

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ ФОТОДИОДНОЙ ЯЧЕЙКИ

Мурашев В.Н., Леготин С.А., Ельников Д.С., Краснов А.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего, профессионального образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4), e-mail: vmurashev@mail.ru

Одной из важных задач современной науки и техники является регистрация и видеоизображение различного вида излучений - от видимого света и до частиц высоких энергий. Для их регистрации коротковолновых и ионизирующих излучений применяются монокристаллические и гибридные детекторы, которые отличаются по конструкции и принципу действия. В статье рассматривается новый тип детектора, матрица которого содержит функционально-интегрированные фотодиодные ячейки. В статье показано, что детекторы такого типа обладают высокой чувствительностью и рекордным быстродействием, что достигается за счет применения оригинальной электрической схемы и конструкции ячейки, в которой функционально интегрируются подзатворная область МОП транзистора и коллекторная область биполярного транзистора. Проведено моделирование работы детектора на основе данной конструкции.

Ключевые слова: функционально-интегрированная ячейка, матрица, детектор, приемник излучения.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE DETECTOR BASED ON FUNCTIONALLY INTEGRATED PHOTODIODE CELL

Murashev V. N., Legotin S. A., Elnikov D. S., Krasnov A. A.

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Leninskiy prospekt 4, Moscow, Russian Federation, 119991, e-mail: vmurashev@mail.ru

Registering and video imaging of various types of radiation from visible light to high-energy particles is the one of most important problems of modern science and technology. For registering short-wave and ionizing radiation monolithic-type and hybrid detectors varying by their design and operating principle are used. In this paper the new type of detector with matrix of functionally integrated cells is described. In this paper shown the high sensitivity and performance of the detector reached by using the proprietary circuitry and cell design with functionally integration of MOSFET's well with the JFET's collector area. Simulation of the operation of the detector on the basis of this design.

Keywords: functionally integrated cell, matrix, detector, radiation sensor

Введение

Известны, и широко применяются, ячейки фоточувствительной матрицы, содержащие фоточувствительные МОП структуры получившие название приборы с зарядовой связью [1, 2].

Несомненным достоинством ПЗС-детекторов является «чисто» двумерная картина события и малое число каналов считывания. К недостаткам, кроме малого уровня сигнала, следует отнести, в первую очередь, большое время считывания (десятки миллисекунд) при непрерывной чувствительности устройства, в том числе и в период считывания. Невелики и размеры промышленно выпускаемых детекторов (2 см²). Эти трудности заметно ограничивают возможности применения ПЗС-структур в экспериментах физики высоких энергий.

Важным достоинством ПЗС-структур является «чисто» двумерная картина получаемого изображения и малое число каналов считывания информации. К их недостаткам, следует отнести, малый уровень сигнала (милливольты), большое время считывания (десятки миллисекунд) и невозможность регистрации излучения в момент считывания информации. Кроме этого невелики и размеры промышленно выпускаемых ПЗС матриц (2 см^2) применяемых в детекторах. Эти недостатки существенно ограничивают возможность применения ПЗС-приборов в экспериментальных исследованиях физики высоких энергий. В последнее время все большее применение находят фоточувствительные матрицы на основе КМОП-ФД ячеек [3, 4]. Преимуществом КМОП-ФД детектора является возможность непрерываемой регистрации излучения во время считывания информации. Однако КМОП-ФД имеют невысокий квантовый выход (менее 50 %) из-за невысокого коэффициента заполнения активной областью площади ячейки и также не обладают необходимым быстродействием (менее 10 нс) для регистрации одиночных гамма и рентгеновских квантов излучаемых радиоактивными изотопами.

В связи с вышеуказанным авторами статьи предложен новый детектор, содержащий матрицу функционально-интегрированных фотодиодных ячеек в значительной степени лишенный перечисленных недостатков.

Детектор на основе функционально-интегрированной фотодиодной ячейки

На рис. 1, *а* показана электрическая схема биполярной функционально-интегрированной фотодиодной ячейки (Би-МОП-ФД), которая состоит из биполярного транзистора, коллектор которого подключен к шине питания U_{dd} , база к первому выводу конденсатора и второму выводу фоточувствительный элемента, который обозначен, как источник фототока I_{ϕ} , первый вывод 4 которого подсоединен к коллектору транзистора, эмиттер которого соединен с разрядной шиной, а второй вывод конденсатора подсоединен к адресной шине.

На рис. 2, *б* и рис. 3, *в* показаны соответственно топология и структура интегральной схемы ячейки Би-МОП-ФД, в которой имеется полупроводниковая подложка *n*-типа 1, на ней расположен электрод питания U_{dd} . Подложка является областью коллектора биполярного транзистора, где расположена область базы 2, в которой находится область эмиттера 4. На поверхности эмиттера расположен электрод разрядной шины Y , а на поверхности области базы 2 расположен подзатворный оксид МОП структуры, на котором расположен затвор 3, образующий электрод адресной шины X .

