

## Применение CCD и КМОП устройств в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн

И.Н. Николаева\*

Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Сарове, кафедра физики  
Россия, 607328, Саров, ул. Парковая, д. 8

(Поступила в редакцию 25.05.2023; подписана в печать 14.07.2023)

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот в спектре электромагнитного излучения занимает промежуточное положение между инфракрасным и микроволновым диапазонами. К настоящему времени существующие приемники ТГц излучения являются инертными, имеют невысокое пространственное разрешение и высокую стоимость, что ставит вопрос о поиске подходящих доступных аналогов. Решением может стать использование матричных фотоприемных устройств на основе структур с зарядовой связью (ПЗС) и структур металл–оксид–полупроводник (КМОП), работающих в режиме туннелирования фотоэлектронов в зону проводимости за счет внешнего лазерного источника. В работе рассмотрены особенности регистрации модулированного электромагнитного излучения в расширенном миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с помощью ПЗС и КМОП матриц.

PACS: 07.57.Kp.

УДК: 535

Ключевые слова: терагерцовое излучение, детектирование терагерцового излучения.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ТГц диапазон частот является быстро развивающейся областью, которая включает исследования в области физики, химии, биологии и медицины. Рост исследовательской активности связан с развитием новых технологий [1]. Большой интерес к ТГц излучению представлен благодаря его нескольким уникальным свойствам:

- ТГц излучение является неионизирующим, что позволяет проводить безопасное неразрушающее исследование живых тканей,

- имеет большую проникающую способность сквозь диэлектрические материалы (такие как дерево, керамика, камень и т.д.), однако сильно поглощается молекулами воды,

- в ТГц диапазоне лежат частоты колебательно-вращательных переходов многих молекул (например, белков, ДНК) [2].

Однако особенности ТГц излучения накладывают ограничения на разработку методов детектирования. Поскольку большинство имеющихся источников обладают малой мощностью излучения, то необходимы достаточно чувствительные приемники для их обнаружения. В распоряжении исследователей имеются ТГц детекторы, однако на данный момент они крайне подвержены влиянию различного вида помех, имеют небольшое пространственное разрешение, а также сложны в изготовлении. Поэтому до сих пор актуален вопрос поиска доступного подходящего аналога ТГц приемника.

### 1. МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Недавние работы [3, 4] продемонстрировали потенциал использования обычных ПЗС и КМОП матриц для детектирования сильного ТГц излучения. По результатам работы КМОП матрицы показали себя более эффективно, позволив зарегистрировать ТГц изображения при меньших значениях энергии.

#### 1.1. Устройства с зарядовой связью

Принцип работы устройства с зарядовой связью (так же известно как CCD) основан на явлении внутреннего фотоэффекта. Падающий фотон с энергией больше ширины запрещенной зоны поглощается в обедненной области, генерируя электронно-дырочную пару. Электрическое поле разделяет эту пару так, что электрон остается в зоне обеднения, а дырка движется вглубь к подложке. Под положительно заряженным электродом электроны накапливаются в потенциальной яме, их количество пропорционально приложенному напряжению на электроде. При подаче соответствующей последовательности импульсов на электрод происходит перемещение зарядовых пакетов [5].

В настоящее время доступные ПЗС-матрицы могут работать в диапазоне от дальнего инфракрасного до рентгеновского излучения [6].

#### 1.2. Структуры металл–оксид–полупроводник

В технологии КМОП используются полупроводники  $n$ - и  $p$ -типа. На границе их контакта в результате диффузии основных носителей заряда во взаимно противоположных направлениях образуется обедненная область. В результате ионы обедненной области

\* NikolaevaIN@my.msu.ru

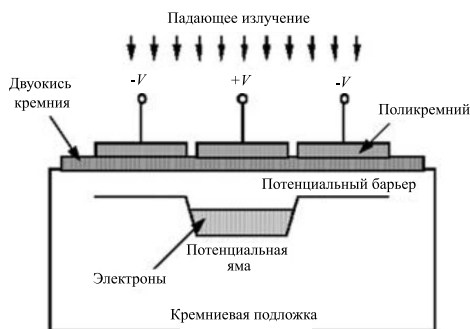


Рис. 1. Структура ПЗС-устройства

теряют свои основные носители заряда, и в *n*-области ионы становятся положительно заряженными, а в *p*-области — отрицательно. Такое распределение зарядов ионов приводит к возникновению электрического поля, разделяющего электронно-дырочные пары, возникающие в результате фотогенерации [7].

