

УДК 537.876

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМОННОГО ДЕТЕКТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

© 2025 г. А. В. Щепетильников*, А. Р. Хисамеева, Я. В. Федотова,
А. А. Дремин, И. В. Кукушкин

Федеральное 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 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Свойства плазмонного детектора электромагнитного излучения на основе кремния были изучены в области малых частот (0.1–20 ГГц). При этом чувствительный элемент детектора был встроен в согласованный копланарный волновод, по которому пропускалось электромагнитное излучение. Измерена зависимость постоянного напряжения, возникающая на выходе детектора, от частоты возбуждающего излучения. Получены мощностные характеристики такого детектора, определена мощность электромагнитного излучения, при которой детектор переходит в нелинейный режим.

Ключевые слова: плазмонный детектор, электромагнитное излучение, волновод.

DOI: 10.31857/S0367676525020032, **EDN:** CYANWR

Технологии детектирования субтерагерцевого излучения активно используются в самых разных областях современной фундаментальной науки, в том числе в физике конденсированного состояния [1, 2], биофизике [3, 4] и астрофизике [5, 6]. С другой стороны, они помогают решать целый спектр технических задач в сфере телекоммуникации [7], медицины [8, 9], неразрушающего контроля качества [10–14]. Достигнутый в данной области в последние десятилетия прогресс позволил разработать несколько физически различных принципов детектирования излучения, некоторые из которых легли в основу коммерчески доступных изделий.

Существует ряд принципиально различных подходов по созданию современных ТГц и суб-ТГц детекторов: транзисторы с высокой подвижностью электронов [15], полевые транзисторы [16], диоды с барьером Шоттки [17], микроболометры [18], пироэлектрические сенсоры [19], ячейки Голея [20]. Каждый из этих подходов имеет свои сильные и слабые стороны. С точки зрения быстродействия, себестоимости, стабильности своих свойств и масштабируемости производства один из наиболее перспективных подходов по созданию детекторов в таком частотном диапазоне состоит в преобразовании осциллирующего электрического поля падающего излучения в переменный потенциал гибрид-

ной релятивистской плазмонной волны, возбуждающейся в высококачественной электронной системе, посредством широкополосной антенной структуры, нанесенной на поверхность кристалла. Свойства такого плазмонного возбуждения активно изучались на примере высококачественных GaAs/AlGaAs гетеропереходов [21, 22]. В свою очередь, потенциал плазмонного возбуждения впоследствии ректифицируется на искусственных дефектах, созданных в электронной системе [23, 24]. Ранее была продемонстрирована возможность создания таких плазмонных детекторов по кремниевой технологии [25], что обеспечивает низкую себестоимость таких изделий, а также широкие возможности по их масштабированию и оптимизации.

Как правило, такие детекторы излучения работают в квазиоптической схеме, то есть детектор размещается в центре пучка излучения субтерагерцевого частотного диапазона, распространяющегося в свободном пространстве [26]. При этом функциональные характеристики субтерагерцевого детектора на основе кремния складываются как из свойств самого чувствительного элемента, так и характеристик антенной структуры. Для дальнейшего улучшения характеристик субтерагерцевых детекторов необходимо выработать глубокое понимание физических основ ректификации падающей электромагнит-

ной волны именно в чувствительном элементе, что подразумевает изучение отклика элемента не только в этом частотном диапазоне, но и в существенно более широкой области частот вплоть до самых низких.

В продолжение серии предыдущих работ [23–26] экспериментальные исследования свойств чувствительного элемента были существенно расширены в область малых частот (0.1–20 ГГц). Подчеркнем, что в таком частотном диапазоне квазиоптические подходы работают плохо, поэтому использовалась альтернативная геометрия. При этом чувствительный элемент встраивался в щели копланарного волновода, нанесенного на поверхность кристалла. В сравнении с квазиоптической схемой такой подход позволяет добиться хорошего согласования детектора и гораздо точнее учесть эффекты, связанные с отражением электромагнитной волны от него. Таким образом, выбранная схема позволяет эффективно выделять свойства непосредственно кремниевого чувствительного элемента. Более того, при таком подходе минимальное влияние оказывают паразитные эффекты конструктивной и деструктивной интерференции электромагнитного излучения в подложке. Подчеркнем, что описанные эффекты заметно модифицируют частотные характеристики квазиоптического детектора [26].

