

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 07.57.Kp, 85.30.Tv УДК 621.382.323, 621.3.029.65, 621.3.029.66
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109330>

ОДНОЭЛЕМЕНТНОЕ ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБ-ТГц/ТГц ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

И. А. Лысюк, А. Г. Голенков, С. Е. Духнин, В. П. Рева, А. В. Шевчик-Шекера, Ф. Ф. Сизов

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины,
03028, Киев, пр. Науки 41, тел./факс 525-62-96
lysiuk@isp.kiev.ua, golenkov@isp.kiev.ua, sedukhnin@gmail.com, vpreva@isp.kiev.ua,
annashsh82@gmail.com, sizov@isp.kiev.ua

ОДНОЭЛЕМЕНТНОЕ ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБ-ТГц/ТГц ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

И. А. Лысюк, А. Г. Голенков, С. Е. Духнин, В. П. Рева, А. В. Шевчик-Шекера, Ф. Ф. Сизов

Аннотация. В работе рассмотрено приемное устройство для регистрации электромагнитного излучения суб-ТГц/ТГц диапазона спектра, чувствительным элементом которого есть кремниевый полевой транзистор, подключенный к антенне затвором и истоком. Описано геометрию чувствительного элемента, принцип работы приемного устройства, методику измерения чувствительности и мощности эквивалентной шуму (NEP). Для приемного устройства разработана и изготовлена съёмная система асферических линз, приведена измеренная функция рассеяния точки на частоте излучения 140 ГГц. На этой же частоте излучения протестирована работа приемного устройства, измерена чувствительность $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт и мощность эквивалентная шуму $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц) $^{-1/2}$.

Ключевые слова: суб-ТГц, ТГц, Si-MOSFET, полевой транзистор, NEP , приемник

ОДНОЕЛЕМЕНТНЫЙ ПРИЙМАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ РЕЕСТРАЦИИ ВИПРОМІНЮВАННЯ СУБ-ТГц/ТГц ДІАПАЗОНА НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА

I. O. Lysiuk, O. G. Golenkov, S. E. Dukhnin, V. P. Reva, A. V. Shevchik-Shekera, F. F. Sizov

Анотація. В роботі розглянуто приймальний пристрій для реєстрації електромагнітного випромінювання суб-ТГц/ТГц діапазону спектра, чутливим елементом якого є кремнієвий польовий транзистор, підключений до антени затвором й витоком. Описано геометрію чутливого елемента, принцип роботи приймального пристрою, методику вимірювання чутливості і потужності еквівалентної шуму (*NEP*). Для приймального пристрою розроблена та виготовлена з'йомна система лінз, наведено виміряну функцію розсіяння точки на частоті джерела випромінювання 140 ГГц. На цій частоті випромінювання випробувано роботу приймального пристрою, виміряно чутливість $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт та потужність еквівалентну шуму $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц)^{-1/2}.

Ключові слова: суб-ТГц, ТГц, Si-MOSFET, польовий транзистор, NEP, приймач

SUB-THz/THz RADIATION DETECTOR DEVICE BASED ON Si-MOSFET

I. O. Lysiuk, A. G. Golenkov, S. E. Dukhnin, V. P. Reva, A. V. Shevchik-Shekera, F. F. Sizov

Abstract. A sub-THz/THz radiation detector device based on Si-MOSFET has been presented. Si-MOSFET source and gate connected to an antenna serves as a detector element. Geometry of the Si-MOSFET antenna, principle of device operation, method of estimating the sensitivity and noise equivalent power (*NEP*) have been described. A removable system of aspheric lenses has been developed and made for this detector device, a measured point spread function of the system of aspheric lenses has been given at the frequency 140 GHz. The detector device has been tested at the same frequency; sensitivity and NEP of the detector device have been estimated and they are equal to $S=2.8 \times 10^5$ V/W, $NEP=4.3 \times 10^{-10}$ W (Hz)^{-1/2}, accordingly.

