

УДК 537.876

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА КРЕМНИЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ

© 2024 г. А. В. Щепетильников^{1,*}, А. Р. Хисамеева¹, Я. В. Федотова¹,
А. А. Дрёмин¹, И. В. Кукушкин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики твердого тела
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук», Черноголовка, Россия

*E-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Изучена эффективность преобразования η энергии электромагнитной волны субтерагерцового частотного диапазона в энергию постоянного тока плазменным детектором на основе кремния. В работе измерялась зависимость сигнала на выходе детектора от мощности падающего излучения. Показано, что в линейной по мощности области коэффициент η растет с увеличением мощности и насыщается в суб-линейном режиме. Максимальные достигнутые значения η составляли 0.4% для частоты излучения 97 ГГц. Измерения проводились как при комнатной температуре, так и при охлаждении детектора до температуры жидкого азота.

DOI: 10.31857/S0367676524020025, EDN: RTWKBX

Развитие технологий детектирования субтерагерцового излучения позволило значительно продвинуться в решении целого спектра разнообразных фундаментальных и прикладных научных задач. Так, субтерагерцовые технологии активно используются в физике конденсированного состояния [1], био- [2] и астрофизике [3]. С другой стороны, именно в этом частотном диапазоне возникает все больше приложений в таких областях как телекоммуникации [4], медицина [5] и неразрушающий контроль качества [6, 7].

Еще одним ярким применением является беспроводная передача энергии в субтерагерцовом частотном диапазоне [8–10]. Большинство коммерчески доступных технологий такого типа основываются на принципе индуктивной передачи энергии между взаимодействующими катушками с током. При этом энергия передается на достаточно малом расстоянии. Альтернативный подход, основывающийся на передаче энергии электромагнитными волнами субтерагерцового диапазона, наоборот подразумевает работу в дальнем поле, а характерное расстояние передачи, фактически, ограничивается лишь прозрачностью атмосферы. Более того, поскольку в этом случае детектор “выпрямляет” поле падающей на него электромагнитной волны, то принимающая часть системы может использоваться для сбора энергии субтерагерцовой части спектра окружающего электромагнитного

излучения, например, теплового излучения земной поверхности или фонового излучения различных электронных приборов, в первую очередь, телекоммуникационных систем, работающих в данном частотном диапазоне [11].

Для успешной реализации такой амбициозной задачи необходимо создание дешевых и масштабируемых детекторов, что явно подразумевает совместимость с существующими технологическими и производственными цепочками. В заданных условиях одним из наиболее перспективных способов детектирования ТГц излучения является подход, основанный на преобразовании падающего излучения в переменный потенциал релятивистской плазменной волны посредством широкополосной антенной структуры, нанесенной на поверхность кристалла [12,13].

В продолжение работ, посвященных детекторам суб-ТГц излучения на основе различных полупроводниковых гетероструктур [14–16], в настоящей публикации исследуются ключевые для решения описанной выше задачи свойства плазменного детектора на основе кремния: эффективность преобразования η энергии электромагнитной волны субтерагерцового частотного диапазона в энергию постоянного тока, а также максимальная генерируемая мощность на постоянном токе. Подчеркнем, что детектор на основе Si имеет существенные преимущества, к которым относятся простота

интеграции микросхем, совместимость с современными литографическими технологиями и, как следствие, низкая себестоимость. Детекторы такого типа имеют большой потенциал по масштабированию и интеграции в большие массивы [6, 17], что позволит собирать энергию с большой площади поверхности.

Исследуемый образец представлял собой плазменный детектор суб-ТГц излучения, основные принцип работы и строение которого подробно описаны в работах [14–16]. Датчик имел характерный размер 3×3 мм². Для изучения частотных характеристик детектора использовалась квазиоптическая схема. При этом пучок излучения формировался выходной рупорной антенной источника излучения, а также тефлоновыми линзами с характерным фокусным расстоянием и апертурой в 100 и 50 мм, соответственно. Детектор закреплялся на специальном держателе в центре пучка излучения. Низкочастотная амплитудная модуляция излучения осуществлялась при помощи оптического модулятора. Возникающий сигнал фото-напряжения измерялся посредством синхронного детектора, настроенного на частоту модуляции излучения. В качестве источников излучения использовалась лампа обратной волны с диапазоном частот 65–120 ГГц и генератор на базе лавинно-пролетного диода (ЛПД) с фиксированной частотой $f = 97$ ГГц, выходной мощностью 1 Вт и встроенным волноводным аттенуатором, который позволял управлять мощностью от -10 до $+30$ дБм. Мощность, приходящаяся на детектор, измерялась независимо калиброванным детектором излучения с такими же геометрическими размерами. Измерения частотной зависимости чувствительности плазменного детектора проводились в линейном по мощности режиме. Для проведения низкотемпературных экспериментов образец размещался на холодном пальце, охлаждаемом жидким азотом, внутри специальной камеры с прозрачным для суб-ТГц излучения окном. Характерное время охлаждения образца до нижней температуры составляло несколько часов. На холодном пальце закреплялся калиброванный термометр, который позволял контролировать температуру образца.