Экспериментальный образец представлял собой кремниевую подложку, изготовленную из высокорезистивного кремния, на поверхность которой был нанесен копланарный волновод. Волновод формировался на образце посредством стандартных фотолитографических процедур с последующим термическим напылением слоев металла: тонкого адгезионного слоя хрома и слоя золота. Копланарный волновод состоял из центральной жилы и двух заземленных областей металла по бокам. Геометрические параметры копланарного волновода подбирались так, чтобы его импеданс был равен 50 Ом, так чтобы обеспечить наилучшее согласование получившегося детектора. В щели копланарного волновода встраивались чувствительные элементы, в которых переменное электрическое поле проходящей по волноводу электромагнитной волны преобразовывалось в потенциал плазмонного возбуждения, который впоследствии выпрямлялся. Схема детектора приведена на рис. 1а. Желтым цветом обозначены элементы копланарного волновода, фиолетовым – чувствительные элементы. Импеданс чувствительных элементов подбирался так, чтобы добиться согласования с копланарной волноводной линией.

Характеризация детектора осуществлялась при помощи зондовой станции, оснащенной микроволновыми копланарными зондами, размеры которых согласованы с геометрическими параметрами копланарного волновода.

При этом один из зондов подключался к входу детектора, а второй – к выходу. Таким образом, мы имели возможность не только подавать на детектор возбуждающее излучения, но и измерять его отклик на него.

В рамках первого этапа эксперимента для проверки согласования детектора был измерен коэффициент отражения S_{11} от входа детектора. Для этого к микроволновому зонду, соединенному со входом детектора, подключался векторный анализатор цепи. Получившаяся зависимость коэффициента отражения в диапазоне от 0.1 до 20 ГГц представлена на рис. 1б. Как видно, из приведенных экспериментальных данных коэффициент отражения в среднем не превышал -10 дБ. Таким образом, отражением излучения от детектора можно с достаточной точностью пренебречь.

На втором этапе экспериментов измерялись зависимости постоянного напряжения, возникающего на выходе детектора, в зависимости от частоты возбуждающего излучения. Для этого к коаксиальному выходу копланарного зонда был подключен микроволновый генератор. При этом электромагнитное излучение было модулировано по амплитуде на низкой частоте. Возникающее при этом переменное выпрямленное напряжение, возникающее на выходе детектора, изменялось посредством синхронного детектора, подключенного к его выходу с использованием микроволнового зонда. Входной импеданс синхронного детектора составлял 50 Ом. Получившаяся зависимость напряжения от частоты электромагнитного излучения представлена на рис. 1в для двух уровней мощности излучения -5 дБм (зеленая кривая) и 0 дБм (красная кривая). Хорошо видно, что эти зависимости хорошо повторяют друг друга, более того увеличение сигнала линейно по изменению мощности. С учетом мощности падающего излучения можно оценить чувствительность получившегося детектора в $1-10$ В/Вт в зависимости от частоты излучения. Можно произвести оценку шумового эквивалента 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 величина NEP может быть получена следующим образом:

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

В рамках сделанных предположений величина NEP соответствует 0.1 нВт/ГГц^{0.5} и хорошо согласуется с характеристиками аналогичного детектора в квазиоптическом исполнении. Видно также, что с увеличением частоты уровень сигнала падает. Резкие осцилляции сигнала по всей видимости связаны с возникновением стоячих волн

