

УДК 537.876

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВОГО ДЕТЕКТОРА СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. А. Р. Хисамеева¹, *, А. В. Щепетильников¹, Я. В. Федотова¹,
А. А. Дрёмин¹, И. В. Кукушкин¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

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

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Свойства плазмонного детектора субтерагерцового излучения на основе кремния изучены в широком диапазоне температур, вплоть до азотной. Получены температурные зависимости чувствительности детектора, а также изучены его шумовые характеристики. Частотная зависимость чувствительности в диапазоне 70–120 ГГц была получена при комнатной температуре, при этом максимальное значение чувствительности, достигаемое на частоте 96 ГГц, составляло 25 В/Вт. Шумовой эквивалент мощности исследуемого детектора был оценен в предположении, что основным источником шума является шум Найквиста, и изменялся от значения $2 \cdot 10^{-10}$ Вт $\cdot$ Гц^{-1/2} при комнатной температуре вплоть до $2 \cdot 10^{-11}$ Вт $\cdot$ Гц^{-1/2} при температуре жидкого азота. Дополнительно были исследованы вольтамперные характеристики суб-ТГц детектора. Обнаружено, что в дифференциальном сопротивлении и чувствительности возникает особенность в зависимости от приложенного постоянного напряжения при переходе от комнатной температуры к азотной.

DOI: 10.31857/S0367676522700326, EDN: AEANFW

Последовательное освоение субтерагерцового частотного диапазона привело к возникновению нового направления современной физики и техники, развитие которого имеет как невероятную фундаментальную важность, особенно для физики конденсированного состояния [1], био- [2] и астрофизики [3], но и крайне актуально с прикладной точки зрения. Субтерагерцовые технологии находят все больше применений в таких областях, как телекоммуникации [4–7], медицина [2], а также в сферах безопасности [8–10] и неразрушающего контроля качества поступающих на производство заготовок и готовых изделий [11].

Богатство научных и технических задач, решаемых с помощью терагерцовых технологий, обусловлено целым рядом уникальных характеристик электромагнитного излучения данного частотного диапазона. Например, большинство материалов, таких как пластики, дерево, резина, различные композитные материалы, прозрачны в субтерагерцовом спектральном диапазоне. Более того, относительно небольшая длина такого излучения обеспечивает адекватное пространственное разрешение при визуализации различных объектов, а низкая энергия фотонов и, как след-

ствие, неионизирующий характер излучения, гарантирует безопасность для людей и животных.

Ключевым для прогресса в области терагерцовых технологий является разработка чувствительных к излучению данного частотного диапазона элементов. Реализация современных ТГц и суб-ТГц детекторов крайне разнообразна: транзисторы с высокой подвижностью электронов [12], полевые транзисторы [13], диоды с барьером Шоттки [14], микроболометры [15], пироэлектрические сенсоры [16], ячейки Голя [17]. С точки зрения быстродействия, себестоимости изготовления, а также совместимости с существующими технологическими и производственными цепочками 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. Физические свойства такого плазменного возбуждения в гибридной двумерной электронной системе на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs были подробно изучены в последнее время [18, 19]. При наличии асимметрии плазмонного волновода происходит выпрям-

ление осциллирующего потенциала плазменной волны, при этом возникает принципиально измеримый фото-отклик [20]. Такой плазмонный ТГц детектор обладает чрезвычайно коротким временем отклика, не хуже 150 пс, как показано в работе [21].

В продолжение работ, посвященных детекторам суб-ТГц излучения на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs [20–22], в настоящей статье исследуются характеристики концептуально идентичного детектора, изготовленного на основе кремния, в относительно широком диапазоне суб-ТГц частот и при различных температурах. Подчеркнем, что детектор на основе Si имеет существенные преимущества, к которым относятся простота интеграции микросхем, совместимость с современными технологическими цепочками и, как следствие, низкая себестоимость. Исследование температурных зависимостей чувствительности S и шумового эквивалента мощности NEP также представляют отдельный интерес. Для ряда научных и практических задач (например, в астрофизике [2] и физике конденсированного состояния [1]) является вполне допустимым использование охлаждаемых детекторов при условии существенного улучшения шумовых характеристик детекторов. Более того, системы охлаждения становятся все компактнее и доступнее, и уже зачастую не требуют использования дорогостоящих криогенных жидкостей и необходимой при этом сложной инфраструктуры.