Keywords: sub-THz, THz, Si-MOSFET, NEP, detector

Введение

Электромагнитное излучение субтерагерцового и терагерцового (суб-ТГц/ТГц) диапазона спектра активно используется в биологии, медицине, системах безопасности и контроля, а также других областях науки и техники [1, 2]. Одним из важных направлений является дистанционный неразрушающий контроль скрытых предметов находящихся в неметаллических контейнерах изготовленных

из материалов, прозрачных в терагерцовом диапазоне (бумага, пластик, пенопласт, резина, ткань, керамика и др.). Эти и другие приложения требуют надежных, дешевых, чувствительных приемников излучения, работающих при комнатных температурах.

Как правило, мощность эквивалентная шуму *NEP* (noise equivalent power) неохлаждаемых или слабоохлаждаемых приемников суб-ТГц/ТГц излучения находятся в диапазоне $NEP = 10^{-9} \dots 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2}.

Среди предложенных в последнее время принципов детектирования суб-ТГц/ТГц излучения можно выделить приемник излучения, основанный на эффекте выпрямления высокочастотного индуцированного тока в канале полевого транзистора обусловленного нелинейностью электрических характеристик транзистора [3-5] или генерации плазменных колебаний [6] в канале. При относительно небольшой стоимости единицы продукции использование стандартной кремниевой технологии для изготовления полевых транзисторов как приемников суб-ТГц/ТГц излучения позволяет улучшить стабильность и повторяемость их характеристик.

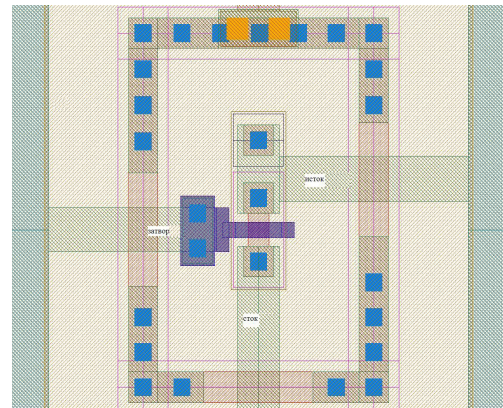
В работе рассмотрена возможность использования в качестве суб-ТГц/ТГц приемников кремниевых металл-оксид-полупроводниковых полевых транзисторов (Si-MOSFET, silicon metal – oxide – semiconductor field – effect transistor) [3-4] и проверена его работа на частоте 140 ГГц.

Для регистрации суб-ТГц/ТГц излучения предложено приемное устройство, состоящее из Si-MOSFET транзистора с подключенной к нему антенной и усилителем. В приемном устройстве предусмотрена съемная сборка из асферических линз, которая используется при необходимости для фокусировки суб-ТГц/ТГц излучения на чувствительный элемент.