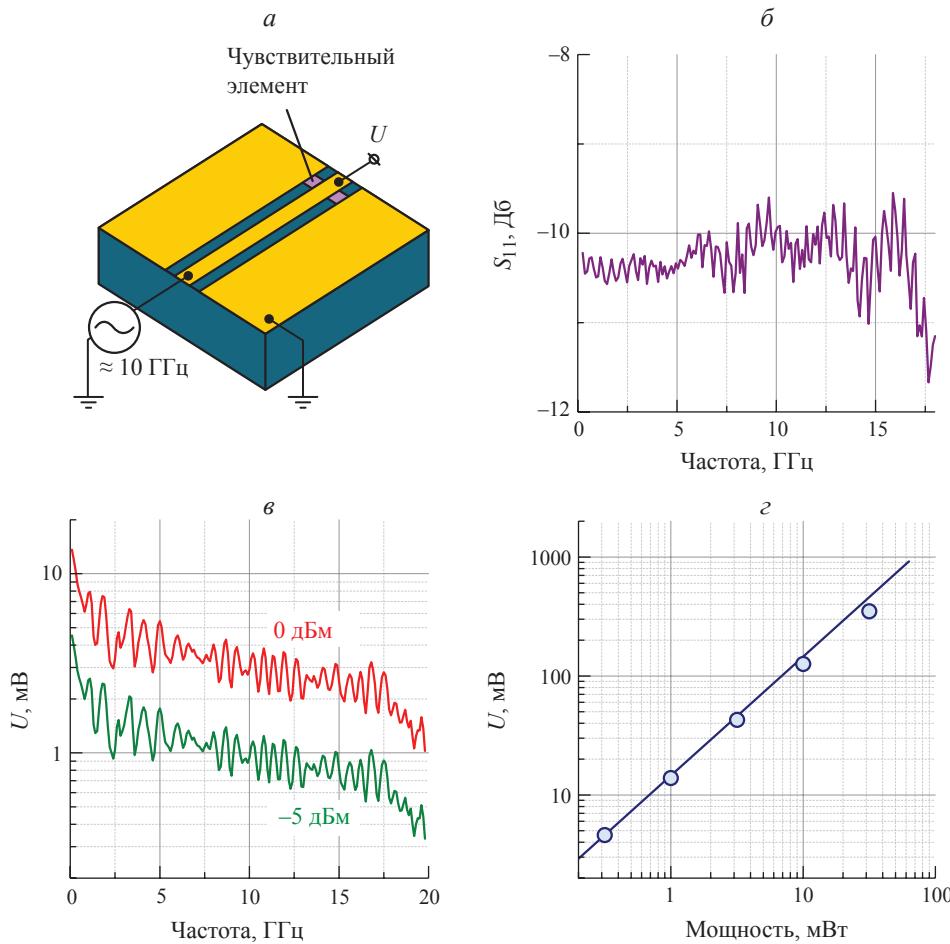


Рис. 1. Принципиальная схема детектора (*а*). В щелях копланарного волновода расположены чувствительные элементы, в которых происходит ректификация переменного электрического поля волны. На вход детектора при помощи микроволнового копланарного зонда подается переменное электрическое поле. На выходе детектора возникает постоянное напряжение. Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} от входного сигнала детектора (*б*). Зависимость постоянного напряжения, возникающего на выходе детектора, от частоты электромагнитного излучения (*в*). Данные представлены для двух уровней мощности в 0 дБм (верхняя кривая) и -5 дБм (нижняя кривая). Зависимость напряжения на выходе детектора от уровня мощности электромагнитного излучения (*г*). Частота была зафиксирована и составляла 0.1 ГГц.

в коаксиальных и копланарных микроволновых трактах. Отдельно было проверено, что в области малых частот амплитудной модуляции (вплоть до 100 кГц) излучения измеряемые экспериментальные данные не зависели от этой частоты.

Также были измерены мощностные характеристики детектора. Для этого фиксировалась частота электромагнитного излучения и постепенно варьировалась мощность излучения в диапазоне от -5 до +15 дБм. На рис. 1 g показана зависимость выходного напряжения от мощности излучения для частоты излучения 0.1 ГГц (этот частота соответствует максимальным измеренным значениям выходного напряжения детектора). В области малых мощностей зависимость выходного сигнала от мощности возбуждающего электромагнитного излучения линейна. В диапазоне мощ-

ностей больших +5 дБм зависимость напряжения от мощности начинает становиться сублинейной. Максимальные значения постоянного напряжения, возникающего на выходе детектора, достигали значений в ≈ 0.4 В, при этом не происходило необратимого разрушения чувствительного элемента детектора. Таким образом, детектор вполне подходит для детектирования электромагнитного излучения относительно большой мощности.