В рамках данной работы были изучены характеристики плазмонных суб-ТГц детекторов, имеющих возможность интеграции в большие массивы — камеры ТГц излучения [10, 23], в низкотемпературной области (вплоть до температуры жидкого азота $T = 77$ К), что позволит повысить их чувствительность, но не сделает устройство слишком громоздким или дорогостоящим. Образец представлял собой плазмонный детектор суб-ТГц излучения, основной принцип работы и строение которого подробно описаны в работах [20–22]. Датчик имел характерный размер 3×3 мм².

Частотные характеристики детектора измерялись при комнатной температуре в квазиоптической схеме, показанной на рис. 1а. В измерениях в качестве источников суб-ТГц излучения использовались лампа обратной волны с диапазоном частот 65–120 ГГц (выходная мощность составляла не более 100 мВт и могла быть уменьшена с помощью квазиоптического аттенюатора) и генератор на базе лавинно-пролетного диода (ЛПД) с фиксированной частотой $f = 96$ ГГц, выходной мощностью 1 Вт и возможностью ее уменьшения в широких пределах от 0 до –40 дБ с помощью встроенного волноводного аттенюатора. Уровень мощности излучения, падающего на образец, контролировался с помощью независи-

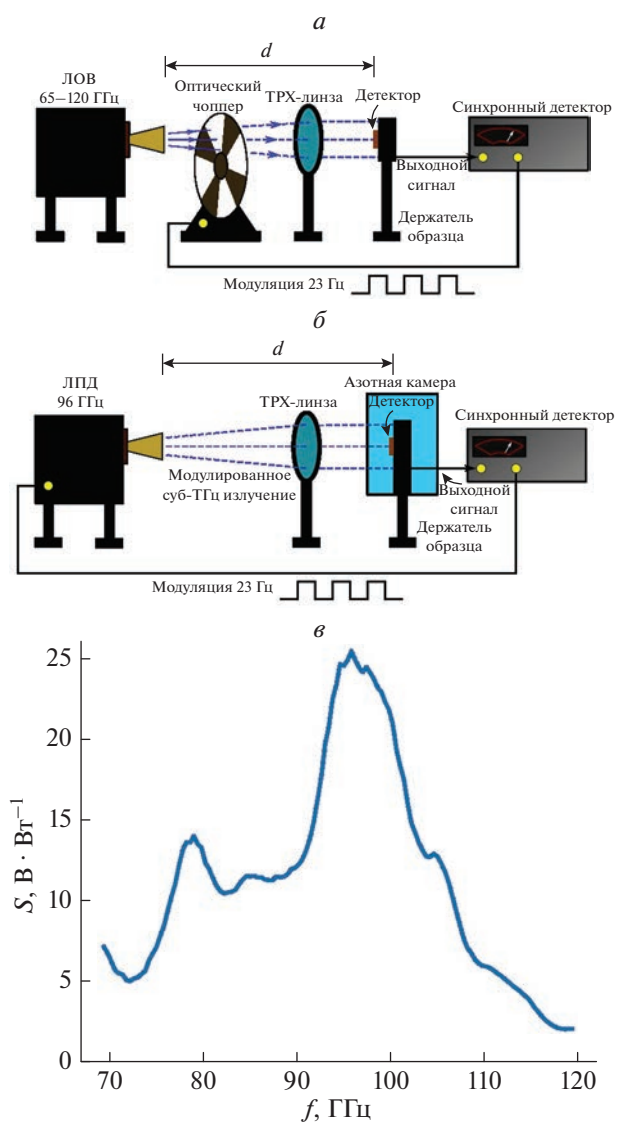


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения частотной характеристики детектора (а); схема экспериментальной установки для измерения низкотемпературных характеристик детектора (б); частотная характеристика чувствительности (в) S кремниевого детектора суб-ТГц излучения.

мо калиброванного пирозлектрического детектора. Измерения проводились в линейном по мощности режиме.

