифровой код, микроконтроллер управляет АЦП, памятью и передатчиком для передачи накопленной информации.

**Расчет тепловых цепей.** Микросхема памяти – наиболее энергоемкая часть РЗУ. Выберем для дальнейшего моделирования РЗУ интегральную микросхему flash-памяти K9W8G08U1 (Samsung) [4].

Потребление тока микросхемой K9W8G08U1 при напряжении питания 5 В составляет 2 мА, потребляемая мощность – 10 мВт, что соответствует энергопотреблению микросхемы в режиме энергосберегающей записи [4].

Основываясь на методике, изложенной в [5], рассмотрим теплотехнические процессы интегральных микросхем. Тепловая мощность  $P_t$  связывается с разностью температур  $\Delta T$ , возникающей при прохождении теплового потока через участок тела с тепловым сопротивлением  $R_T$ :

$$P_t = \Delta T / R_T, \quad (1)$$

где  $R_T = d / (\lambda \cdot S)$  – тепловое сопротивление ( $\text{K} \cdot \text{Вт}^{-1}$ );  $d$  – толщина материала (м);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ );  $S$  – площадь поперечного сечения материала ( $\text{м}^2$ ).

Проведем расчет теплового режима полупроводникового прибора микросборки памяти на одном кристалле с использованием (1). Микросхемы памяти проектируются по функционально-узловому методу и при расчете теплотехнических процессов все функциональные части считают прямоугольными областями с равномерным тепловым сопротивлением во всем объеме.

Данные для расчета температуры кристалла в первом приближении:

- поперечная длина кристалла  $l = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;
- площадь основы  $S = 1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>;
- коэффициент теплопроводности (кремний)  $\lambda = 23$  Вт/м·К;
- коэффициент теплопроводности (клей)  $\lambda = 10$  Вт/м·К;
- толщина пленки клея  $\zeta = 1 \cdot 10^{-6}$  м;
- потребляемая мощность  $P = 10$  мВт;
- температура окружающей среды  $T_{\text{окр}} = 290$  К (17 °С).

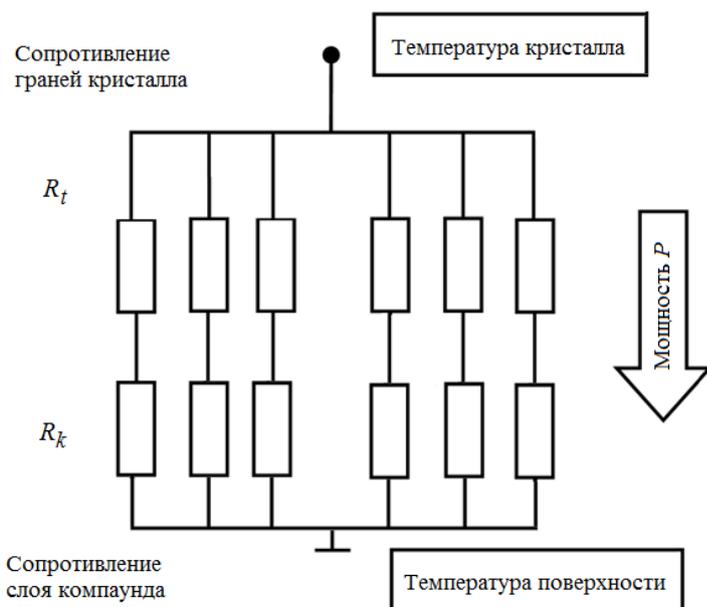
Температура кристалла рассчитана по формуле:

$$T_{\text{крист}} = P \cdot R_T + T_{\text{окр}}, \quad (2)$$

где  $P$  – потребляемая мощность;  $R_T$  – температурное сопротивление кристалла.

Тепловая схема соответствует шести параллельно соединенным цепям, состоящим из последовательно соединенных тепловых сопротивлений кристалла и компаунда ( $R_k$ ). Тепловой поток, генерируемый кристаллом микросхемы, распространяется до внешней среды с температурой  $T_0$ , на последовательно соединенных тепловых сопротивлениях возникает разность температур  $\Delta T$ . Разность  $\Delta T$  является искомым приращением температуры поверхности кристалла.

На рис. 2 изображены цепи распространения теплового потока. Общая точка тепловой схемы объединена для всех цепей, входящих в ее состав, так как тепловой поток распространяется к внешней среде с равной температурой по всем направлениям граней микросхемы. На рассматриваемом временном промежутке работы микросхемы тепловой процесс не вызывает разогрева окружающего пространства.