Также были измерены свойства плазмонного детектора электромагнитного излучения на основе кремния в области малых частот (0.1–20 ГГц). Чувствительный элемент детектора был расположен в щелях согласованного копланарного волновода, по которому проpusкалось электромагнитное излучение. Была получена зависимость постоянного напряжения,

возникающая на выходе детектора, от частоты возбуждающего излучения. Измерены характеристики такого детектора при разных мощностях возбуждающего излучения, была установлена мощность электромагнитного излучения, при которой детектор переходит в нелинейный режим.

Работа 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. Miyamoto T., Kondo A., Inaba T. et al. // Nature Commun. 2023. V. 14. No. 1. P. 6229.
3. Mertens M., Chavoshi M., Peytral-Rieu O. et al. // IEEE Microwave Mag. 2023. V. 24. No. 4. P. 49.
4. Wang P., Lou J., Fang G., Chang C. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2022. V. 70. No. 11. P. 5117.
5. Pearson J.C., Drouin B.J., Yu S. // IEEE J. Microwaves. 2021. V. 1. No. 1. P. 43.
6. Tamburini F., Licata I. // Particles. 2024. V. 7. No. 3. P. 576.
7. Chen Z., Ma X., Zhang B. et al. // China Commun. 2019. V. 16. No. 2. P. 1.
8. Yang X., Liu Y., Liu W. et al. // Trends Biotechnol. 2016. V. 34. No. 10. P. 810.
9. Khan S., Acharyya A., Inokawa H. et al. // Photonics. 2023. V. 10. No. 7. P. 800.
10. Tzydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V., Dremin A. 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. Optics. 2021. V. 60. No. 33. P. 10448.
12. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2020. V. 41. No. 6. P. 655.
13. Jelali M., Papadopoulos K. // Processes. 2024. V. 12. No. 4. P. 712.
14. Nsengiyumva W., Zhong Sh., Zheng L. et al. // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2023.
15. Dyakonov M.I., Shur M.S. // IEEE Trans. Electron Devices. 1996. V. 43. No. 10. P. 1640.
16. Lu J.Q., Shur M.S. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. No. 17. P. 2587.
17. Fetterman H.R., Clifton B.J., Tannenwald P.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. No. 2. P. 70.
18. Karasik B.S., Sergeev A.V., Prober D.E. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1. No. 1. P. 97.
19. Whatmore R.W. // Rep. Progr. Phys. 1986. V. 49. No. 12. P. 1335.
20. Fernandes L.O.T., Kaufmann P., Marcon R. et al. // Proc. XXX URSI General Assembly. (Istanbul, 2011). P. 1.
21. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. No. 10. Art. No. 106805.
22. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Zarezin A.M. et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. No. 24. Art. No. 241406(R).
23. Muravev V.M., Kukushkin I.V. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. No. 8. Art. No. 082102.
24. 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.
25. Хисамеева А.Р., Шепетильников А.В., 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.
26. Shchepetilnikov A.V., Kaysin B.D., Gusikhin P.A. et al. // Opt. Quantum Electron. 2019. V. 51. No. 12. P. 1.

Low frequency properties of a silicon-based plasmonic detector

A. V. Shchepetilnikov*, A. R. Khisameeva, Ya. V. Fedotova, A. A. Dremin, I. V. Kukushkin

Osiyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

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

The properties of a silicon-based plasmonic detector of electromagnetic radiation were examined in the low-frequency region (0.1–20 GHz). The detector's sensitive element was embedded within a matched coplanar waveguide, through which the electromagnetic radiation was conveyed. The dependence of the DC voltage observed at the detector's output on the frequency of the incident radiation was measured. The detector's power characteristics were measured, and the threshold radiation power at which the detector transitions into a nonlinear regime was determined.

Keywords: plasmonic detector, electromagnetic radiation, waveguide.