С целью компенсации расходимости исходного пучка на выходе источников суб-ТГц излучения, в оптический тракт устанавливалась квазиоптическая линза, изготовленная из материала TRX, с фокусным расстоянием 60 мм и диаметром 120 мм, при этом расстояние между выходом рупорной антенны и линзой было равно фокусному. Кремниевым детектор располагался на специальном держателе в центре полученного параллельного пучка, площадь которого значительно

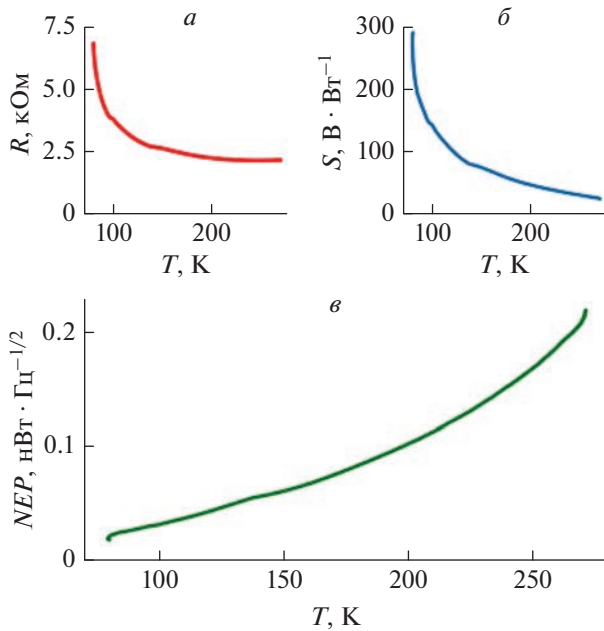


Рис. 2. Измеренные температурные зависимости сопротивления R (а) и чувствительности детектора S (б), а также шумового эквивалента мощности NEP , полученного в предположении, что доминирующий вклад в флуктуации фотонапряжения вносит тепловой шум Найквиста (в) от температуры.

превосходила размеры самого детектора. Расстояние между детектором и источником ТГц излучения составляло $d = 30$ см. Выходное излучение модулировалось посредством оптического модулятора с частотой $f_{mod} = 23$ Гц. Фото-напряжение с кремниевого детектора измерялось с помощью синхронного детектора, настроенного на частоту амплитудной модуляции излучения.

Для температурных измерений кремниевый детектор помещался в специальную камеру, оснащенную прозрачным для суб-ТГц излучения окном. Детектор был закреплен на массивном холодном пальце, который охлаждался жидким азотом. Типичное время охлаждения детектора до азотной температуры составляло несколько часов. Вблизи детектора был закреплен специальный калиброванный термометр. Схема измерения низкотемпературных характеристик детектора показана на рис. 1б.

Кривая зависимости величины чувствительности S кремниевого детектора от частоты, падающего суб-ТГц излучения $f = 70\text{--}120$ ГГц продемонстрирована на рис. 1в. Измерения проводились при комнатной температуре, характерное сопротивление детектора на малом постоянном токе составляло $R = 2.2$ кОм. Из полученной зависимости видно, что максимум в чувствительности S суб-ТГц детектора лежит в диапазоне $f = 96\text{--}100$ ГГц и достигает максимального значе-

ния $S = 25 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Подчеркнем, что частота ЛПД-диода, использовавшегося при изучении низкотемпературных свойств детектора, лежит внутри указанного диапазона. Наблюдаемый вид частотной зависимости обусловлен интерференцией электромагнитного излучения в кремниевой подложке и был подробно изучен в работе [22].

На рис. 2 продемонстрированы температурные измерения основных характеристик кремниевого детектора суб-ТГц излучения. Измерение сопротивления структуры R проводили при пропускании через образец переменного тока $I = 1$ мкА посредством синхронного детектора. С понижением температуры с комнатной до азотной (см. рис. 2а), величина сопротивления R изменилась с 2.2 до 6.9 кОм. Такое незначительное изменение сопротивления указывает на то, что контакты к структуре работают вплоть до азотных температур, а детектор сохраняет работоспособность во всем указанном температурном диапазоне.

Следующим этапом стало измерение эволюции чувствительности детектора S при понижении температуры. Полученные результаты продемонстрировали куда более существенное изменение чувствительности, так величина S увеличилась более чем на порядок с 25 до $300 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Таким образом, понижение температуры детектора до азотной существенно улучшает чувствительность детектора. Более того, сама форма зависимости, а именно резкий рост чувствительности в области низких температур, указывает, что дальнейшее понижение температуры также существенно улучшит характеристики плазмонного детектора.