Выражая из (1) приращение температуры  $\Delta T$  и учитывая эквивалентное сопротивление тепловой схемы, получим:

$$\Delta T = R_{\text{экв}} \cdot P = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 263,598 = 2,6 \text{ К.}$$

Следовательно, физическая температура поверхности микросхемы равна

$$T_M = \Delta T + T_0 = 2,6 + 290 = 292,6 \text{ К.}$$

Рис. 2. Эквивалентная схема тепловых сопротивлений

**Расчет интенсивности излучения.** Основываясь на законе Релея–Джинса – приближении закона излучения Планка для радиодиапазона [6], проведем расчет интенсивности  $B$  электромагнитного излучения для объекта с температурой  $T_M = 292,6 \text{ К}$  в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц:

$$B = 2 \cdot k \cdot T \cdot (c/f)^{-2}, \quad (3)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ (Дж} \cdot \text{К}^{-1})$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура (К);  $f$  – частота излучения (Гц);  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}$  – скорость света в вакууме.

Использование диапазона СВЧ связано с несколькими причинами. Применение тепловизоров инфракрасного диапазона (ИК) длин волн для поиска РЗУ, несмотря на пространственную разрешающую способность ( $\approx 1 \text{ мм}$ ) и высокую чувствительность ( $\approx 0,05 \text{ К}$ ) неэффективно из-за недостаточной проникающей способности ИК-излучения. При этом измеряется поверхностная, а не глубинная температура исследуемой среды [8]. В отличие от ИК, диапазон СВЧ-длин волн обладает более высокой проникающей способностью в диэлектрические среды, что позволяет измерять глубинную температуру исследуемой среды, повышая тем самым достоверность обнаружения.

Затухание сигнала рассчитано по методике, изложенной в [9]. В расчетах диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 6 \dots 10$ . Учтена неидеальность диэлектрической среды в виде тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta = 0,05$  (рис. 3). Расчетные параметры диэлектрической среды схожи с электрическими параметрами бетона. Диапазон расчетных значений обуславливается изменением диэлектрических параметров среды в зависимости от влажности, температуры, давления, содержания различных примесей и концентрации компонентов.

На рис. 3 представлены результаты расчетов – зависимости затухания для различных частот и параметров среды.

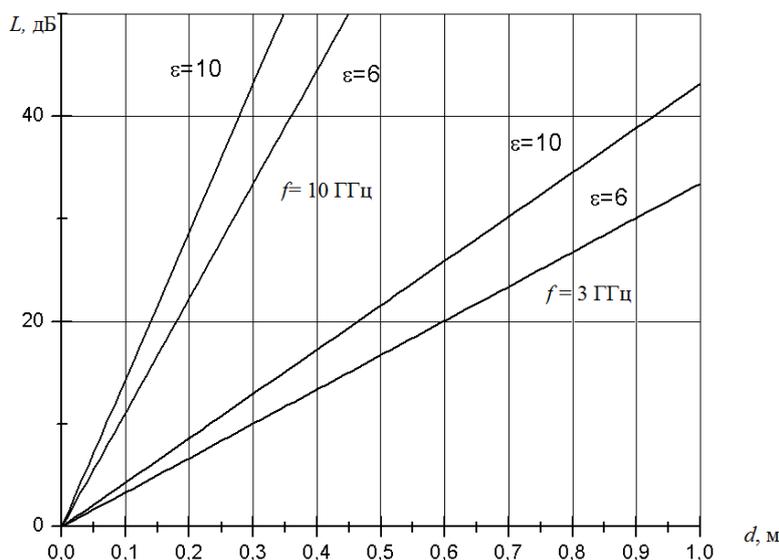


Рис. 3. Затухание сигнала в бетоне ( $\text{tg } \delta = 0,05$ )

График зависимости интенсивности излучения РЗУ, учитывая вносимое ослабление среды, представлен на рис. 4.