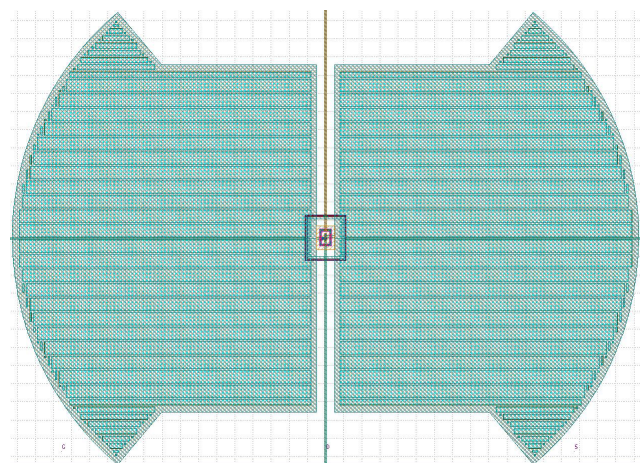
Приемный элемент Si-MOSFET транзистор

В качестве приемника был использован *n*-канальный кремниевый Si-MOSFET транзистор с подключенной между затвором и истоком антенной (рис. 1 а). Для изготовления приемника был использован 350 нм CMOS технологический процесс фирмы X-Fab Semiconductor Foundries AG. Процесс включает изготовление *n*-канальных MOSFET транзисторов в изолированном «кармане» (ISOMOS), 3 слоя металлической разводки шин, поликремниевые конденсаторы на 0,001 Ом кремниевой подложке *p*-типа, ориентации $\langle 100 \rangle$, с эпитаксиальным слоем $(8,0 \pm 1.2)$ Ом см. После изготовления транзисторов подложка была утонена до толщины 290 мкм. Геометрические размеры транзистора – ширина канала $t=0,5$ мкм, длина канала $l=0,35$ мкм. Видно, что габаритные размеры антенны (длина $a=350$ мкм, ширина $b=190$ мкм, радиус кривизны $r=170$ мкм) намного больше размера Si-MOSFET транзистора (см. рис 1 б).

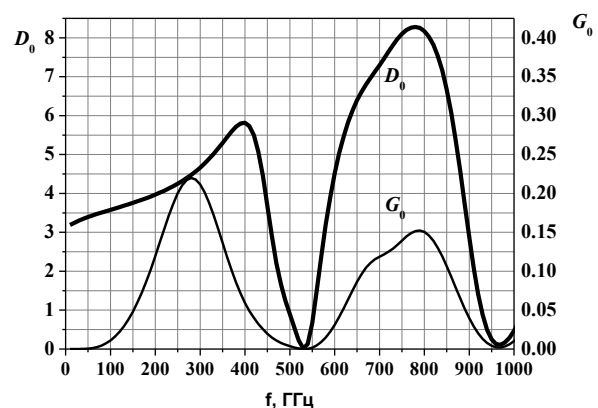
Антенна оптимизирована для детектирования на частоте 280 ГГц. Рассчитанные спектральные характеристики направленности D_0 и коэффициента усиления G_0 [7] представлены на рис 1 в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 1 Геометрия приемника излучения с антенной: а) топология *n*-канального кремниевый МОП-транзистора; б) внешний вид антенны (габаритные размеры 190 и 350 мкм, радиус кривизны $r=170$ мкм), в) рассчитанные спектральные характеристики направленности D_0 и коэффициента усиления G_0 спроектированной антенны.

Принцип работы и конструкция

При попадании на антенну транзистора суб-ТГц/ТГц излучения в антенне индуцируется высокочастотный ток, часть этого тока попадает в канал Si-MOSFET транзистора и выпрямляется транзистором за счёт его нелинейной характеристики, в результате на истоке и стоке появляется постоянное напряжение, которое усиливается усилителем, с коэффициентом усиления по напряжению 2000. Выход усилителя является выходом приёмного устройства.

При использовании приемного устройства рекомендуется увеличивать мощность излучения, которая попадает на чувствительный элемент с помощью линз или зеркал. Для этого суб-ТГц/ТГц излучение фокусируется внешней линзой или зеркалом на антенну Si-MOSFET транзистора.

Для фокусировки излучения на антенну транзистора можно также использовать съёмную систему линз, которая состоит из двух плоско-выпуклых асферических линз, поверхность – гиперболоид, которая позволяет скорректировать aberrации и сфокусировать излучение в минимальное по размерам пятно.

На рис. 2. представлены фотография спроектированного и изготовленного суб-ТГц/ТГц приёмного устройства (а), а также схема его тестирования со съёмной сборкой из асферических линз (б).

Материалом для съёмной системы линз выбран материал 3D печати – полистирол (HIPS), показатель преломления которого $n=1,56$. HIPS имеет однородное стабильное пропускание около 80-90%, начиная с длины волны ~ 200 мкм. Диаметр фокусирующих линз $D = 36$ мм, относительное отверстие линз $D/f=1/1.38$. Для изготовления линз и корпуса использована аддитивная технология 3D печати, позволяющая с точностью до 100 мкм, по цифровой модели, изготовить изделия со сложными поверхностями, по доступной цене.

