

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

Ilin Oleg Igorevich

E-mail: ru.saint@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Student.

УДК 534.21:536.21

Е.А. Рындин, Б.Г. Коноплев, В.В. Винарьева

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА*

Разработана модель наноразмерных термоакустических излучателей на основе нестационарного уравнения теплопроводности и программные средства численного моделирования. Исследована динамика изменения температуры в термоакустическом излучателе и в окружающей воздушной среде. Получены зависимости амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя от частоты входного сигнала, от расстояния между излучателем и теплоотводом (подложкой), от площади поперечного сечения стержней излучателя. Выполнена оценка мощности, отводимой от прибора посредством излучения. Проведен анализ результатов численного моделирования наноразмерных термоакустических излучателей.

Термоакустика; акустический излучатель; модель; программа моделирования.

E.A. Ryndin, B.G. Konoplev, V.V. Vinaryeva

MODELING OF NANODIMENSIONAL ACOUSTIC SPEAKERS ON THE BASIS OF THERMOACOUSTIC EFFECT

The model of nanodimensional thermoacoustic radiators on the basis of the non-stationary equation of heat conductivity and software of numerical modeling is developed. Dynamics of temperature in a thermoacoustic radiator and in the surrounding air environment is investigated. Dependences of amplitude of temperature of cores of a thermoacoustic radiator on frequency of an input signal, on distance between a radiator and a heat-conducting path (substrate), from the area of cross-section section of cores of a radiator are received. The estimation of the power which is taken away from the device by means of radiation is executed. The analysis of results of numerical modeling is carried out.

Thermoacoustics; an acoustic speaker; model; the modeling program.

В настоящее время исследования по термоакустике, изучающей взаимные преобразования тепловых и звуковых потоков, фактически объединены в специальный раздел акустики. Описанию способов возбуждения звука с помощью тепла посвящена работа Рэлея [1], первое издание которой вышло в 1877 г. Сам Рэлей ссылается на работы Фарадея, Зеебека, Тиндаля, выполненные в первой половине XIX века, когда данные эффекты представляли чисто научный интерес и были лишь изящными, достаточно сложными примерами неустойчивости [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракты № П1224 от 27.08.2009 г. и № 16.740.11.0425 от 03.12.2010, проект 2.1.2/10229).

С учетом последних достижений в микро- и нанотехнологии, изучение термоакустических колебаний приобрело практическую направленность, в частности, для создания звуковых излучателей.

Данная работа посвящена разработке модели и программы моделирования звуковых излучателей на основе термоакустического эффекта.

Рассматриваемая двухмерная модель термоакустического излучателя схематически представлена на рис. 1. Основными элементами данной геометрической модели являются проводящие стержни микро- или наноразмерного прямоугольного сечения (1), расположенные в некоторой (в рассматриваемом случае – воздушной) среде (2) на определенном расстоянии от подложки.

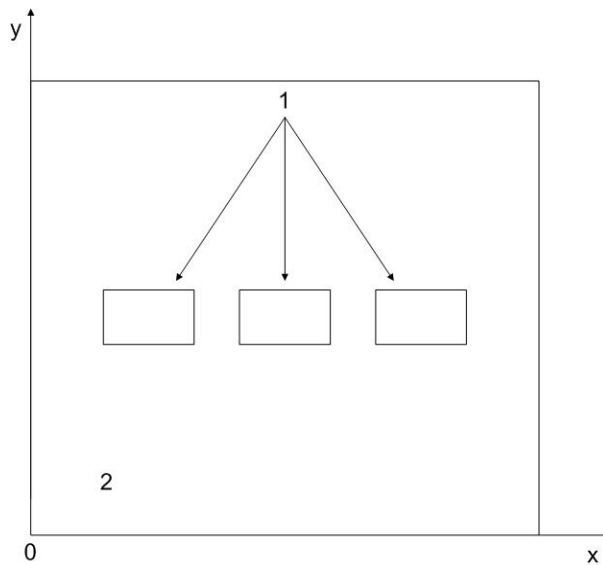


Рис. 1. Геометрическая модель термоакустического излучателя:
1 – сечение проводящих стержней; 2 – окружающая среда

Через проводящие стержни пропускаются импульсы тока определенной частоты. Вследствие малого сечения проводящих стержней, изменение их температуры может происходить с достаточно высокой частотой (в рассматриваемом случае – с частотой звуковых колебаний). В результате изменения температуры стержней и передачи тепла в окружающую среду вокруг них образуется фронт изменения давления, распространяющийся со скоростью звука в среде. Таким образом, происходит формирование звуковой волны без механических колебаний излучающего элемента.

Для анализа нестационарного распределения температуры в проводящих стержнях и в окружающей среде решалось нестационарное уравнение теплопроводности для двух измерений, т.е. в предположении, что длина стержней значительно превосходит их поперечные размеры, вследствие чего в центральных областях стержней изменениями температуры в продольном направлении (перпендикулярном плоскости рис. 1) можно пренебречь.

