

УДК 535.3

*Б. Бейранванд¹, А. С. Соболев^{1,2}, А. В. Кудряшов¹*¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)²ИРЭ имени В. А. Котельникова РАН

Гибридная линия передач с интегрированной цепочкой термопар для генерации терагерцового излучения

Мы предлагаем концепцию новой термоэлектрической структуры для генерации микроволнового и терагерцового излучения под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Структура состоит из последовательной цепочки термопар с емкостной связью, образующих гибридную линию передач. Такая линия легко интегрируется с микрополосковой линией передач, обладает аномальной дисперсией и сверхсветовой фазовой скоростью, что важно для синфазного сложения отклика от всех термопар. Представлены расчетные дисперсионные кривые, полученные из эквивалентной схемы элементарной ячейки и численного моделирования.

Ключевые слова: Терагерцовое и микроволновое излучение, цепочка термопар, гибридная линия передачи, аномальная дисперсия.

*B. Beiranvand¹, A. S. Sobolev^{1,2}, A. V. Kudryashov¹*¹Moscow Institute of Physics and Technology²Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS (IRE)

Hybrid transmission line with integrated thermocouple chain for generating terahertz radiation

We present a new concept of the thermoelectric structure that generates microwave and terahertz signals when illuminated by femtosecond optical pulses. The structure consists of a series array of capacitively coupled thermocouples. The array acts as a hybrid type microwave transmission line with anomalous dispersion and phase velocity higher than the velocity of light. This allows for adding up the responses from all the thermocouples in phase. The array is easily integrable with microstrip transmission lines. Dispersion curves obtained from both the lumped network scheme and numerical simulations are presented.

Key words: terahertz and microwave generation, array of thermocouple, hybrid transmission line, anomalous dispersion.

1. Введение

Терагерцовые и субмиллиметровые устройства перспективны для задач неразрушающего контроля [1], медицинской диагностики [2–4] и средств высокоскоростной передачи данных [5]. В настоящее время задача по разработке компактных и мощных источников излучения данного диапазона не теряет своей актуальности. Существует обширный класс широкополосных терагерцовых генераторов, принцип работы которых основан на создании пикосекундных импульсов фотоиндуцированного напряжения в полупроводниковых структурах [6–8]. Такие генераторы излучают в диапазоне от 100 ГГц до нескольких ТГц. Их спектр определяется не только процессами релаксации неравновесных носителей тока, но и конструкцией фотопроводящей антенны. В данной работе мы предлагаем структуру,

© Бейранванд Б., Соболев А. С., Кудряшов А. В., 2020

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2020

состоящую из последовательной цепочки металлических термопар, в которой импульсы напряжения с широким спектром в миллиметровом и терагерцовом диапазонах могут возбуждаться под действием импульсной оптической накачки от фемто- или пикосекундного лазера.

2. Концепция генератора

Фотон в твердом теле всегда поглощается одним электроном, энергия которого возрастает за время порядка 1 фс. Избыточная неравновесная энергия возбужденного электрона передается другим электронам с характерным для металлов временем межэлектронного взаимодействия 100 фс [9, 10]. Это время также определяет скорость изменения хипотенциала под воздействием внешнего оптического сигнала и, следовательно, время возникновения термоЭДС. Скорость спада термоЭДС связана с рассеянием энергии горячих электронов на оптических фононах, время которого при комнатной температуре составляет порядка 1 пс. Таким образом, в металлической термопаре при помощи фемтосекундной оптической накачки можно создать импульсы с временем роста 100 фс и временем спада 1 пс. Такой импульс имеет широкий спектр, затрагивающий область частот выше 1 ТГц. На рис. 1 показана схема объединения термопар в последовательную цепочку с емкостной связью. Подложка с термопарами лежит на проводящей поверхности, выполняющей роль экранирующей плоскости (заземления) и являющейся составной частью образующейся линии передачи. Такое решение позволяет суммировать высокочастотный отклик без применения дифференциальной схемы, которая используется при омическом соединении термопар в последовательной цепочке и требует создания температурной разности на соседних контактах. В предлагаемой схеме каждая термопара создает напряжение $\Delta V = Te(\alpha_2 - \alpha_1)$, где α_1 и α_2 – постоянные Зеебека металлов, образующих термопару, а Te – температура горячих электронов. Величина Te может достигать 2000–3000 К, поскольку теплоемкость электронного газа в металле более чем на порядок меньше фононной теплоемкости [10]. Например, в контакте Ti–Pd при $Te = 1000$ К возникнет напряжение $\Delta V = 20$ мВ. Синфазное сложение термоЭДС возможно благодаря превращению цепочки термопар в присутствии экранирующей плоскости в гибридную линию передач с фазовой скоростью, превосходящей скорость света в вакууме. Сгенерированную таким образом мощность можно направить в линию передач или подвести к излучающей антенне.