На рис. 3 представлена функция рассеяния точки от 140 ГГц источника, сфокусированная съёмными асферическими линзами в плоскость приемника (координаты X, Y). Расчетные и экспериментальные данные центрального максимума функции рассеяния точки - диска Эйри (Airy), имеют близкие значения ($D_{Airy-calc} \approx 6,7$ мм, $D_{Airy-meas} \approx 8$ мм), соответственно, этот тип линз может использоваться для терагерцовых систем зрения.



а)



б)

Рис. 2. а) Фотография изготовленного одноэлементного приемного устройства; б) фотография схемы регистрации суб-ТГц/ТГц излучения с использованием источника на 140 ГГц и съёмной сборки из асферических линз.

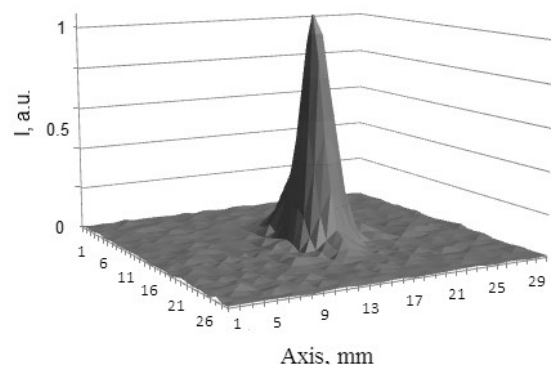


Рис. 3. Функция рассеяния точки, построенной системой асферических линз для приемного устройства на частоте 140 ГГц.

Методика измерения чувствительности и NEP приемника излучения

Одним из основных параметров приемника излучения является *NEP* (noise equivalent power) - мощность, эквивалентная шуму. Значение *NEP* определяет минимальную мощность излучения, которое попадает на приемник и которую он может регистрировать, при условии, что отношение сигнал/шум равно единице.

Для определения *NEP* приемника необходимо знать его чувствительность и шум:

$$NEP = \frac{U_{noise}}{S}, \quad (1)$$

где U_{noise} - амплитуда шума в полосе частот 1 Гц, S - чувствительность приемника.

Чувствительность приемника определяется отношением изменения напряжения U на приемнике при поглощении приемником излучения мощности W :

$$S = \frac{U}{W}. \quad (2)$$

Мощность, которая попадает на приемник, определялась интегрированием распределения интенсивности излучения по площади антенны. Для упрощения расчетов, площадь антенны считалась прямоугольником со сторонами $a=350$ мкм и $b=190$ мкм. Пространственное распределение интенсивности и мощность пучка в плоскости расположения приемника измерялась экспериментально. Для удобства интегрирования экспериментальная кривая может быть аппроксимирована функцией Гаусса.

Источник излучения модулировался на частоте 49 Гц. Выпрямленное высокочастотное напряжение кремниевым полевым транзистором усиливалось усилителем, амплитуда выпрямленного напряжения на выходе усилителя измерялась осциллографом Tektronix TDS 2012. Шумы приемного устройства в отсутствии излучения измерялись синхронным детектором (lock-in amplifier) SR830.

Результаты измерений и расчетов

Приемник освещался 140 ГГц источником излучения по схеме, показанной на рис. 4, из-

лучение от источника фокусировалось на приемнике внешней фторопластовой линзой.

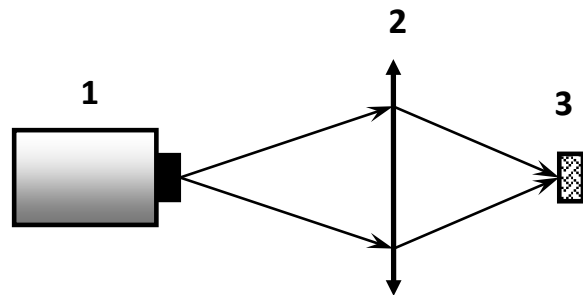


Рис. 4. Схема для измерения отклика, распределения интенсивности и мощности излучения в плоскости расположения детектора: 1 - источник излучения с частотой 140 ГГц, 2 - фторопластовая линза, 3 - приемник излучения (Si-MOSFET транзистор – для измерения отклика, пироэлектрик МГ-30 – для измерения распределения интенсивности, THZ12D-35-VP – для измерения мощности).