Отметим, что при понижении температуры увеличивается как сопротивление детектора, так и его чувствительность. Таким образом, для адекватной оценки улучшения детектирующих свойств чувствительного элемента правильно использовать шумовые характеристики. Оценим шумовой эквивалент мощности (NEP) детектора в предположении, что доминирующий вклад в шум v_n появляющегося на выходе детектора имеет найквистовскую природу:

$$v_n = \sqrt{4kTR} \quad (1)$$

здесь k — постоянная Больцмана, а T и R — температура и сопротивление детектора. Тогда шумовой эквивалент мощности может быть получен следующим образом:

$$NEP = \sqrt{4kTR}/S. \quad (2)$$

На рис. 2в представлена полученная кривая зависимости шумового эквивалента мощности кремниевого детектора от температуры. С понижением температуры до азотной NEP изменяется с $2 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Таким образом, можно заключить, что шумовые характеристики

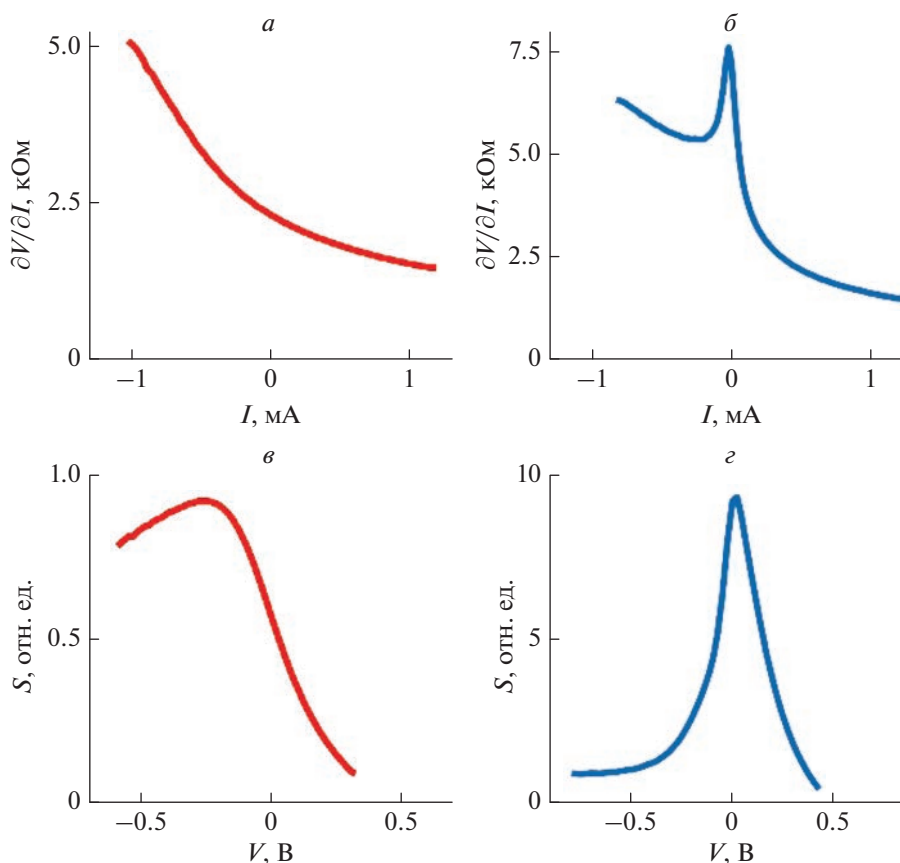


Рис. 3. Зависимость дифференциального сопротивления детектора для различных значений тока смещения I при комнатной (а) и азотной (б) температурах; чувствительность детектора S для различных значений напряжения смещения V при комнатной (в) и азотной (г) температурах.

детектора улучшились на порядок при понижении температуры до азотной.

В рамках данной работы также была изучена возможность улучшения параметров детектора путем приложения постоянного напряжения на выход детектора. При этом измерялся проходящий через него постоянный ток, а также переменное фото-напряжение на выходе детектора. Мощность падающего излучения оставалась неизменной. Такая процедура была проделана как при температуре $T = 300$ К, так и при температуре жидкого азота. Результаты представлены на рис. 3. На панелях (а) и (б) показана зависимость дифференциального сопротивления от протекающего через образец тока. При комнатной температуре данная зависимость монотонна. Наоборот, при низкой температуре в дифференциальном сопротивлении появляется ярко выраженный максимум. Таким образом детектор стал существенно более нелинейным при понижении температуры, что, в том числе, также приводит к увеличению его чувствительности.

На панелях (в) и (г) рис. 3 показана зависимость чувствительности детектора от приложен-

ного постоянного напряжения при комнатной температуре и температуре жидкого азота, соответственно. Если при комнатной температуре приложение постоянного тока и приводит к незначительному улучшению чувствительности детектора, то уже при $T = 77$ К величина S имеет максимальное значение вблизи нулевого приложенного напряжения.