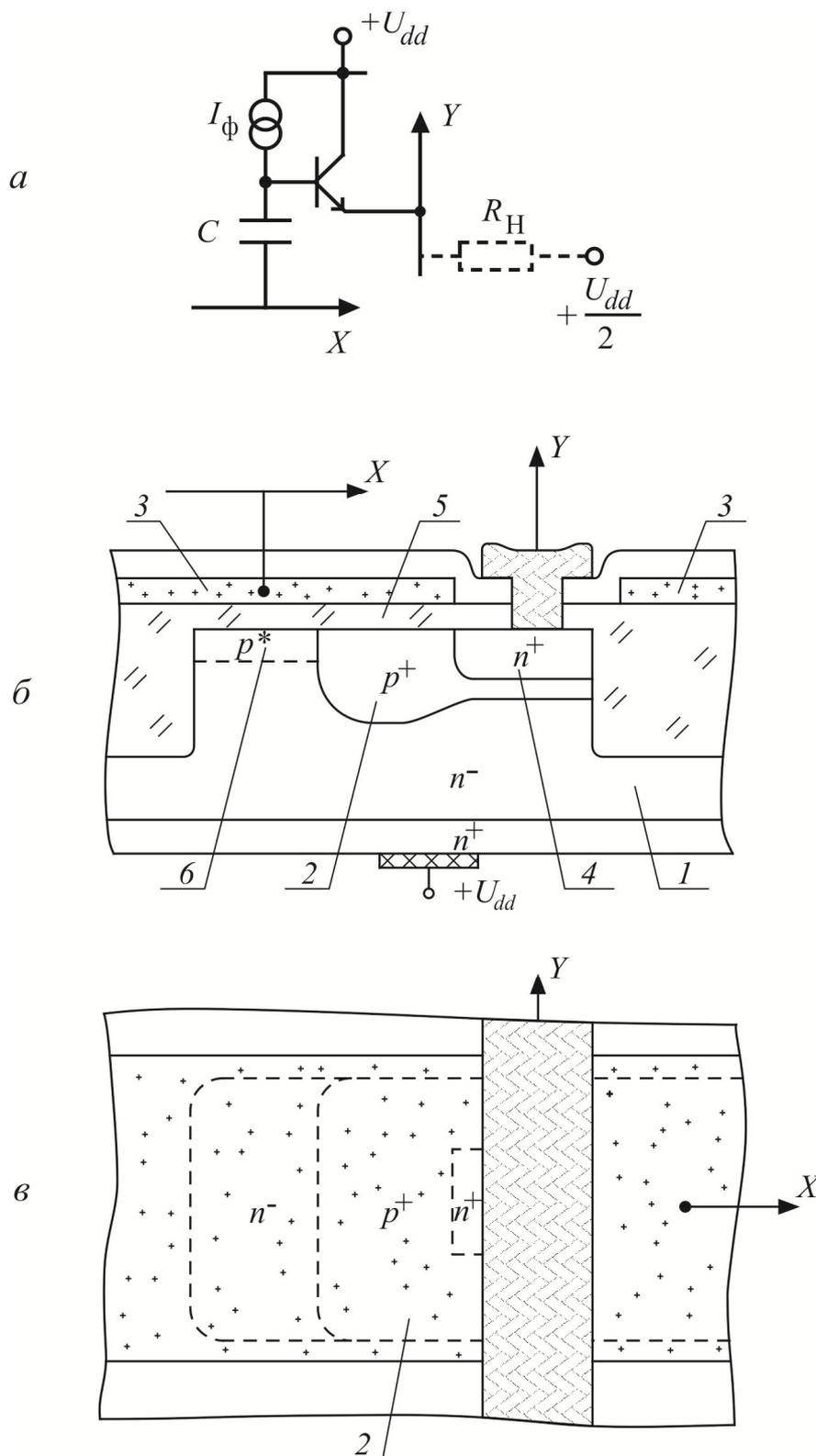


Рисунок 1 – Электрическая схема (а), топология (б) и конструкция (в) биполярно-емкостной ячейки фоточувствительной матрицы

Из рис.1 видно активная часть пиксели, в которой происходит генерация носителей заряда – это n -область коллектора, практически равная всей площади пиксели. Такая особенность конструкции позволяет обеспечить близкий к единице квантовый выход.

Как это видно из рис.1 и рис.2 конструкция ячейки пиксели представляет собой Би-МОП элементную базу СБИС, которая может быть изготовлена по стандартной Би-КМОП технологии.