Для измерения пространственного распределения интенсивности излучения использовалась автоматизированная двухкоординатная оптическая система сканирования с пироэлектрическим приёмником излучения МГ-30. Размер чувствительного элемента 1×1 мм. Полученные кривые нормировались по максимуму, результат в виде пространственного распределения интенсивности представлен на рис. 5.

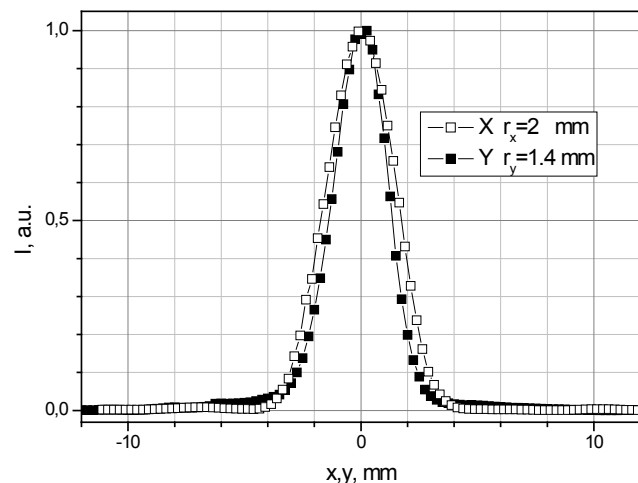


Рис. 5. Распределение интенсивности вдоль осей X, Y в плоскости перпендикулярной к оптической оси.

Главный максимум распределения интенсивности в обоих взаимно-перпендикулярных срезах аппроксимируем функцией распределения Гаусса:

$$I(x, y) = \frac{P}{B} e^{-\frac{x^2}{r_x^2} - \frac{y^2}{r_y^2}}, \quad (3)$$

где B – нормировочный коэффициент, и $B = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{r_x^2} - \frac{y^2}{r_y^2}} dx dy = \pi r_x r_y$, P – мощность излучения от источника, сфокусированная на плоскость

расположения приемника. Изменяя расстояние, где интенсивность в основном максимуме уменьшается в e раз, находим характерные размеры пространственного распределения интенсивности (3) $r_x=2$ мм по горизонтали и $r_y=1.4$ мм по вертикали (см. рис. 5). При этом измеренный диаметр Эйри для фторопластовой линзы приблизительно равен 8 мм, также как и для съемной системы линз.

Для измерения мощности излучения в месте расположения транзисторного приемника излучения устанавливался пироэлектрический измеритель мощности Gentec с детектором THZ12D-35-VP, который имеет рабочую апертуру 12 мм. При измерении мощности излучения источник работал в непрерывном режиме. Из рис. 5 следует, что интенсивность излучения значительно уменьшается на расстоянии большем, чем 6 мм (радиус апертуры измерителя мощности). Поэтому частью мощности излучения, выходящей за апертуру, можно пренебречь.

Мощность, измеренная с помощью THZ12D-35-VP, принимается за мощность P в формуле (3).

Мощность W , которая попадает на площадь детектора, равна:

$$W = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} I(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где a и b – длина и ширина антенны. Используя (3)-(4), получаем выражение для мощности W , которая попадает на антенну:

$$W = \eta P, \quad (5)$$

где η – коэффициент, который указывает, какая

часть мощности в плоскости расположения приемника попадает на приемник, η определяется соотношением

$$\eta = \frac{1}{\pi r_x r_y} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} e^{-\frac{x^2}{r_x^2} - \frac{y^2}{r_y^2}} dx dy. \quad (6)$$

Численное интегрирование (6) дает значение $\eta=7,5 \times 10^{-3}$.