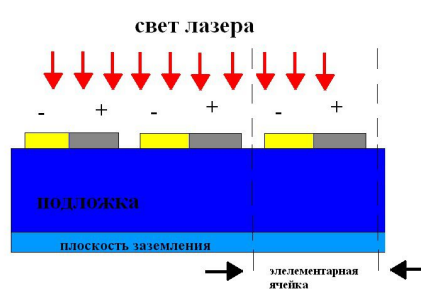


Рис. 1. Схема расположения цепочки термопар с емкостной связью на подложке и элементарная ячейка

3. Модель гибридной линии передачи

На рис. 2а показана расчетная модель элементарной ячейки гибридной линии передач, которая содержит одну термопару с емкостными зазорами. Ячейка встроена в микрополосковую линию с двумя волноводными портами. Опорные плоскости портов находятся на

границе ячейки в середине емкостных зазоров. Термопара представлена в виде однородной полоски из идеального проводника длиной 2.8 мм и шириной 45 мкм. Расстояние до экранирующей плоскости (плоскости заземления) определяется толщиной подложки, на которой изготавливается структура. В приведенной модели подложка из кремния имеет толщину 500 мкм. Показанная на рис. 2б эквивалентная схема ячейки на сосредоточенных элементах соответствует гибридной линии передач, которая объединяет в себе элементы линии передач с нормальной и аномальной дисперсией [11, 12]. Здесь R – описывает не только омические, но и излучательные потери, на которые также влияет проводимость G , C_L – емкость зазора, L_R – погонная индуктивность, C_R – погонная емкость между цепочкой термопар и экранирующей плоскостью. Матрица рассеяния ячейки рассчитана методом конечных разностей во временной области с поглощающими граничными условиями. Такой подход позволяет оценить излучательные потери, которые значительно превосходят омические из-за синфазного возбуждения цепочки щелей, благодаря которой линия передач превращается в антенну бегущей волны.

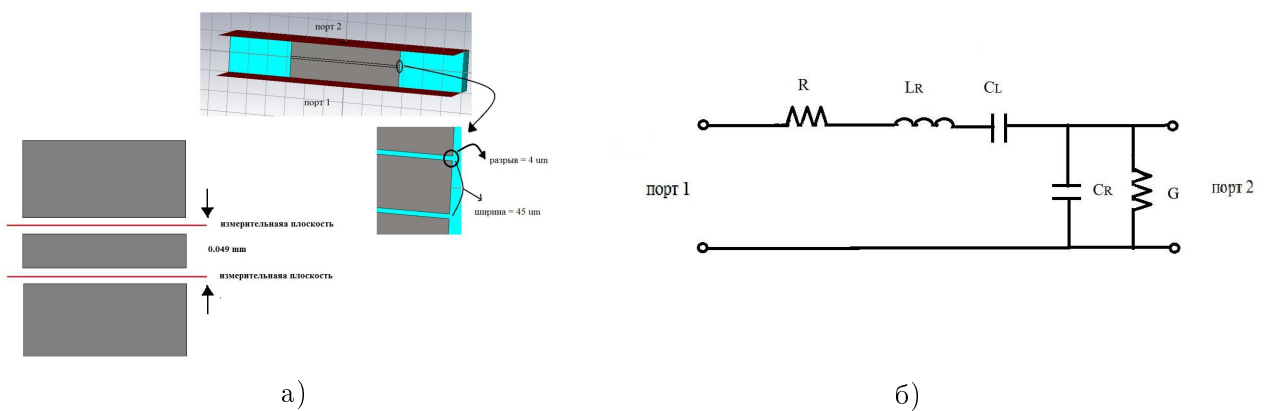


Рис. 2. (а) Общий вид элементарной ячейки, (б) Эквивалентная схема линии передачи