Предполагалось, что область моделирования ограничена теплоотводом, температура T которого поддерживается постоянной, т.е. на границах области моделирования задавались граничные условия первого рода:

$$T = \text{const.}$$

В процессе моделирования проводилась оценка тепловой мощности, отводимой от стержней посредством излучения.

Результаты численного решения описанной выше системы уравнений, полученные с использованием разработанной программы моделирования для различных площадей поперечного сечения проводящих стержней, расстояний от центра стержня до теплоотводящих поверхностей (границ области моделирования), различных частот и форм входных импульсов, выборочно приведены на рис. 2–6.

Зависимость амплитуды изменения температуры стержней от частоты входного сигнала, приведенная на рис. 3, свидетельствует о нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) термоакустического излучателя.

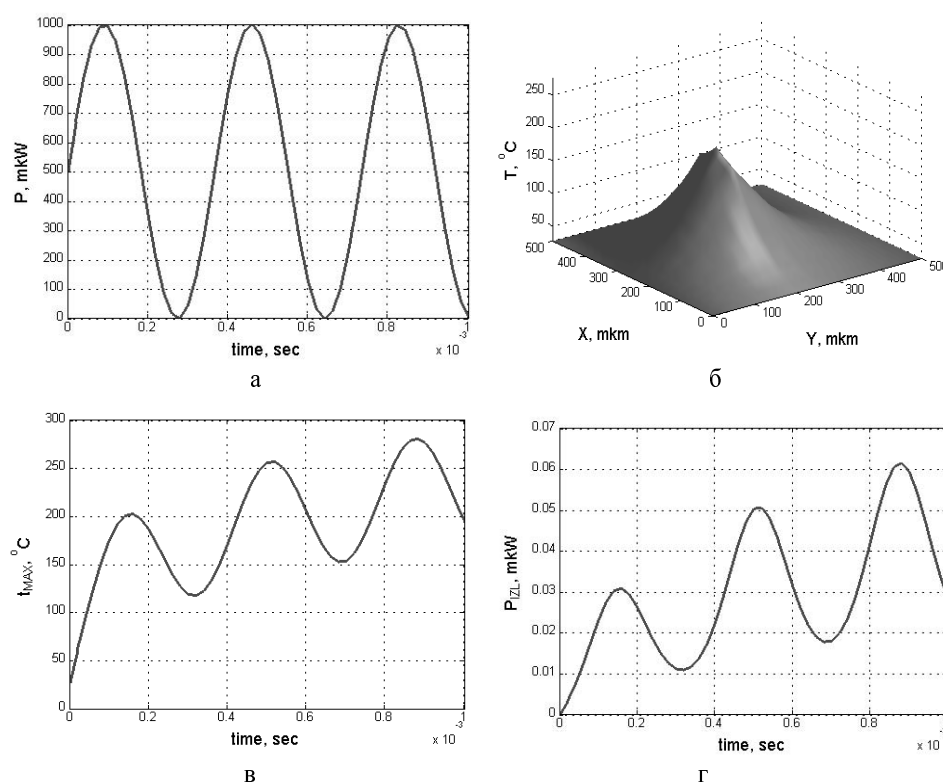


Рис. 2. Результаты моделирования температуры в термоакустическом излучателе с тремя стержнями для гармонической формы входного сигнала: а – зависимость входной мощности, подводимой к термоакустическому излучателю, от времени; б – распределение температуры по координатам в стержнях и окружающей воздушной среде; в – зависимость максимальной температуры в стержнях от времени; г – временная зависимость тепловой мощности, отводимой от стержней посредством излучения

Учитывая, что исследуемый термоакустический излучатель является интегральным устройством, важным является изучение влияния расстояния от стержней до подложки, являющейся, по существу, теплоотводом. При уменьшении расстояния от стержней излучателя до подложки отвод тепла ускоряется, что приво-

дит к росту скорости охлаждения стержней при снижении входной мощности и снижению скорости их нагрева при увеличении мощности на входе устройства. Первый из перечисленных факторов способствует увеличению амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя, а второй, напротив, приводит к ее уменьшению. Приведенная на рис. 4 зависимость амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя от расстояния между стержнями и теплоотводом показывает, что второй фактор несколько превалирует над первым, что приводит к определенному (менее 10 %) уменьшению амплитуды изменения температуры стержней при уменьшении расстояния между стержнями и теплоотводом в 5 раз.

