УДК 535.215

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ РЕКТЕНН

© 2020 г. К. Т. Ч. Ву<sup>1,</sup> \*, Г. М. Казарян<sup>1</sup>, В. Л. Саввин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия

\**E-mail: kt.vu@physics.msu.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Изучение терагерцового диапазона является важной задачей для науки в силу его многих возможных применений. Его исследование связано со значительными трудностями, вызванными сложностью создания подходящих детекторов. В данной статье рассматривается работа модели терагерцовой ректенны, которая представлена в виде выпрямляющей схемы.

DOI: 10.31857/S0367676520010330

### введение

Терагерцовый диапазон электромагнитных волн, обычно, определяется границами частоты от 0.1 до 10 ТГц. Он отделяет инфракрасное излучение от микроволнового и имеет множество потенциальных применений, например, в медицине, неразрушающем контроле и беспроводной передаче энергии [1]. Многие области науки и техники также интересуются им в силу относительно малой длины волны, позволяющей достичь в задачах о получении изображения большее разрешение по сравнению с микроволнами.

Исследование этого диапазона затруднено в силу сложности создания для него подходящих детекторов. Методы, применяемые для оптического излучения, сталкиваются с трудностями, обусловленными низкой относительно этого диапазона частотой излучения. Энергия квантов электромагнитного излучения на этих частотах сравнима с тепловой энергией, поэтому фотоэлементы без охлаждения в них обладают низкой эффективностью преобразования [2].

Методы, работающие в микроволновом диапазоне, включат в себя использование так называемых ректенн, которые представляют собой антенну, соединенную с выпрямляющим элементом.

Обычно, в качестве такого элемента в различных работах применяли полупроводниковые диоды с барьером Шоттки или диоды с p-n переходом [3, 4]. В терагерцовом диапазоне они работают намного хуже в силу особенностей механизма переноса зарядов, который реализуется в таких диодах. Характерное время переноса заряда становится слишком большим для работы на этих частотах [5, 6].

Ряд современных исследований посвящен изучению свойств относительно новых типов диодов, например, диодов типа металл-диэлектрик-металл (МДМ-диоды), баллистических графеновых диодов [7–9], которые теоретически способны работать в этом частотном диапазоне.

Принцип работы МДМ-диодов основан на использовании туннельного эффекта. Благодаря этому, время переноса зарядов в таких диодах имеет порядок фемтосекунд [6, 9].

Баллистические графеновые диоды, которые также называют геометрическими диодами, имеют характерное время переноса зарядов примерно того же порядка [10, 11]. Теоретически, они способны достичь меньших значений сопротивления и больших значений чувствительности, чем однослойные МДМ-диоды.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривались процессы, которые происходят при прохождении сигнала через выпрямляющую схему, представленную на рис. 1. Эта схема хорошо описывает поведение токов и напряжений в выпрямляющей схеме, использующей диод с барьером Шоттки. В исходной модели емкость барьера и сопротивление, последовательное диоду, являлись некоторыми функциями напряжения. Однако было выяснено, что для выбранного масштаба напряжений они меняются довольно слабо, что позволило приблизить их постоянными значениями. К тому же



Рис. 1. Используемая выпрямляющая схема.

явления, происходящие при использовании диода с барьером Шоттки, могут отсутствовать при применении других типов диодов.

Этой схеме соответствует следующая система уравнений.

$$\begin{cases}
V_{\Gamma} = V_{\Gamma}(t) - I_{BX}R_{\Gamma} \\
C_{\omega}\frac{dV_{C}}{dt} = C_{\omega}\frac{dV_{BX}}{dt} - I_{BX} \\
L_{\omega}\frac{dI_{BX}}{dt} = V_{C} - V_{D} \\
C_{K}\frac{dV_{D}}{dt} = I_{BX} - I_{D} - I_{H} \\
L_{\Pi}\frac{dI_{D}}{dt} = V_{D} - V_{E} - I_{D}R_{\Phi} \\
L_{H}\frac{dI_{H}}{dt} = V_{D} - I_{H}R_{H} \\
C_{E}\frac{dV_{E}}{dt} = I_{D} - I_{E}(V_{E})
\end{cases}$$
(1)

Здесь  $R_{r,} C_{\omega}, L_{\omega}$  – параметры эквивалентной цепи, описывающей антенну ректенны,  $V_r(t)$  считается известной функцией времени, имеющей вид либо синусоиды, либо нарастающей синусоиды. Значительного различия в результатах при использовании этих двух форм замечено не было.  $R_{\Phi,} C_K$ ,  $L_{\Pi}$  – параметры, соответствующие влиянию подводящих проводов и дополнительному сопротивлению диода как участка проводника.