Чувствительность детектора, измеренная при комнатной температуре в зависимости от частоты падающего излучения, приведена на рис. 1а. Полученная зависимость является немонотонной с ярко выраженным максимумом в диапазоне частот $f = 96$ – 100 ГГц. Такой вид чувствительности связан с интерференцией субтерагерцовых электромагнитных волн в подложке детектора. Подробно этот эффект был исследован в работе [16]. Максимальное значение чувствительности достигает $S = 25$ В/Вт. Характерное сопротивление детектора на постоянном токе составляло $R = 2.2$ кОм при комнатной температуре и 6.9 кОм при температуре жидкого азота.

Перейдем к эффективности конверсии энергии излучения в энергию постоянного тока. При падении на детектор площадью A плоской волны с плотностью мощности ω на выходе детектора возникает выпрямленное напряжение U . Тогда на внутреннем сопротивлении детектора R будет рассеиваться джоулево тепло U^2/R , а эффективность конверсии можно оценить как

$$\eta = U^2/R\omega A. \quad (1)$$

Подчеркнем, что в реальных приложениях полезная мощность будет меньше, чем U^2/R , а ее максимальное значение будет достигаться при согласовании импеданса детектора и нагрузки и будет составлять ровно половину от U^2/R . В линейном по мощности режиме $U \sim \omega A$ и, как следствие, η будет также расти линейно по мощности. В области больших мощностей, как правило, линейная зависимость напряжения на выходе детектора от мощности сменяется корневой, при этом η уже не зависит от ωA и, фактически, достигает своего максимального значения. Действительно, дальнейшее увеличение мощности при условии насыщения выходного напряжения детектора лишь уменьшает η . Таким образом, для корректной оценки коэффициента конверсии η необходимо в широких пределах измерить зависимость сигнала детектора от мощности падающей на него электромагнитной волны. Именно для этих целей и использовался источник излучения на основе ЛПД с возможностью перестройки мощности в широких пределах. В линейном режиме чувствительность детектора известна, так что величину ωA , т.е. мощность излучения, собираемую детектором, при таких условиях можно измерить непосредственно по сигналу детектора. Поскольку форма пучка излучения не зависит от мощности источника, то процент всей собираемой детектором мощности остается постоянным и, как следствие, ωA может быть оценена даже в нелинейной области.

На рис. 1б показана зависимость напряжения детектора от мощности излучения, собираемой детектором, при комнатной и азотной температурах. В области низких мощностей обе зависимости линейны, но переходят в суб-линейный режим при больших значениях мощности. По этим зависимостям был вычислен коэффициент конверсии η , показанный на рис. 1в. В области малых мощностей η на порядок больше при низкой температуре, чем при комнатной. Это связано с гораздо большей чувствительностью детектора при понижении температуры [18]. Однако в области больших мощностей различие в η намного менее выраженное. Это связано с тем, что детектор переходит в суб-линейный по мощности режим работы при существенно меньших мощностях. Более того, понижение температуры детектора приводит к увеличению его сопротивления, что также снижает значение η .