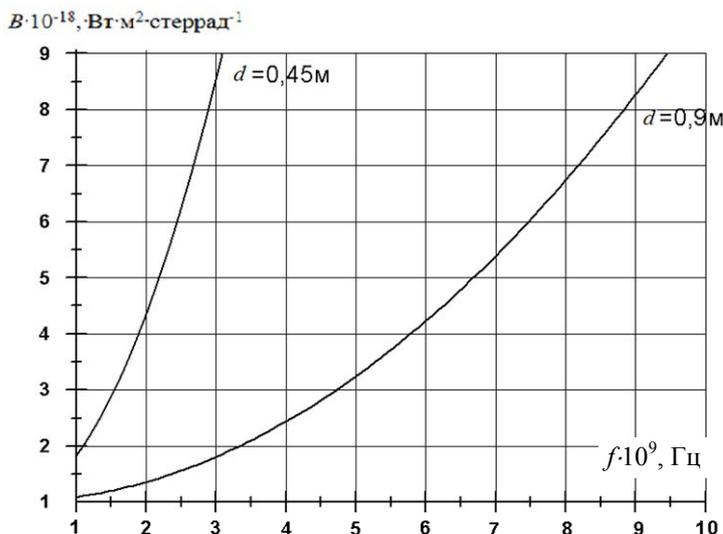
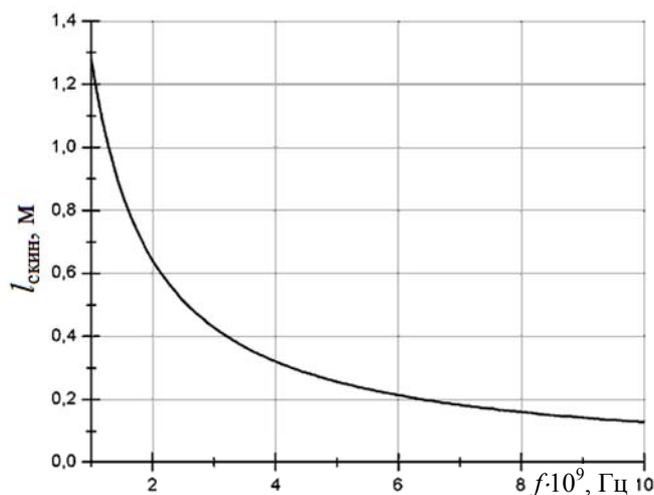


Рис. 4. Интенсивность излучения РЗУ, находящегося в бетоне



Для соотношения интенсивности излучения, вносимого ослабления и технических параметров радиометров рассчитан скин-слой – величина, характеризующая глубину проникновения электромагнитных волн в среду, на которой амплитуда поля затухает в  $e$  раз. Для известных параметров среды определен скин-слой как функция частоты (рис. 5)

Рис. 5. Зависимость скин-слоя от частоты

Минимальные размеры РЗУ зависят от конструкторско-технологических параметров и геометрических размеров элементов, входящих в ее состав. Исходя из [4], продольный размер РЗУ составляет не менее 2 см. Рассчитаем соответствующую максимальную длину волны, на которой разрешающая способность не более минимального поперечного размера РЗУ. Длина волны в среде может быть вычислена по выражению из [7]:

$$\lambda_C = 2 \cdot \Gamma = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_C}, \tag{4}$$

где  $\lambda_C$  – длина волны в диэлектрике (м),  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме (м).

Учитывая (4), длина волны в вакууме при  $\epsilon_c = 6$  (случай минимального укорочения длины волны) составит:

$$\lambda_0 = 2 \cdot \Gamma \cdot \sqrt{\epsilon_C} = \lambda_C \cdot \sqrt{\epsilon_C} = 4 \cdot \sqrt{6} = 4 \cdot 2,45 \approx 10 \text{ см}.$$

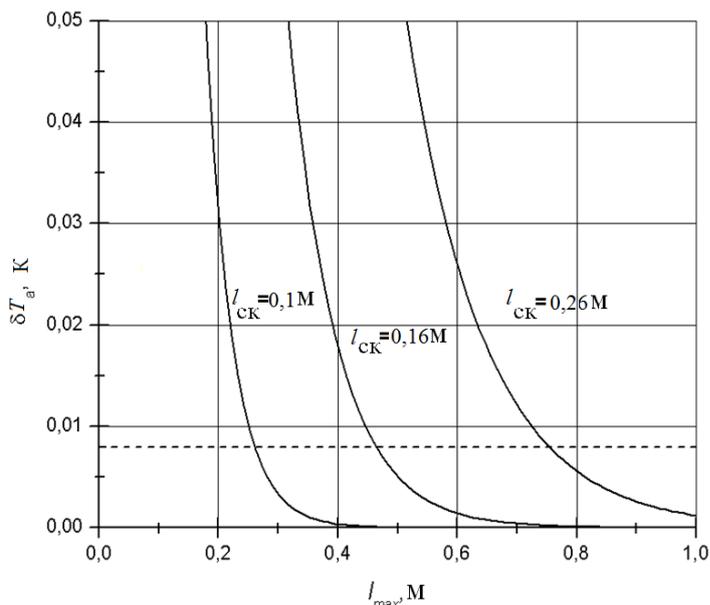
Соответствующая этой длине волны ее частота равна  $f_0 = 3 \text{ ГГц}$ . Искомая частота находится в S-диапазоне. Существующая элементная база, необходимая для создания радиометра для S-диапазона, имеет широкую номенклатуру и доступна на коммерческом рынке [10].

Максимальная глубина  $l_{\text{макс}}$ , на которой возможно определение температурной аномалии  $\Delta T$ , учитывая скин-слой и флуктуационную чувствительность радиометра, определяется из [8]:

$$l_{\text{макс}} = \frac{l_{\text{скин}}}{2} \cdot \ln\left(\frac{\Delta T}{\delta T}\right), \tag{5}$$

где  $l_{\text{скин}}$  – величина скин-слоя (м),  $\delta T$  – флуктуационная чувствительность радиометра (К).