В заключение, в рамках данной в продолжение ранее заявленных исследований свойств плазмонного ТГц детектора на основе GaAs, мы исследовали низкотемпературные свойства детектора суб-ТГц излучения на основе кремния в широком диапазоне температур. При понижении температуры до температуры жидкого азота сопротивление детектора увеличивается с 2.2 до 6.6 кОм, при этом чувствительность детектора возрастает примерно в 10 раз. Шумовые характеристики также улучшаются на порядок при понижении температуры. Также были исследованы зависимости дифференциального сопротивления детектора и его чувствительности от приложенного постоянного напряжения. При азотной температуре в дифференциальном сопротивлении и

чувствительности появляется особенность при нулевом внешнем напряжении.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shuvaev A., Muravev V.M., Gusikhin P.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. No. 13. Art. No. 136801.
2. Siegel P.H. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2004. V. 52. No. 10. P. 2438.
3. Siegel P.H. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2007. V. 55. No. 11. P. 2957.
4. Federici J., Moeller L. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. No. 11. P. 6.
5. Song H.J., Nagatsuma T. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1. No. 1. P. 256.
6. Koenig S., Lopez-Diaz D., Antes J. et al. // Nature Photon. 2013. V. 7. No. 12. P. 977.
7. Chen Z., Ma X., Zhang B. et al. // China Commun. 2019. V. 16. No. 2. P. 1.
8. Ogawa Y., Kawase K., Yamashita M. et al. // Proc. CLEO. V. 1. (San Francisco, 2004). P. 3.
9. Shen Y.C., Lo A.T., Taday P.F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. No. 24. Art. No. 241116.
10. Tsydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V. et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2020. V. 41. No. 6. P. 632.
11. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // Appl. Opt. 2021. V. 60. No. 33. Art. No. 10448.
12. Dyakonov M.I., Shur M.S. // IEEE Trans. Electron Devices. 1996. V. 43. No. 10. P. 1640.
13. Lü J.Q., Shur M.S. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. No. 17. P. 2587.
14. Fetterman H.R., Clifton B.J., Tannenwald P.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. No. 2. P. 70.
15. Karasik B.S., Sergeev A.V., Prober D.E. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1. No. 1. P. 97.
16. Whatmore R.W. // Rep. Prog. Phys. 1986. V. 49. No. 12. P. 1335.
17. Fernandes L.O.T., Kaufmann P., Marcon R. et al. // Proc. XXXth URSI GASS. (Istanbul, 2011). P. 1.
18. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. No. 10. Art. No. 106805.
19. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Zarezin A.M. et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. No. 24. Art. No. 241406.
20. Muravev V.M., Kukushkin I.V. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. No. 8. Art. No. 082102.
21. Муравьев В.М., Соловьев В.В., Фортунатов А.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 12. С. 891; Muravev V.M., Solov'ev V.V., Fortunatov A.A. et al. // JETP Lett. 2016. V. 103. No. 12. P. 792.
22. Shchepetilnikov A.V., Kaysin B.D., Gusikhin P.A. et al. // Opt. Quantum Electron. 2019. V. 51. No. 12. P. 1.
23. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2020. V. 41. No. 6. P. 655.

Low-temperature properties of a silicon-based sub-THz detector

A. R. Khisameeva^{a,*}, A. V. Shchepetilnikov^a, Ya. V. Fedotova^a, A. A. Dremin^a, I. V. Kukushkin^a

^a Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Science, Chernogolovka, 142432 Russia

*e-mail: akhisameeva@issp.ac.ru

Characteristics of the silicon-based sub-THz plasmon detector were studied in a wide temperature range, down to the temperature of the liquid nitrogen. Temperature dependences of the detector sensitivity were obtained, and its noise characteristics were studied. The frequency dependence of the sensitivity in the frequency range 70–120 GHz was measured at room temperature, with the maximum of 25 V/W reached at the frequency of 96 GHz. The noise equivalent power of the detector under study was estimated assuming that the main source of noise was of Nyquist nature and varied from a value of $2 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ at room temperature down to $2 \cdot 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ at temperature of the liquid nitrogen. Additionally, the volt-ampere characteristics of the sub-THz detector were investigated. It was found that the feature in the differential resistance and sensitivity as a function of the applied DC voltage emerges at the temperature of the liquid nitrogen.