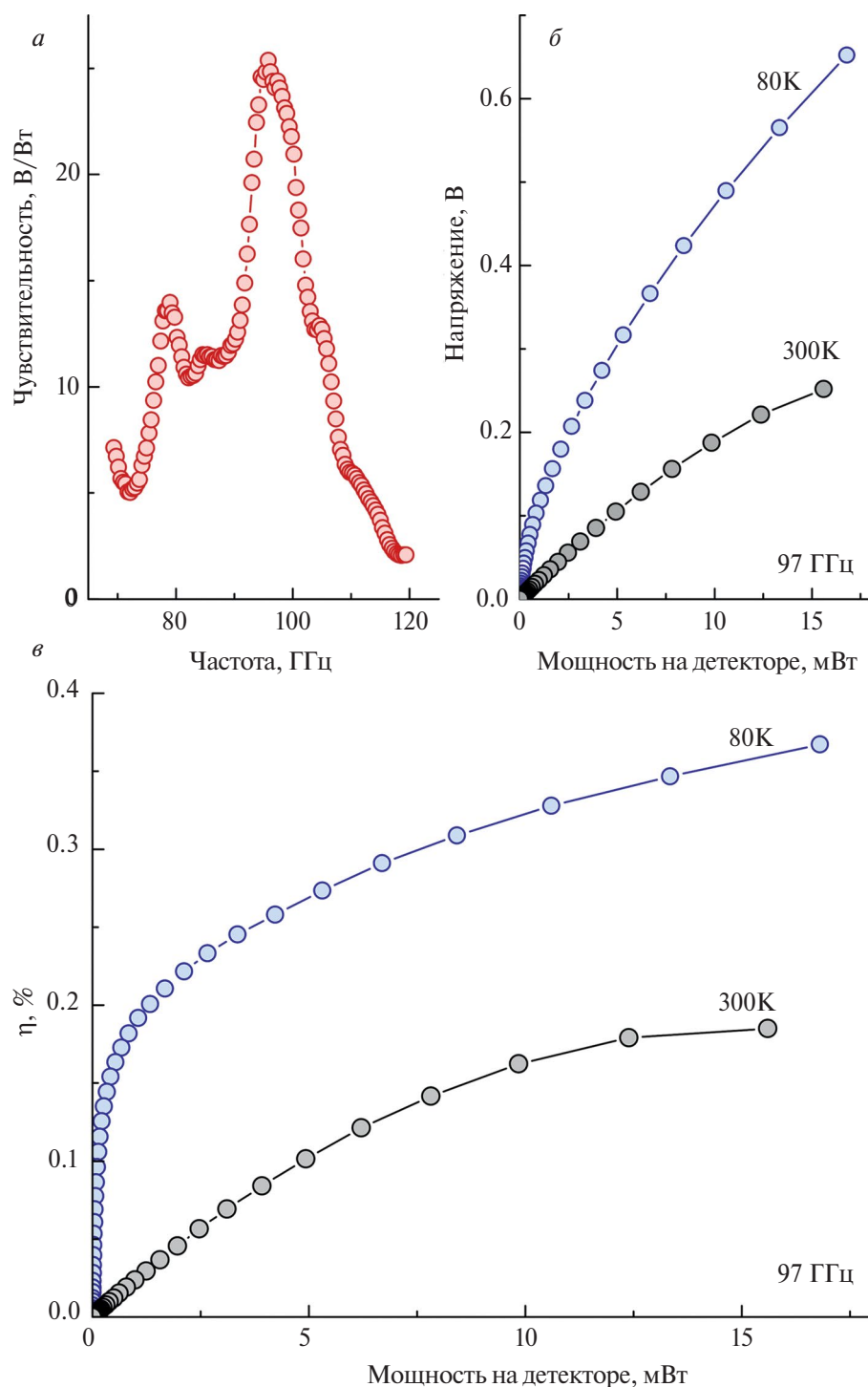


Рис. 1. Зависимость чувствительности детектора от частоты субтерагерцового излучения, измеренная при комнатной температуре (а). Зависимость постоянного напряжения на выходе детектора от мощности субтерагерцового излучения, приходящейся на детектор, при комнатной температуре (черные круги) и при температуре жидкого азота (синие круги). Частота излучения – 97 ГГц (б). Зависимость коэффициента преобразования энергии электромагнитной волны в энергию постоянного тока от мощности излучения при комнатной температуре (черные круги) и при температуре жидкого азота (синие круги). Частота излучения – 97 ГГц (в).

Максимальные достигнутые η лежат в диапазоне 0.2–0.4%. При этом максимальное достигнутое напряжение на детекторе составляет 0.25 В при

комнатной температуре, что соответствует тепловой мощности, выделяемой на единицу площади ~ 3 Вт/м². Полученные характеристики на данном

этапе уступают достигнутым в других работах величинам [19–24] в том же или близких частотных диапазонах. Например, в работе [22] продемонстрирована эффективность конверсии CMOS-детектора на частоте 94 ГГц в 6% и более чем на порядок большую выделяемую плотность мощности. Таким образом, необходима дальнейшая оптимизация свойств кремниевого детектора для улучшения его конверсионных характеристик.