С помощью амплитудной модуляции получена зависимость напряжения амплитуды выхода U приемного устройства от мощности пучка P в сечении, где расположен приемный полевой транзистор (рис. 6). Используя график, определяем коэффициент пропорциональности k в соотношении

$$U = kP \quad (7),$$

где $k = 2,1 \times 10^3$ В/Вт. Согласно формуле (2) и используя (5) и (7) определяем чувствительность S устройства:

$$S = \frac{k}{\eta}, \quad (8),$$

откуда $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт.

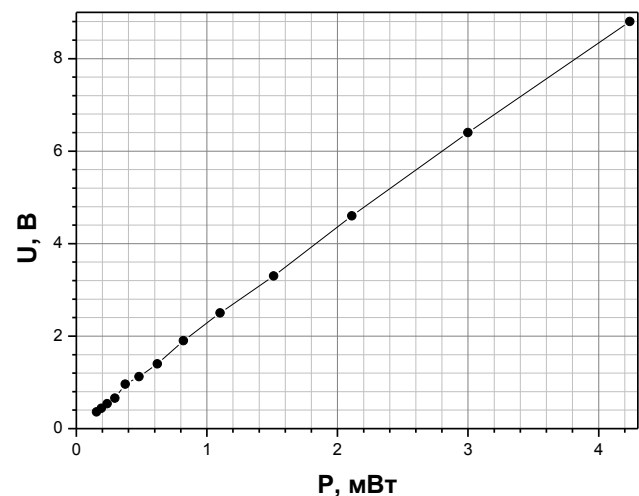


Рис. 6. Зависимость амплитуды напряжения на выходе приемного устройства от мощности излучения сфокусированного в перпендикулярной плоскости к оптической оси, в месте расположения кремниевого полевого транзистора.

Шум приемного устройства U_{noise} при отключенном источнике излучения измерялся с помощью SR830 и равен $U_{noise} = 1,2 \times 10^{-4}$ В (Гц)^{-1/2}.

Рассчитанная по формуле (1) мощность эквивалентная шуму NEP приемного устройства равна $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц)^{-1/2}.

Шумы разработанного приемного устройства определялись не только шумами детектора (полевого кремниевого транзистора), но и шумами усилителя. Для уменьшения шумов и улучшения значения NEP нужно использовать усилитель с меньшими шумами.

Выводы

В работе описан принцип и реализация приемного устройства для регистрации электромагнитного излучения суб-ТГц/ТГц диапазона на основе чувствительного элемента – кремниевого полевого транзистора.

Для суб-ТГц/ТГц диапазона спектра показана возможность изготовления линз, по новой технологии, методом послойного создания физического объекта с использованием цифровой 3D-модели. Представлены близкие по значению расчетные и экспериментальные данные центрального максимума функции рассеяния точки -диска Эйри ($D_{\text{Airy-calc}} \approx 6,7$ мм, $D_{\text{Airy-meas}} \approx 8$ мм), что показывает возможность применения высокоточной 100 мкм технологии 3D печати для изготовления оптических деталей, работающих в миллиметровом диапазоне спектра.

Проведена оценка основных параметров разработанного приёмника суб-ТГц/ТГц излучения, таких как чувствительность и мощность, эквивалентная шуму.

На частоте 140 ГГц чувствительность равна $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт, мощность эквивалентная шуму составляет $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц)^{-1/2}.

Следующим шагом, было бы целесообразно создание интегрированного приёмника излучения вместе с усилителем изготовленном на одном кристалле.

Список использованной литературы

[1]. Sizov F., Rogalsky A. THz detectors// *Progress in Quantum Electronics.*, 34. pp. 278-347 (2010).

[2]. D. Saeedkia (ed.), *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications.* Woodhead Publishing, Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi, 662 p., (2013).

[3]. M. Sakhno, F. Sizov, A. Golenkov. Uncooled THz/sub-THz Rectifying Detectors: FET vs. SBD // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34 (12), pp. 798-814 (2013).