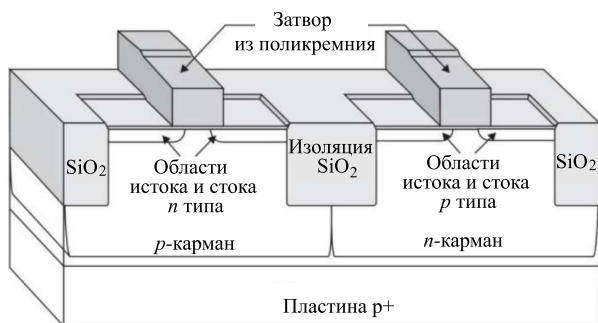


Рис. 2. Структура КМОП-устройства

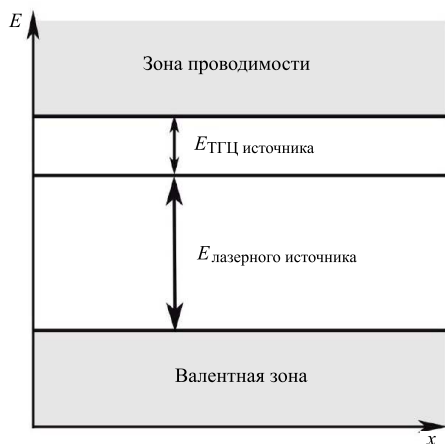


Рис. 3. Зонная диаграмма полупроводникового материала

## 2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Развитие методов генерации ТГц излучения стимулирует разработку методов их обнаружения. Разработка компактных достаточно чувствительных и недорогих ТГц детекторов очень важна, поскольку существующие методы обнаружения представляют ряд недостатков (например недостаточная эффективность) [8].

### 2.1. Детектирование с использованием лазерного излучения

Существуют способы визуализации ТГц пучков, основанные на взаимодействии ТГц и лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах. Возникающая поляризованность в кристалле модулирует лазерный пучок, из пространственного и временного профиля которого восстанавливаются характеристики ТГц пучка [9]. Это может быть полезно для визуализации пучков, но не подходит для построения изображений из-за слишком низкого разрешения.

### 2.2. Детектирование мощных ТГц импульсов

Устройства на основе ПЗС и КМОП матриц не способны зарегистрировать ТГц излучение, поскольку энергия ТГц кванта (0.04–0.004 эВ) много меньше ширины запрещенной зоны полупроводника (например, для кремния 1.12 эВ), поэтому ТГц кванту не хватает энергии для возбуждения электронов валентной зоны в зону проводимости. Нужны достаточно высокие значения напряженности электрического поля ТГц излучения (порядка МВ/см), чтобы основным механизмом генерации электронно-дырочных пар был туннельный эффект, либо ударная ионизация [10].

Недавняя работа [3] продемонстрировала возможность детектирования мощного ТГц излучения ПЗС и КМОП матрицами. По ее результатам КМОП-матрицы показали себя более эффективными и позволили регистрировать ТГц изображение при меньших значениях энергии. Однако в данном способе детектирования существует требование к мощному ТГц излучению.

### 2.3. Лазерный бустер

Поскольку энергия кванта ТГц излучения мала для возбуждения электрона валентной зоны в зону проводимости, то возможно использование внешнего лазерного источника (лазерный бустер), энергия которого должна не превышать энергию ширины запрещенной зоны полупроводникового материала.