В заключение, были проведены измерения эффективности преобразования η энергии электромагнитной волны субтерагерцового частотного диапазона в энергию постоянного тока плазменным детектором на основе кремния. Была измерена зависимость сигнала на выходе детектора от мощности падающего излучения. Продemonстрировано, что в линейной по мощности области коэффициент конверсии растет с увеличением мощности и насыщается в суб-линейном режиме. Максимальные достигнутые значения составляли 0.2–0.4% для частоты излучения в 97 ГГц и на данном этапе уступают полученным в работах других авторов коэффициентам конверсии.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-30003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baydin A., Makihara T., Peraca N.M., Kono J. // *Front. Optoelectron.* 2021. V. 14. P. 110.
2. Wang P.L., Lou J., Fang G.Y., Chang C. // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2022. V. 70. No. 11. P. 5117.
3. Pearson J.C., Drouin B.J., Yu S. // *IEEE J. Microw.* 2021. V. 1. No. 1. P. 43.
4. Chen Z., Ma X., Zhang B. et al. // *China Commun.* 2019. V. 16. No. 2. P. 1.
5. Yang X., Zhao X., Yang K. et al. // *Trends Biotechnol.* 2016. V. 34. No. 10. P. 810.
6. Tzydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V. et al. // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. No. 6. P. 632.
7. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // *Appl. Opt.* 2021. V. 60. No. 33. P. 10448.
8. Shinohara N. *Recent wireless power transfer technologies via radio waves.* Gistrup: River Publishers, 2018.
9. Mizojiri S., Shimamura K. // *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC).* (Singapore, 2019). P. 705.
10. Citroni R., Di Paolo F., Livreri P. // *Nanomaterials.* 2022. V. 12. No. 14. P. 2479.
11. Joseph S.D., Hsu Sh.H.S., Huang Y. // *IEEE Int. Symp. Radio-Freq. Integr. Technol. (RFIT).* 2021. P. 1.
12. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. No. 10. Art. No. 106805.
13. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Zarezin A.M. et al. // *Phys. Rev. B.* 2019. V. 99. No. 24. Art. No. 241406.
14. Muravev V.M., Kukushkin I.V. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. No. 8. Art. No. 082102.
15. Муравьев В.М., Соловьев В.В., Фортунатов А.А. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 103. № 12. С. 891.
16. Shchepetilnikov A.V., Kaysin V.D., Gusikhin P.A. et al. // *Opt. Quantum Electron.* 2019. V. 51. No. 12. P. 1.
17. Shchepetilnikov A.V., Kukushkin I.V., Muravev V.M. et al. // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. No. 6. P. 655.
18. Хисамеева А.Р., Щепetilников А.И., Федотова Я.В. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 2. С. 172; Khisameeva A.R., Shchepetilnikov A.V., Fedotova Ya.V. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. No. 2. P. 145.
19. Chiou H.K., Chen I.S. // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2010. V. 58. No. 12. P. 3598.
20. Weissman N., Jameson S., Socher E. W-band CMOS on-chip energy harvester and rectenna // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (Tampa, 2014).* P. 1.
21. Kapilevich B., Shashkin V., Litvak B. et al. // *IEEE Microwave. Wirel. Compon. Lett.* 2016. V. 26. No. 8. P. 637.
22. Shaulov E., Jameson S., Socher E. // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (Honolulu, 2017).* P. 307.
23. He P., Zhao D.A. // *IEEE MTT-S Int. Microwave. Symp. (Boston, 2019).* P. 634.
24. Wentzel A., Yacoub H., Johansen T.K. et al. // *Proc. 17th EuMIC (Milan, 2022).* P. 208.

Efficiency of sub-THz – DC energy conversion of a silicon detector**A. V. Shchepetilnikov^{1, *}, A. R. Khisameeva¹, Ya. V. Fedotova¹, A. A. Dremin¹, I. V. Kukushkin¹**¹*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia***e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru*

The efficiency of sub-THz to DC energy conversion of a silicon-based plasmonic detector was studied. The dependence of the signal at the detector output on the incident radiation power was measured. In the power linear region, the coefficient η was shown to grow with increasing power and to saturate in the sub-linear regime. The maximum achieved values of η were 0.4% for the radiation frequency of 97 GHz. The measurements were carried out both at room temperature and when the detector was cooled to liquid nitrogen temperature.