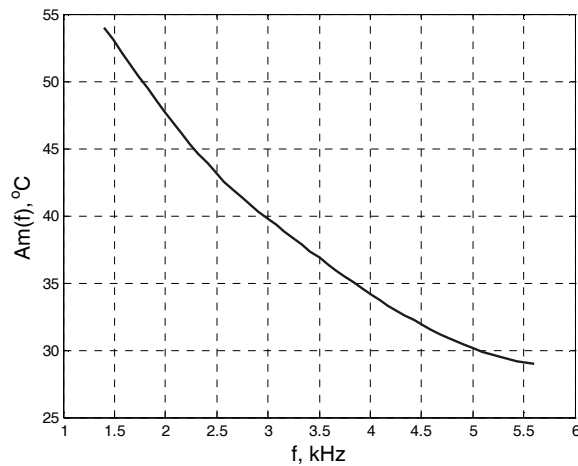


Рис. 3. Зависимость амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя от частоты входного сигнала

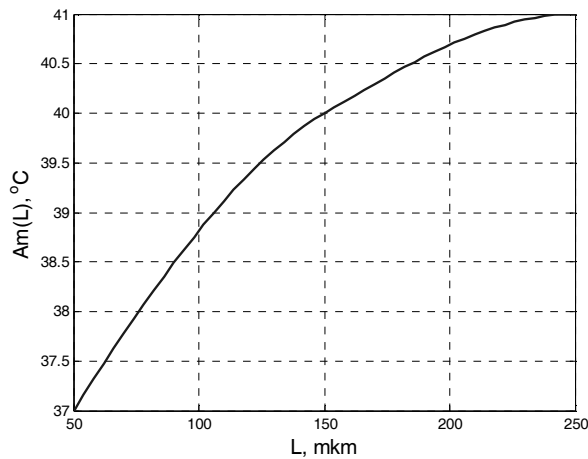


Рис. 4. Зависимость амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя от расстояния между стержнями и теплоотводом

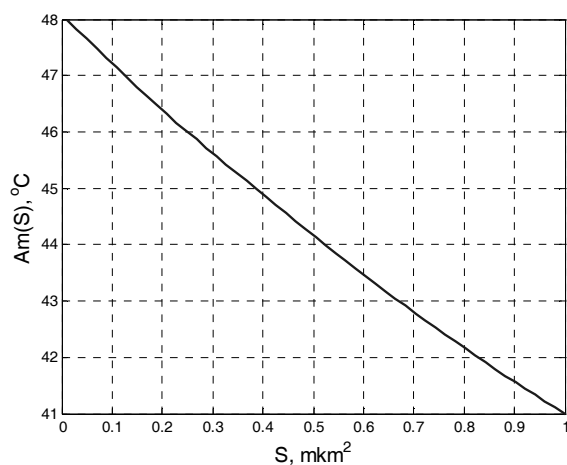


Рис. 5. Зависимость амплитуды изменения температуры стержней от площади их поперечного сечения

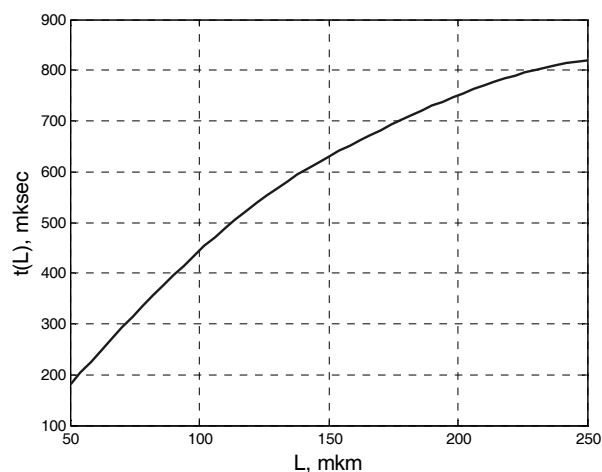


Рис. 6. Зависимость длительности переходного процесса в термоакустическом излучателе от расстояния между стержнями и теплоотводом

Представленная на рис. 5 зависимость свидетельствует об увеличении амплитуды изменения температуры стержней на 15 % при уменьшении площади их поперечного сечения с $(1 \times 1) \text{ мкм}^2$ до $(100 \times 100) \text{ нм}^2$. Таким образом, уменьшение площади поперечного сечения стержней приведет к повышению эффективности термоакустического излучателя.

В соответствии с рис. 6 длительность переходного процесса в термоакустическом излучателе при указанных размерах элементов составляет 200–800 мкс.

Полученные результаты численного моделирования могут быть использованы при разработке конструкций интегральных термоакустических микроизлучателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рэлей Дж.У.С. Теория звука. ГТТИ, 1944. Т.2. – 347 с.
2. http://www.akin.ru/spravka/s_lect1.htm.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Н. Рыгалин.

Коноплев Борис Георгиевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

Винарьева Валерия Валерьевна

Магистрант.

Рындин Евгений Адальбертович

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

Ryndin Eugeny Adalbertovich

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Vinaryeva Valeriya Valerevna

Undergraduate.

УДК 621.3.049.77

Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, И.Е. Лысенко

**УСТРОЙСТВО ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ЕМКОСТНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ УГЛОВЫХ
СКОРОСТЕЙ***

Разработаны структурная и электрическая принципиальная схемы интегрального устройства обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханического гироскопа на основе анализа частоты огибающей сигнала биений, формируемого генераторами гармонических колебаний, в частотоподающие цепи которых включены емкостные преобразователи микромеханического гироскопа, работающие в противофазе. Получены резуль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственные контракты №П1224 от 27.08.2009г. и № 16.740.11.0425 от 03.12.2010, проект 2.1.2/10229).