В отличие от предыдущего метода, здесь величина энергии «бустерного» излучения, служащего для формирования энергетического трамплина для регистри-

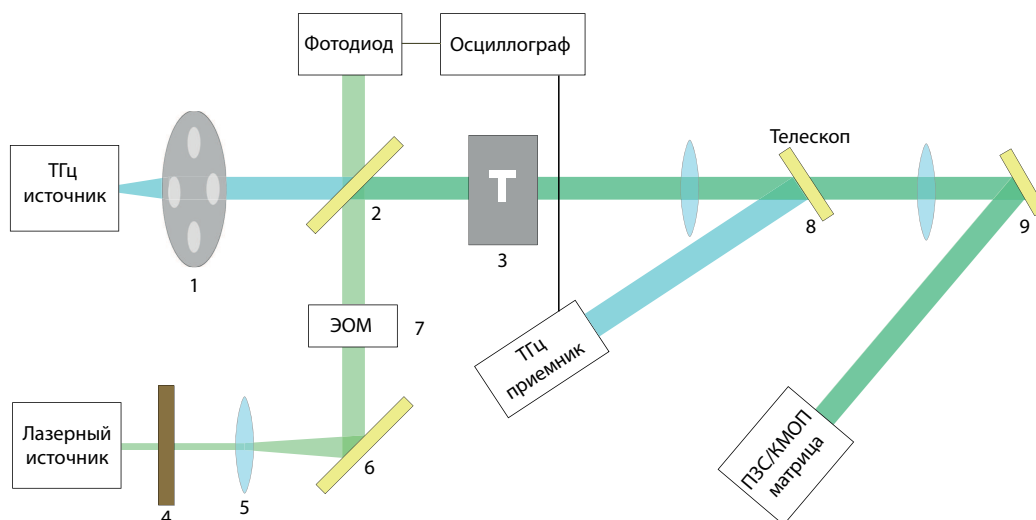


Рис. 4. Схема экспериментальной установки регистрации изображений в ТГц диапазоне ПЗС и КМОП матрицами: 1 — оптический модулятор излучения, 2,8 — делительная пластина, 3 — трафарет, 4 — светофильтр, 5 — рассеивающая линза, 6 — зеркало, 7 — электрооптический модулятор света, 9 — зеркало

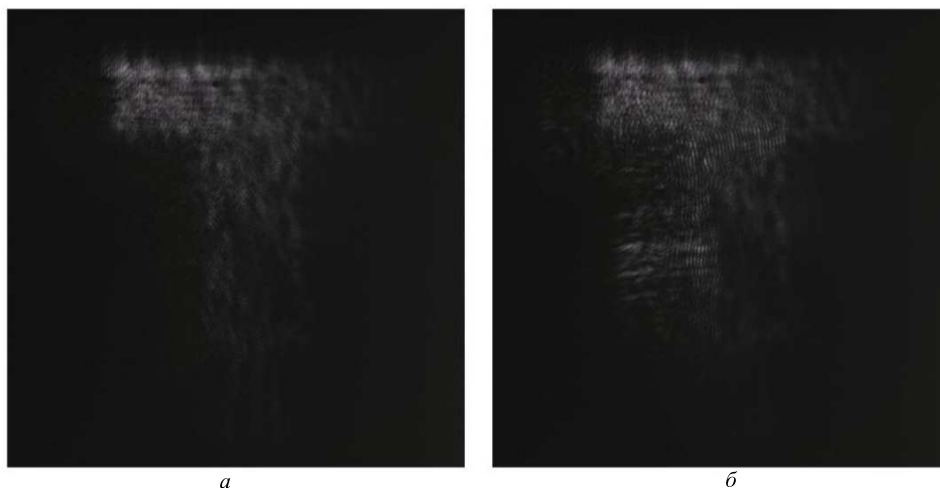


Рис. 5. Снимок с КМОП камеры TUCSEN ISH500, а — засветка матрицы лазерным излучением (в отсутствие ТГц излучения), б — только ТГц излучением

руемого ТГц излучения, может быть на порядки выше второго, что не требует применения высокоэнергетичных ТГц источников.

### 3. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для регистрации ТГц изображения использовалась схема, представленная на рис. 4. Непрерывное ТГц излучение с частотой 0.14 ТГц, выходной мощностью 20 мВт модулировалось рассекателем, коллимировалось двухлинзовым телескопом и направлялось на исследуемую матрицу. Для придания пространственного профиля пучкам использовался металлический трафарет в виде буквы Т.