4. Результаты расчета

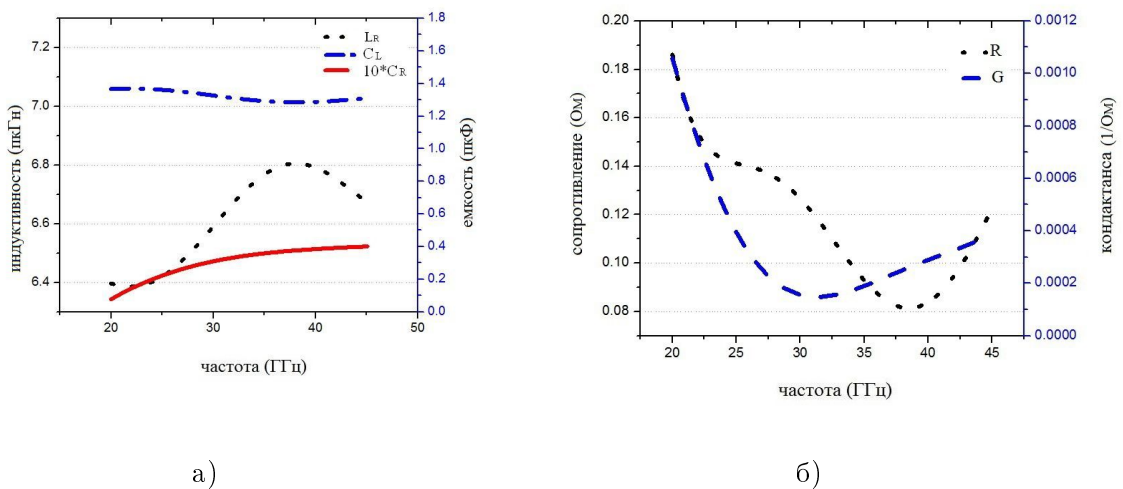


Рис. 3. Значение сосредоточенных элементов эквивалентной схемы: (а) C_L , C_R и L_R ; (б) R и G

В ходе численного моделирования элементарной ячейки рассчитывалась двухпортовая матрица импедансов. Действительные и мнимые части Z_{21} позволяют найти C_R и G , а

$R = \text{Re}(Z_{11}) - 1/G$. Значения L_R и C_L находилась из системы двух уравнений, в которых использовались расчетные значения $\text{Im}(Z_{11})$, рассчитанные на двух близких частотах.

Получившиеся расчетные зависимости всех сосредоточенных параметров в диапазоне 20–45 ГГц представлены на рис. 3. Значения некоторых параметров зависят от частоты, поскольку с частотой меняется распределение тока и излучательные потери. На рис. 4 приведены расчетные дисперсионные кривые, полученные из численного моделирования и из эквивалентной схемы с использованием показанных на рис. 3 зависимостей. Волновой вектор k определяется в виде $ik = \alpha + i\beta = \sqrt{ZY}$, где

$$Z = R + (i\omega L_R) + \left(\frac{1}{i\omega C_L}\right), \quad (1)$$

$$Y = G + (i\omega C_R). \quad (2)$$

Параметр α соответствует затуханию, а β – фазовой скорости. Нулевое значение β означает бесконечную фазовую скорость, когда все термопары, составляющие гибридную линию передач, могут возбуждаться синфазно. В этом случае все термоЭДС складываются, а генерируемая цепочкой мощность растет пропорционально квадрату числа термопар. Из частотных зависимостей β следует, что в гибридной линии с представленными геометрическими параметрами реализуется бесконечная фазовая скорость V_{ph} в диапазоне от 27 ГГц до 37 ГГц. На более высоких частотах β принимает отрицательное значение, что соответствует режиму аномальной линии передач, когда V_{ph} и групповая скорости противоположно направлены. Такая структура проста в изготовлении и может быть измерена при помощи стандартного и широко распространенного коммерчески доступного оборудования. Для увеличения частот с бесконечной V_{ph} и продвижения в субмиллиметровую область нужно увеличивать резонансную частоту последовательного $L_R C_L$ контура, например, уменьшая C_L при помощи увеличения зазора между термопарами. Также можно уменьшить период следования щелей, увеличив количество термопар на единицу длины гибридной линии.