Результаты расчетов представлены на рис. 6.



Флуктуационная чувствительность радиометра ( $\approx 0,01$  К), описанного в [11], сопоставлена с кривыми, отображающими различную глубину скин-слоя, зависящего от частоты и параметров поглощения среды.

При скин-слое, равном 10 см, и флуктуационной чувствительности 0,01 К, возможно определение температурной аномалии  $\Delta T = 2,6$  К на глубине не более 26 см. Такая величина глубины обнаружительной способности является сопоставимой с другими средствами обнаружения РЗУ.

Рис. 6. Оценка физической реализуемости прибора

В результате методика оценки возможности определения собственного электромагнитного излучения, вызванного работой скрытого радиозакладного устройства, в однородных диэлектрических средах при помощи радиометра выполняется следующим образом:

- Проводится оценка структурной схемы РЗУ и элементов, входящих в её состав, для анализа работы и наличия возможных демаскирующих признаков.
- Учитывая структурную схему РЗУ, оценивается потребляемая электрическая мощность элементов, входящих в состав РЗУ.
- Проводится оценка теплового сопротивления элементов РЗУ с построением тепловой схемы работы устройства.
- На основании расчетов тепловой схемы устройства определяется изменение температуры РЗУ в процессе его работы.
- Определяются электрические параметры среды, в которой расположено РЗУ.
- На основании электрических параметров оцениваются интенсивность излучения, затухание сигнала и скин-слой.
- Основываясь на параметрах структурной схемы РЗУ, определяются минимальные геометрические размеры устройства, с последующим расчетом максимальной длины волны исследуемого излучения, сопоставленной с пространственной разрешающей способностью в среде.
- Исходя из параметров длины волны излучения, скин-слоя и температурной аномалии, проводится расчет требуемой флуктуационной чувствительности радиометра, сопоставленной с требуемой глубиной максимального обнаружения и физической реализуемостью.

**Заключение.** Проведенные исследования позволяют судить о применимости методики обнаружения РЗУ различного типа и требуемых технических характеристик радиометра для обнаружения тепловой аномалии  $\Delta T$ , вызванной работой РЗУ. Моделирование показывает, что изменение температуры РЗУ вследствие потребления электрической мощности элементной базой, входящей в ее состав, является демаскирующим признаком. Анализ распространения собственного электромагнитного излучения в средах с поглощением, сопоставленный с основными техническими характеристиками микроволновых радиометров, показал возможность определения температурных аномалий  $\Delta T = 2,6$  К, вызванных работой РЗУ на глубинах не более 26 см при величине скин-слоя поглощающей среды 0,1 м.

#### Литература

1. Хорев А.А. Способы и средства защиты информации: учеб. пособие / А.А. Хорев. – М.: МО РФ, 1998. – 316 с.
2. Филатов А.В. Радиометрические системы нулевого метода измерений / А.В. Филатов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 276 с.

3. Вернигоров Н.С. Принцип обнаружения объектов нелинейным радиолокатором // Конфидент. – 1998. – № 5. – С. 45–57.
4. Samsung K9W8G08U1M Flash Memory. May 31. 2004. – 102 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/85482/SAMSUNG/K9W8G08U1M.html>, свободный (дата обращения: 07.07.11).
5. Матсон Э.А. Конструкции и технология микросхем: учеб. пособие / Э.А. Матсон. – Мн.: Выш. шк., 1985. – 207 с.
6. Краус Д.Д. Радиоастрономия / Д.Д. Краус. – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
7. Боков Л.А. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие / Л.А. Боков. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 214 с.
8. Поляков В.М. СВЧ-термография и перспективы ее развития. Применение в медицине и народном хозяйстве // Обзоры по электронной технике. – 1991. – Вып. 8 (1640). – 58 с.
9. Штейншлегер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 142, вып. 1. – С. 131–145.
10. Метод авторегулирования нулевого баланса в радиометрических системах / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, А.О. Чудинов, Е.И. Розина // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 4. – С. 220–233.
11. Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков // Радиотехника. – 2011. – № 1. – С. 47–55.

---

**Убайчин Антон Викторович**

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: +7-952-883-67-67

Эл. почта: [dualog@mail.ru](mailto:dualog@mail.ru)

Ubaychin A.V.

**The capability of thermal anomaly detection by self electromagnetic radiation at non-conducting medium**

The paper shows the estimation procedure of the electromagnetic reradiation determining possibility at lossy medium by radiometer. This reradiation is caused by the hidden listening device operation.

**Keywords:** radiothermograph, radiothermocontrast, hidden listening device, foreign technical intelligence resistance, hidden listening device model, lossy medium.