

ВРЕМЯ ОТКЛИКА 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. Осипяна 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.

Исследовано время отклика плазмонного детектора электромагнитного излучения на основе кремния. Для этого были проведены эксперименты по смешиванию в микроволновом частотном диапазоне. При этом чувствительный элемент детектора был встроен в щели согласованного копланарного волновода. По затуханию амплитуды сигнала смешивания на разностной частоте было оценено время отклика $\tau = 60 \pm 10$ пс.

Ключевые слова: плазмонный детектор, электромагнитное излучение, волновод, время отклика

DOI: 10.31857/S0367676525020043, EDN: CYANCC

Во многих областях современной науки и техники все активнее используются субтерагерцовые технологии. Так, их использование позволило значительно продвинуться в понимании физики конденсированного состояния [1, 2], биофизики [3, 4] и астрофизики [5, 6]. Спектр практических применений также достаточно широк и включает в себя помимо медицины [7, 8] и неразрушающего контроля качества [9–13], также и одно из важнейших направлений развития современной техники — телекоммуникацию [14–17].

В большинстве современных телекоммуникационных приложений необходимо передавать информацию, зашифрованную в амплитуде и фазе распространяющейся в свободном пространстве электромагнитной волны [18]. Ключевым параметром при этом выступает скорость передачи данных, которая во многом определяется максимальной возможной частотой амплитудной и фазовой модуляции излучения [18]. При этом частота может быть тем выше, чем больше несущая частота электромагнитной волны, что и обуславливает повышенное внимание в данной сфере именно к субтерагерцовому частотному диапазону. Увеличение частоты модуляции, а вместе с тем и улучшение скорости передачи информации, возможно лишь при условии наличия достаточно быстрых детекторов субтерагерцового частотного диапазона. Таким образом, исследование времени отклика таких детекторов представ-

ляет собой крайне важную и актуальную задачу. Отметим еще один важный аспект — такие детекторы должны быть совместимы с современными технологическими цепочками и работать при комнатной температуре.

В рамках данной работы быстроедействие плазмонных детекторов на основе кремния [19] было экспериментально измерено из анализа эффектов смешивания в микроволновом частотном диапазоне. Такие детекторы структурно аналогичны ранее разработанным детекторам на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, а их основной принцип функционирования заключается в преобразовании осциллирующего электрического поля падающего излучения в переменный потенциал гибридной релятивистской плазменной волны, возбуждающейся в высококачественной электронной системе, посредством широкополосной антенной структуры, нанесенной на поверхность кристалла. Свойства такого плазменного возбуждения активно изучались на примере высококачественных GaAs/AlGaAs гетеропереходов [20, 21], в том числе и при криогенных температурах. Потенциал рожденного плазменного возбуждения в дальнейшем ректифицируется на искусственных дефектах, созданных в электронной системе [22, 23]. Ранее было продемонстрировано, что такие детекторы имеют короткое характерное время отклика $\tau = 110$ пс, что позволяет надеяться, что концептуально близкие плаз-

менные детекторы на основе кремния также будут иметь хорошие характеристики по быстродействию.

Свойства плазменных детекторов субтерагерцового излучения определяются совокупностью характеристик непосредственно чувствительного элемента, в котором происходит ректификация поля плазменного возбуждения, и параметров антенной структуры, нанесенной на поверхность кристалла. При этом быстродействие детектора естественным образом задается непосредственно временем отклика чувствительного элемента и в отличие от свойств антенной структуры гораздо слабее зависит от несущей частоты электромагнитного излучения. Таким образом, время отклика чувствительного элемента может быть оценено и по измерениям в области более низких частот (до 20 ГГц), например, при копланарном исполнении детектора. При этом чувствительные элементы детектора располагаются в щелях согласованного копланарного волновода. Такая схема измерения позволяет избежать необходимости учета свойств антенной структуры и минимизировать паразитные эффекты от интерференции падающей волны и отраженной от поверхности детектора в квазиоптическом исполнении, в том числе и исключить эффекты интерференции в кристалле — подложке детектора [24].