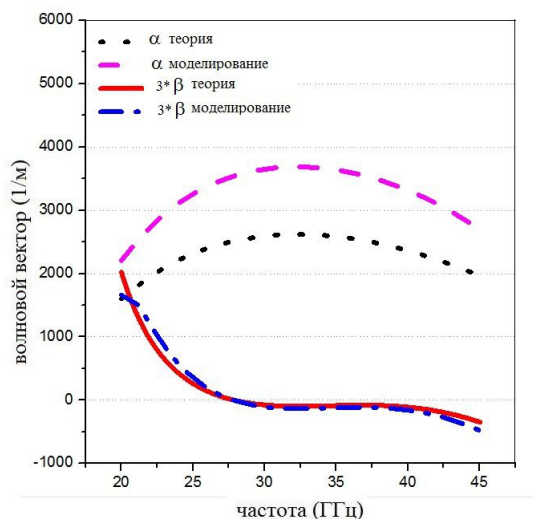


Рис. 4. Дисперсионные кривые гибридной линии передач, рассчитанные численно и при помощи эквивалентной схемы

Сопротивление r квадрата металлической пленки толщиной 30 нм по постоянному току составляет порядка 3 Ом. Поскольку толщина скин-слоя в терагерцовом диапазоне много больше 30 нм, то это сопротивление можно считать равным сопротивлению потерь на этих частотах. В представленной линии передач потери будут, как минимум, вдвое меньше из-за наличия токов смещения в зазорах между полосками. Рассмотрим секцию представленной

гибридной линии, длина которой равна ширине 2.8 мм (один квадрат). На длине 2.8 мм помещается 62 термопары. Как было показано в работе [9], фемтосекундные импульсы могут разогреть электроны в тонких золотых пленках до температуры $Te = 3000$ К без разрушения пленок, поскольку теплоемкость электронов на порядок меньше теплоемкости фононов. В паре Ti–Au основное поглощение оптической мощности происходит в Ti. В однородных сверхтонких Ti пленках поглощение составляет не менее 20% и сильно зависит от длины волны. Суммарная термоЭДС ε в цепочке будет

$$\varepsilon = (S_{Au} - S_{Ti})Te \cdot N, \quad (3)$$

где $N = 64$ (число термопар), а S_{Au} и S_{Ti} – коэффициенты Зеебека золота и титана. При нагреве электронов до $Te = 3000$ К получаем амплитуду $\varepsilon = 11$ В. Импульс напряжения имеет длительность $\delta t = 1$ пс порядка времени взаимодействия электрона с оптическим фононом. Цепочка термопар работает как неидеальный источник ЭДС с внутренним сопротивлением r . Если гибридная линия передач закорочена с одной стороны, а с другой стороны подключена к микрополосковой линии с волновым сопротивлением $Z0$, то эквивалентная схема такого устройства будет представлять из себя последовательное подключение сопротивлений r и $Z0$ к идеальному источнику ЭДС величиной ε . При частоте следования оптических импульсов ν среднюю мощность терагерцового или микроволнового сигнала, передаваемого в линию передач, можно оценить по формуле

$$P_{mw} = \frac{\varepsilon^2 Z0 \Delta t}{(r + Z0)^2 \sqrt{2}} \cdot \nu. \quad (4)$$

В соответствии с этой формулой максимальная мощность будет передаваться в согласованную микрополосковую линию при $Z0 = r$. Для реалистичных значений $Z0 = 50$ Ом, $\nu = 100$ кГц и оценочного $\varepsilon = 11$ В, получаем $P_{mw} = 0.17$ мкВт. Стоит заметить, что приведенные геометрические параметры гибридной линии рассчитаны на синфазное сложение термоЭДС в диапазоне 30–40 ГГц, удобном для экспериментального измерения при помощи существующих коммерчески доступных усилителей миллиметрового диапазона. При продвижении в терагерцовую область размеры термопары уменьшатся более чем в 20 раз, во столько же увеличится число термопар N в линии длиной 3 мм. При этом мощность P_{mw} возрастет пропорционально N^2 .

5. Заключение

Разработана концепция широкополосного генератора миллиметрового и терагерцового диапазонов на основе цепочки термопар с емкостной связью, образующих гибридную линию передач с бесконечной фазовой скоростью и возбуждаемой оптическими импульсами от фемтосекундного лазера. Представлена численная модель такой гибридной линии, а также результаты численного моделирования ее дисперсионных характеристик в диапазоне 20–45 ГГц. Проведено сравнение результатов моделирования с расчетом в рамках эквивалентной схемы элементарной ячейки на сосредоточенных элементах.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00785а и № 18-07-00743а.

Литература

1. Abina A., Puc U., Jeglic A., Zidansek A. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials // Applied spectroscopy reviews. 2015. V. 50, N 41. P. 279–303.