[4]. Sub-THz radiation room temperature sensitivity of long-channel silicon field effect transistors. F. Sizov, A. Golenkov, D. But, M. Sakhno, V. Reva *Optoelectronics Review* 20(20)DOI: 10.2478/s11772-012-0024-z

[5]. A. G. Golenkov, F. F. Sizov. Performance limits of terahertz zero biased rectifying direct detection // *Semiconductor Physics, Quantum Electronic & Optoelectronics.* 19 (2), pp. 129-138 (2016).

[6]. M. Dyakonov, M. Shur. Plasma wave electronics: Novel terahertz devices using two dimensional electron fluid // *IEEE Trans. Electron Devices*, 43, pp. 1640-1645 (1996).

[7]. C. A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*, 3d Edition, Wiley, New Jersey, 159 p., (2005).

Стаття надійшла до редакції 31.08.2017 р.

PACS 07.57.Kp, 85.30.Tv UDC 621.382.323, 621.3.029.65, 621.3.029.66
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109330>

SUB-THz/THz RADIATION DETECTOR DEVICE BASED ON Si-MOSFET

I. O. Lysiuk, A. G. Golenkov, S. E. Dukhnin, V. P. Reva, A. V. Shevchik-Shekera, F. F. Sizov

V. E. Lashkaryov Institute of semiconductor physics, NAS of Ukraine
03028, Kyiv, pr. Nauki 41, tel/fax 525-62-96, lysiuk@isp.kiev.ua

Summary

The aim of the work was to develop, produce and measure the sensitivity and NEP of the uncooled sub-THz/THz radiation detector device based on a Si-MOSFET sensitive element. To manufacture Si-MOSFET, 350-nm CMOS technological process was used. The system of aspheric lenses was produced with 3D printer. Spatial distribution of the radiation intensity in the plane of sensitive element location was ascertained by scanning. The transferred power to the antenna of sensitive element was obtained by integration of the radiation intensity over the antenna area. The sensitivity and NEP of detector device at the radiation frequency 140 GHz were estimated as follows: $S=2.8 \times 10^5$ V/W_T та $NEP=4.3 \times 10^{-10}$ W_T (Hz)^{-1/2}. The obtained values of sensitivity and NEP allow making the conclusion that is detector device can be used to detect sub-THz/THz electromagnetic radiation.

Keywords: sub-THz, THz, Si-MOSFET, NEP, detector

PACS 07.57.Kp, 85.30.Tv УДК 621.382.323, 621.3.029.65, 621.3.029.66
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109330>

ОДНОЕЛЕМЕНТНИЙ ПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ СУБ-ТГц/ТГц ДІАПАЗОНА НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА

І. О. Лисюк, О. Г. Голенков, С. Є. Духнін, В. П. Рева, А. В. Шевчик-Шекера, Ф. Ф. Сизов

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,
03028, Київ, пр. Науки 41, тел./факс 525-62-96

Реферат

Метою роботи було розробка і виготовлення неохолоджуваного приймального пристрою для детектування електромагнітного випромінювання суб-ТГц/ТГц діапазону спектру чутливим елементом якого є кремнієвий польовий транзистор, підключений до антени затвором й витоком та визначення основних параметрів приймального пристрою: чутливості та потужності еквівалентної шуму (NEP). Для виготовлення кремнієвого польового транзистору використано

350 нм CMOS технологічний процес. Систему асферичних лінз отримано за допомогою 3D друку. Скануванням визначено просторовий розподіл інтенсивності в площині знаходження чутливого елемента приймального пристрою. Потужність, що падає на антену чутливого елемента пристрою отримано шляхом інтегрування просторового розподілу інтенсивності по площі антени. Визначено параметри приймального пристрою на частоті випромінювання 140 ГГц: чутливість $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт та $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц) $^{-1/2}$. Отримані значення чутливості та NEP дозволяють зробити висновок, що даний приймальний пристрій може бути застосований для реєстрації електромагнітного суб-ТГц/ТГц випромінювання.

Ключові слова: суб-ТГц, ТГц, Si-MOSFET, польовий транзистор, NEP, приймач