Схема детектора представлена на рис. 1а. Сам детектор представлял собой кремниевую подложку, изготовленную из высокорезистивного кремния, на поверхности которой был изготовлен копланарный волновод. 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. Детектор размещался на зондовой станции, оснащенной многокоординатными механическими манипуляторами, при помощи которых ко входу и выходу детектора прецизионно подключались микроволновые копланарные зонды. Отдельно с использованием векторного анализатора был измерен коэффициент отражения от входа детектора в диапазоне частот от 0.1 до 20 ГГц. Его величина не превышала –10 дБ, таким образом, эффектами, связанными с отражением излучения от входа детектора, можно пренебречь. Также была проверена работоспособность детектора. Для этого на вход детектора подавалось излучение, модулированное по амплитуде с относительной маленькой частотой в 30 кГц, при этом на выходе детектора возникало осциллирующее с такой же частотой напряжение, которое измерялось синхронным детектором. Зависимость напряжения на выходе детектора от частоты излучения представлена на рис. 1б для уровня мощности в 0 дБм. Отдельно было проверено, что все последующие эксперименты проводились в линейном по мощности режиме.

Быстродействие детектора оценивалось экспериментально по анализу эффекта смешивания в микроволновом частотном диапазоне. Для этого вблизи от детектора размещалась дополнительная рупорная антенна, подключенная к микроволновому генератору. Излучение, исходящее из этой антенны, падало на детектор и также приводило к появлению ненулевого напряжения на выходе детектора. Частота этого излучения $F_0 = 15.05$ ГГц подбиралась из соображения максимизации сигнала на выходе детектора. Уровень мощности излучения выбирался так, чтобы детектор работал в линейном режиме. Подчеркнем, что несмотря на то, что при такой постановке измерения детектор работает фактически в квазиоптическом режиме, во всех последующих измерениях частота F_0 оставалась постоянной, а значит, все паразитные эффекты, связанными с изрезанной частотной характеристикой рупорной антенны, а также эффекты интерференции между отраженными и падающими электромагнитными волнами, не оказывают никакого влияния на итоговые экспериментальные результаты. Дополнительно на вход детектора с микроволнового генератора с использованием согласованных микроволновых копланарных зондов подавалось переменное напряжение с частотой F , лежавшей в диапазоне от 0.1 до 20 ГГц. При этом на выходе детектора возникал сигнал на серии различных частот, в том числе и на разностной $F - F_0$. К выходу детектора с использованием аналогичного копланарного зонда подключался анализатор спектра, что и позволяло анализировать амплитуду сигнала на разностной частоте.

Типичный пример пика сигнала смешивания, измеренный анализатором спектра, в зависимости от разностной частоты представлен на рис. 1в в логарифмическом масштабе. Отметим, что показана непосредственно мощность сигнала P , пропорциональная квадрату амплитуды. Постепенное изменение F приводило к смещению наблюдаемого сигнала по частоте. Более того, при увеличении частоты F (т.е. уменьшении разностной частоты $F - F_0$) менялась также и амплитуда наблюдаемого сигнала.

Зависимость сигнала смешивания от разностной частоты представлена на рис. 1г в логарифмическом масштабе. Экспериментальные данные представлены синими кругами. Данные смещены по оси ординат для удобства. Отметим, что на таких частотах уже нельзя пренебрегать поглощением как в подводящем излучение коаксиальном кабеле, так и коаксиальном кабеле, соединяющем выход детектора с анализатором спектра. Параметры кабелей были измерены независимо, а поглощение в них уже учтено в итоговых экспериментальных данных, показанных на рис. 1. Хорошо виден общий ход экспериментальной зависимости — уменьшение уровня сигнала с увеличением разностной частоты. Разброс