2. *Fitzgerald A.J., Berry E., Zinovev N.N., Walker G.C., Smith M.A., Chamberlain J.M.* An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation // *Physics in Medicine and Biology*. 2002. V. 47, N 7. P. R67.
3. *Hafez H.A., Chai X., Ibrahim A., Mondal S., Ropagnol X., Ozaki T.* Intense terahertz radiation and their applications // *Journal of Optics*. 2016. V. 18, N 9. P. 093004.
4. *Perenzoni M., Paul D.J.* Physics and applications of Terahertz radiation. Springer, 2014.
5. *Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C.* Advances in terahertz communications accelerated by photonics // *Nature Photonics*. 2016. V. 10, N 6. P. 371–379.
6. *Zhang C.X., Xu J.* «Generation and Detection of THzWaves» in *Introduction of THz wave photonics*. Springer, 2010. P. 27–48.
7. *Blanchard F., Sharma G., Razzari L., Ropagnol X., Bandulet H.C., Vidal F., Morandotti R., Kieffer J.C., Ozaki T., Tiedje H. [et. al.]*. Generation of intense terahertz radiation via optical methods // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. V. 17, N 1. P. 5–16.
8. *Yang S., Hashemi M.R., Berry C.W., Jarrahi M.* 7.5% Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters With Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2014. V. 4, N 5. P. 575–581.
9. *Rethfeld B., Kaiser A., Vicanek M., Simon G.* Ultrafast dynamics of nonequilibrium electrons in metals under femtosecond laser irradiation // *Physical Review B*. 2002. V. 65, N 21. P. 214303.
10. *Lee J.B., Kang K., Lee S.H.* Comparison of theoretical models of electron-phonon coupling in thin gold films irradiated by femtosecond pulse lasers // *Materials transactions*. 2011. V. 52, N 3. P. 547–553.
11. *Lai A., Itoh T., Caloz C.* Composite right/left-handed transmission line metamaterials // *IEEE microwave magazine*. 2004. V. 5, N 3. P. 34–50.
12. *Liu Z., Hon P.W., Tavallaee A.A., Itoh T., Williams B.S.* Terahertz composite right-left handed transmission-line metamaterial waveguides // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 100, N 7. P. 071101.

References

1. *Abina A., Puc U., Jeglic A., Zidansek A.* Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials. *Applied spectroscopy reviews*. 2015. V. 50, N 41. P. 279–303.
2. *Fitzgerald A.J., Berry E., Zinovev N.N., Walker G.C., Smith M.A., Chamberlain J.M.* An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation. *Physics in Medicine and Biology*. 2002. V. 47, N 7. P. R67.
3. *Hafez H.A., Chai X., Ibrahim A., Mondal S., Ropagnol X., Ozaki T.* Intense terahertz radiation and their applications. *Journal of Optics*. 2016. V. 18, N 9. P. 093004.
4. *Perenzoni M., Paul D.J.* Physics and applications of Terahertz radiation. Springer, 2014.
5. *Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C.* Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nature Photonics*. 2016. V. 10, N 6. P. 371–379.
6. *Zhang C.X., Xu J.* «Generation and Detection of THzWaves» in *Introduction of THz wave photonics*. Springer, 2010. P. 27–48.

7. *Blanchard F., Sharma G., Razzari L., Ropagnol X., Bandulet H.C., Vidal F., Morandotti R., Kieffer J.C., Ozaki T., Tiedje H., et. al.*, Generation of intense terahertz radiation via optical methods. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. V. 17, N 1. P. 5–16.
8. *Yang S., Hashemi M.R., Berry C.W., Jarrahi M.* 7.5% Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters With Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2014. V. 4, N 5. P. 575–581.
9. *Rethfeld B., Kaiser A., Vicanek M., Simon G.* Ultrafast dynamics of nonequilibrium electrons in metals under femtosecond laser irradiation. *Physical Review B*. 2002. V. 65, N 21. P. 214303.
10. *Lee J.B., Kang K., Lee S.H.* Comparison of theoretical models of electron-phonon coupling in thin gold films irradiated by femtosecond pulse lasers. *Materials transactions*. 2011. V. 52, N 3. P. 547–553.
11. *Lai A., Itoh T., Caloz C.* Composite right/left-handed transmission line metamaterials. *IEEE microwave magazine*. 2004. V. 5, N 3. P. 34–50.
12. *Liu Z., Hon P.W., Tavallaei A.A., Itoh T., Williams B.S.* Terahertz composite right-left handed transmission-line metamaterial waveguides. *Applied Physics Letters*. 2012. V. 100, N 7. P. 071101.

Поступила в редакцию 14.02.2020