В качестве лазерного источника использовался импульсно-периодический генератор с длиной волны 527 нм, длительностью импульса 7 нс и энергией в импульсе 150 мкДж. С помощью светофильтра лазерное излучение ослаблялось для предотвращения повреждения исследуемых матриц. Лазерное излучение линзой расширялось до размеров ТГц пучка и модулировалось быстродействующим электрооптическим модулятором. Режим работы модулятора позволял пропускать одиночный цуг лазерных импульсов, располагающийся во временных пределах ТГц импульса. Таким образом контролировался уровень энергии лазерного излучения, попадающего на полупроводниковую матрицу.

Были проведены эксперименты по детектированию ТГц излучения ПЗС и КМОП матрицами (KPC-S400, TUCSEN ISH500, PULSAR RECON 770R (78034)).

В момент попадания пучка лазерного излучения на матрицу видна засветка камеры, возникающая за счет возбужденных электронов лазерным излучением. После закрытия затвора модулятора на исследуемую матрицу попадал только ТГц пучок, который был зарегистрирован в виде смещенной буквы Т (рис. 5, б) (за счет преломления лазерного и ТГц пучков в линзах телескопа).

Результаты работы продемонстрировали возможность регистрации ТГц излучения КМОП матрицей. Как и ожидалось, ПЗС матрицы менее чувствительны к ТГц излучению, поэтому ТГц изображение удалось

получить только после предварительной обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучен механизм регистрации изображений полупроводниковыми матрицами на основе структур с зарядовой связью и КМОП структур. Проведена регистрация ТГц изображений за счет уменьшения ширины запрещенной зоны в ПЗС и КМОП структурах лазерными импульсами с заданными пространственно-временными характеристиками. Подтверждена способность регистрации излучения ТГц диапазона частот по крайней мере одной ПЗС и КМОП матрицами.

- 
- [1] *Redo-Sanchez A., Zhang X.C.* // IEEE Journal of Selected topics in quantum electronics. **14**, N 2. 260. (2008).
  - [2] *Ангелуц А.А., Балакин А.В., Евдокимов М.Г.* и др. // Квантовая электроника. **44**, № 7. 614. (2014).
  - [3] *Shalaby M., Vicario C., Hauri C.P.* // Optics Letters. **42**, N 22. 4596. (2017).
  - [4] *Shalaby M., Vicario C., Hauri C.P.* // Nature Communications. **6**, N 1. 8439. (2015).
  - [5] *Лазовский Л.* Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. СПб., 2008.
  - [6] *Faruqi A.R., Subramaniam S.* // Quarterly reviews of biophysics. **33**, N 1. 1. (2000).
  - [7] *Fossum E.R.* // IEEE transactions on electron devices. **44**, N 10. 1689. (1997).
  - [8] *Гибин И.С., Котляр П.Е.* // УФН. **6**, № 2. 117. (2018).
  - [9] *Brossard M., Cahyadi H., Perrin M.* et al. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. **7**, N 6. P. 741. (2017).
  - [10] *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Agranat M.B., Stepanov A.N.* // Optics Letters. **44**, N 17. 4099. (2019).

## Application of CCD and CMOS devices in the millimeter and submillimeter wavelength ranges

I.N. Nikolaeva

Moscow State University branch in Sarov, Department of Physics. Sarov, 607328, Russia  
E-mail: NikolaevaIN@my.msu.ru

The terahertz (THz) frequency range in the electromagnetic radiation spectrum occupies an intermediate position between the infrared and microwave ranges and the radiation within it has the properties of both. Currently, the existing THz radiation receivers are inert, have low spatial resolution and high cost, which raises the question of finding suitable affordable analogues. The solution may be the use of matrix photodetectors based on charge-coupled structures (CCD) and metal-oxide-semiconductor (CMOS) structures operating in the mode of tunneling photoelectrons into the conduction band due to an external laser source. The paper considers the features of registration of modulated electromagnetic radiation in the extended millimeter and submillimeter wavelength ranges using CCD and CMOS matrices.

07.57.Kp PACS:

*Keywords:* terahertz radiation, detection of terahertz radiation.

*Received 25 May 2023.*

### Сведения об авторах

Николаева Инесса Николаевна — студентка; e-mail: NikolaevaIN@my.msu.ru.