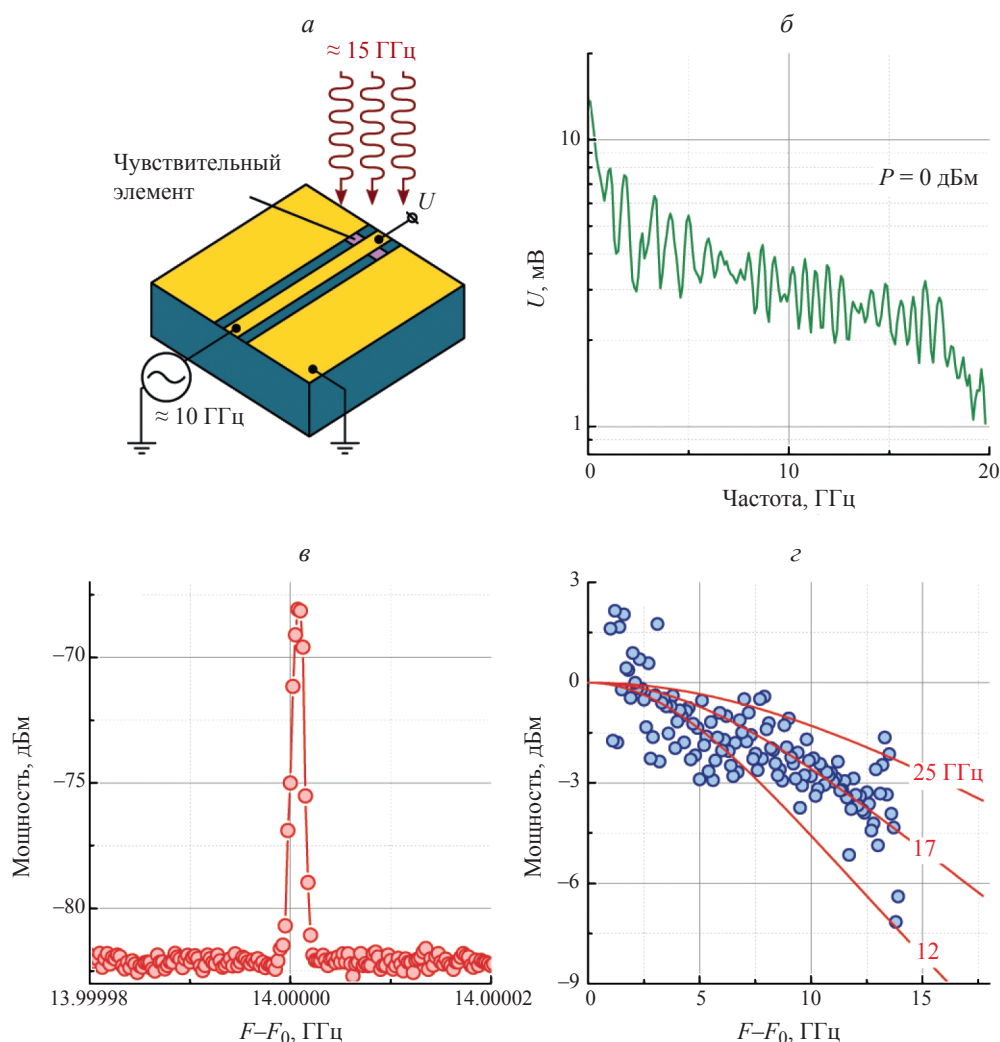


Рис. 1. Принципиальная схема детектора и схема измерения. В щелях копланарного волновода расположены чувствительные элементы, в которых происходит ректификация переменного электрического поля волны. На вход детектора при помощи микроволнового копланарного зонда подается переменное электрическое поле (а). Детектор дополнительно облучается электромагнитным излучением с частотой ≈ 15 ГГц. Выход детектора подключается к анализатору спектра. Частотная зависимость постоянного напряжения на входе детектора (б). Типичный сигнал смешивания, измеряемый анализатором спектра (в). Зависимость амплитуды сигнала смешивания от разностной частоты (з). Экспериментальные данные обозначены синими кругами. Красные сплошные линии – теоретические кривые согласно формуле (1) с параметром $F_0 = 25, 17$ и 12 ГГц, соответственно.

экспериментальных точек вокруг огибающей, по всей видимости, связан с остаточными эффектами интерференции в подводящем тракте, а также в кабеле между выходом детектора и анализатором спектра.