В качестве модели диода используется цепочка из резистора RФ, нелинейного сопротивления, соответствующего вольт-амперной характеристике  $I_{\rm E}(V_{\rm E})$ , и включенной параллельно им емкостью С<sub>п</sub>. Индуктивность L<sub>п</sub> представляет собой индуктивность проводов схемы. Вольт-амперная характеристика  $I_{\rm F}(V_{\rm F})$  получается отдельно из модели прохождения заряженных частиц через геометрический диод, описанной в [10]. Моделирование проводилось при помоши метода Монте-Карло, в котором поведение системы заряженных частиц рассматривалось в рамках модели Друде. Считалось, что диод расположен на подложке из оксида кремния SiO<sub>2</sub>. Рассчитанный диод имел вид и вольт-амперную характеристику, которые представлены на рис. 2а и 2б, соответственно.

Емкость диода рассчитывалась по формуле, также приведенной в [10].

$$C = \frac{w\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\frac{s}{h} + \frac{4}{\pi}\ln 2}.$$
 (2)

Здесь *w* — характерная ширина диода, взятая в данной задаче равной средней ширине левой и правой частей диода;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_{1,2}$  — относительные диэлектрические про-



**Рис. 2.** Параметры используемого диода: a) форма диода, b) его вольт-амперная характеристика.

ницаемости графена и оксида кремния, *s* – ширина зазора в области сужения диода, которая считается приблизительно равной 100 нм, *h* – толщина подложки. Согласно этой формуле, значение емкости было приблизительно равно  $5.28 \cdot 10^{-15} \, \Phi$ .

Источником напряжения являлась антенна. На схеме она представлена в виде RLC-контура, состоящего из индуктивности  $L_{\omega}$  и емкости  $C_{\omega}$ , и источника напряжения  $V_{r}(t)$ . Параметры антенны рассчитываются отдельно в рамках задач об излучении некоторой антенны, настроенной на нужную частоту, и падении плоской электромагнитной волны на эту антенну [12, 13]. Для этого для модели антенны, настроенной на частоту 6.139 ТГц, получалась зависимость коэффициента отражения  $S_{11}$  от частоты. После этого рассчитывались параметры RLC-контура, который лучше всего приближает эту зависимость вблизи данной частоты.

Выпрямленный сигнал проходит через сглаживающий фильтр  $L_{\rm H}$  на нагрузку  $R_{\rm H}$ . Индуктивность сглаживающего фильтра варьировалась для выяснения зависимости КПД преобразования от указанного параметра.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Решение системы (1) проводилось численно. При этом было выяснено, что для некоторых значений параметров, особенно, для низких значений добротности RLC-контура, изображающего антенну, система становится жесткой. Для проведения решения был выбран метод Розенброка второго порядка, поскольку он позволял получать результаты с приемлемой точностью за относительно небольшое время.

Эффективность преобразования как оценочную характеристику рассчитывалась по формуле

КПД = 
$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{T+\tau} I_H^2 R_H dt}{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{T+\tau} I_{\text{вх}} R_{\text{вх}} dt}.$$
 (3)

Время начала интегрирования τ выбиралось как можно дальше от начала расчета, чтобы обеспечить затухание переходных процессов, возможных в данной системе.

Расчеты позволили выяснить типичный вид зависимости тока на нагрузке  $I_{\rm H}$  от времени. Было заметно, что после переходного периода он переходит в режим осцилляции около некоторого постоянного уровня.