Проанализируем представленную экспериментальную зависимость. Для сигнала смешивания детектора с полосой f_0 , которая и определяет быстродействие детектора, можно ожидать следующей зависимости:

$$V(f) = \frac{V(0)}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}.$$

Здесь $V(f)$ – амплитуда сигнала смешивания на выходе детектора на разностной частоте

$f = F - F_0$. Аппроксимация экспериментальных данных зависимостью такого типа показана на рис. 1г сплошными линиями. Полученное из аппроксимации значение f_0 составляет 17 ГГц. Для сравнения также проведены линии соответствующие разным f_0 в 12 и 25 ГГц. Значения f_0 указаны вблизи каждой кривой. Хорошо видно, что частотная полоса детектора заведомо превышает величину в 12 ГГц. Такое значение превосходит в том числе и полосу аналогичных плазмонных детекторов на базе GaAs, в которых ранее было получено значение f_0 в 9 ГГц принципиально схожим методом. Подчеркнем также, что в проведенных ранее экспериментах на детекторах на базе GaAs было показано, что измерения методом смешивания дают сход-

ную оценку времени отклика с более прямыми экспериментами, в которых анализировался отклик детектора на ультракороткий импульс электромагнитного излучения [23].

Используя экспериментально измеренную величину F_0 можно оценить время отклика детектора в $\tau = 60 \pm 10$ пс. Таким образом, плазменные детекторы на основе кремния имеют низкое время отклика, а значит, могут найти применение в различных телекоммуникационных приложениях.

Далее было экспериментально измерено быстрое действие плазмонного детектора электромагнитного излучения на основе кремния. Для этого были выполнены эксперименты по измерению эффекта смешивания в микроволновом частотном диапазоне. Чувствительный элемент детектора при этом встраивался в щели согласованного копланарного волновода, нанесенного на поверхность кристалла. Анализ затухания сигнала смешивания с увеличением разностной частоты позволил оценить характерное время отклика детектора в $\tau = 60 \pm 10$ пс.

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. Microw.* 2021. V. 1. No. 1. P. 43.
6. Tamburini F., Licata I. // *Particles.* 2024. V. 7. No. 3. P. 576.
7. Yang X., Liu Y., Liu W. et al. // *Trends Biotechnol.* 2016. V. 34. No. 10. P. 810.
8. Khan S., Acharyya A., Inokawa H. et al. // *Photonics.* 2023. V. 10. No. 7. P. 800.
9. Tzydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V. et al. // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. No. 6. P. 632.
10. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // *Appl. Optics.* 2021. V. 60. No. 33. P. 10448.
11. Shchepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al. // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. No. 6. P. 655.
12. Jelali M., Papadopoulos K. // *Processes.* 2024. V. 12. No. 4. P. 712.
13. Nsengiyumva W., Zhong Sh., Zheng L. et al. // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2023. V. 72. P. 1.
14. Torkaman P., Yadav G.S., Wang P.-Ch. et al. // *IEEE Access.* 2022. V. 10. P. 65572.
15. Ghavidel A., Myllymaki S., Kokkonen M. et al. // *Engin. Reports.* 2022. V. 4. No. 3. Art. No. e12474.
16. Moon S.R., Kim E.S., Sung M. et al. // *J. Lightwave Technol.* 2022. V. 40. No. 2. P. 499.
17. Lyu Y., Kyosti P., Fan W. // *China Commun.* 2023. V. 20. No. 6. P. 26.
18. Хисамеева А.Р., Щепетильников 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.
19. Koenig S., Lopez-Diaz D., Antes J. et al. // *Nature Photon.* 2013. V. 7. No. 12. P. 977.
20. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. No. 10. Art. No. 106805.
21. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Zarezin A.M. et al. // *Phys. Rev. B.* 2019. V. 99. No. 24. Art. No. 241406(R).
22. Muravev V.M., Kukushkin I.V. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. No. 8. Art. No. 082102.
23. 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.
24. Shchepetilnikov A.V., Kaysin B.D., Gusikhin P.A. et al. // *Opt. Quantum Electron.* 2019. V. 51. No. 12. P. 1.

The response time of a silicon-based plasmonic detector

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

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

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

The response time of a silicon-based plasmonic detector of electromagnetic radiation was investigated. For this purpose, frequency mixing experiments were carried out in the microwave frequency range. The sensitive element of the detector was embedded in the slits of a matched coplanar waveguide. The response time $\tau = 60 \pm 10$ ps was estimated from the attenuation of the signal amplitude with increasing the difference frequency.

Keywords: plasmonic detector, electromagnetic radiation, waveguide, response time