Основным результатом работы стало получение зависимости КПД преобразования от индуктивности фильтра нагрузки, которая представлена на рис. 3. Согласно экспериментальным рабо-



**Рис. 3.** Зависимость КПД преобразования от индуктивности сглаживающего фильтра.

там [13], КПД такой системы должен быть около 0.01%. Полученная зависимость позволяет сделать вывод о том, что в области высоких индуктивностей фильтра модель в большей степени соответствует экспериментальным данным, но в области низких индуктивностей она сильно от них отклоняется. Это позволяет заключить, что модель не учитывает параметры, присутствовавшие в экспериментах. Из этого следует, что модель, хорошо описывающая выпрямляющую схему, использующую диод с барьером Шоттки, очень ограниченно подходит для описания схемы, использующей геометрических диод из графена.

#### выводы

При помощи модели выпрямляющей схемы была исследована эффективность преобразования энергии в схеме, выпрямляющим элементов которой являлся графеновый геометрический диод. Значение КПД рассчитывалось для различных значений индуктивности сглаживающего фильтра. Было установлено, что при больших значениях индуктивности величина КПД согласуется с данными, указанными в экспериментальных работах, а при низких она значительно отклоняется от них. Это может быть вызвано тем, что модель, которая хорошо описывает выпрямляющие схемы с диодом с барьером Шоттки, не учитывает некоторые явления, которые происходят в схеме с геометрическим диодом из графена.

Стоит заметить, что эффективность работы данной схемы также зависит от амплитуды напряжения на ее входе. В силу малых размеров самих ректенн, это напряжение ожидается малым, особенно при работе с естественными источниками электромагнитного излучения. Это является довольно серьезной проблемой для успешного применения устройств данного типа. Тем не менее, напряжение, поступающее на один диод, может быть в некоторой мере увеличено за счет применения решетки антенн. Согласно работе [14] длина когерентности излучения черного тела может составлять десятки длин волн. Представленную модель можно расширить, подключив к одному диоду несколько антенн или даже подключить к одной нагрузке несколько разных диодов со своими антеннами, чтобы наблюдать интерференцию сигналов и то, как она влияет на эффективность преобразования. Однако это потребует построения довольно сложной эквивалентной схемы для учета влияния антенн друг на друга.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Auton G., But D.B., Zhang J. et al. // Nano Lett. 2017. V. 17. № 11 P. 7015.
- Shank J., Kadlec E.A., Jarecki R.L. et al. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9. Art. № 054040.
- Brown W.C. // IEEE Transact. Microwave Theory and Techniques. 1984. V. 32. № 9. P. 1230.
- Shanawani M., Masotti D., Costanzo A. // Electronics. 2017. V. 6. № 4. P. 99.

- 5. *Piltan S., Sievenpiper D.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. № 18. Art. № 183101.
- 6. *Celestin M., Krishnan S., Bhansali S. et al.* // Nano Res. 2014. V. 7. № 5. P. 589.
- 7. *Grover S., Moddel G.* Rectenna solar cells. N.Y.: Springer, 2013. 399 p.
- 8. *Dragoman D., Dragoman M., Plana R.* // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. № 8. Art. № 084316.
- 9. Citroni R., Leggieri A., Passi D. et al. // Adv. Electromagnetics. 2017. V. 6. № 2. P. 1.
- 10. Капаев И.В., Казарян Г.М., Саввин В.Л. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 24; Караеv I.V., Kazaryan G.M., Savvin V.L. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 1. Р. 26.
- 11. *Ву К.Т.Ч., Казарян Г.М., Саввин В.Л.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 46; *Vu К.T.C., Kazaryan G.M., Savvin V.L.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 1. Р. 46.
- 12. *Ву К.Т.Ч, Егоров Р.В., Саввин В.Л. и др.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та 2016. № 5. С. 165503.
- *Zhu Z., Joshi S., Grover S. et al.* // J. Phys. D. 2013
   V. 46. № 18. Art. № 185101.
- 14. Lerner P.B., Cutler P.H., Miskovsky N.M. // J. Nanophoton. 2015. V. 9. № 1. Art. № 093044.