Би-МОП-ФД ячейка работает следующим образом:

1. Режим записи изображения. На шину питания U_{dd} и соответственно на подложку 1 и коллектор $n-p-n$ транзистора подается высокий потенциал, равный U_{dd} . На адресную шину X-затвора МОП структуры 3 (первую обкладку конденсатора) подается низкий нулевой потенциал, а на разрядную шину Y 4 (эмиттер) подается относительно высокий потенциал, например, равный $U_{dd}/2$. В результате этого оба $p-n$ перехода биполярного транзистора – коллекторный и эмиттерный – окажутся смещенными в обратном направлении. При освещении пиксели световым или ионизирующим излучением происходит проникновение фотонов через свето-прозрачный затвор и генерация электронно-дырочных пар преимущественно в области коллектора и базы биполярного транзистора, которые под действием электрического поля создают фототок I_{ϕ} коллекторного $p-n$ перехода (см. рис. 1, а). Этот ток заряжает МОП конденсатор пиксели на величину заряда, пропорционального количеству световых квантов, попавших в пикселью. Таким образом, заряд в конденсаторе, созданный фототоком коллекторного $p-n$ перехода, несет информацию о дозе излучения.

2. Режим считывания информации. Этот режим осуществляется при одновременной подаче высокого потенциала на затвор МОП структуры 3 (т.е. адресную шину X) высокого потенциала, равного $U_{dd}/2$, и низкого нулевого потенциала на разрядную шину Y (т. е. эмиттер) биполярного транзистора. В этом случае МОП конденсатор разряжается через эмиттерный переход, создавая тем самым ток базы, который усиливается транзистором в десятки, сотни раз в виде тока эмиттера. Регистрация эмиттерного тока происходит во внешней цепи матрицы пиксели.

3. Режим обнуления. Этот режим фоточувствительной матрицы достигается за счет одновременной подачи нулевых и высоких потенциалов на все разрядные Y и адресные X шины соответственно.

Моделирование работы Би-МОП пиксели

Работоспособность и быстродействие функционально интегрированной пиксели моделировалась с помощью программы PSpice. Разрез Би-МОП-ФД ячейки показан на рис. 2.

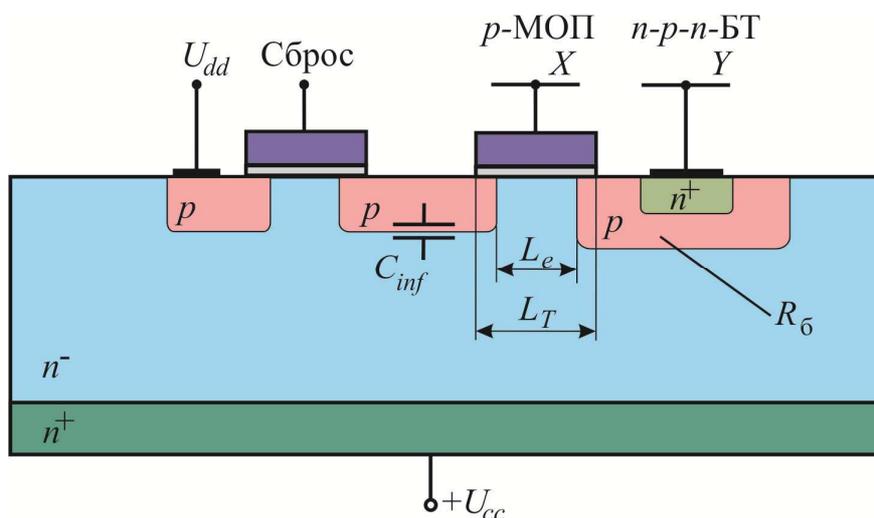


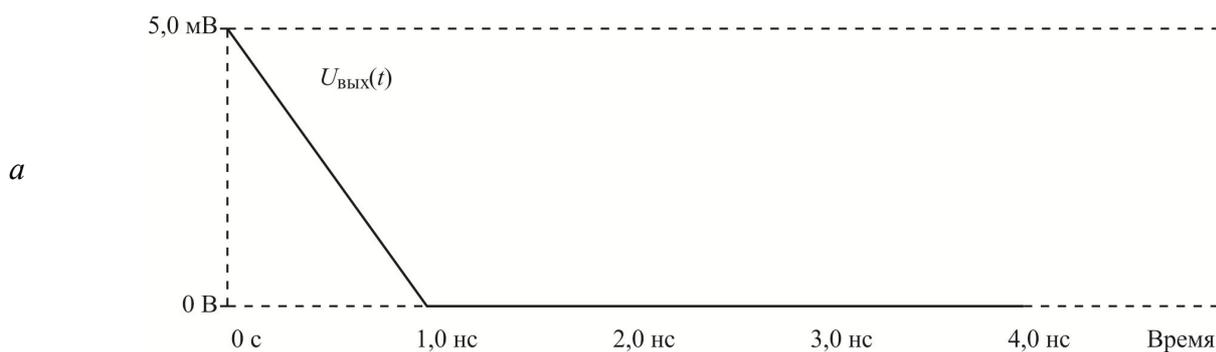
Рисунок 2 – Разрез Би-МОП-ФД ячейки

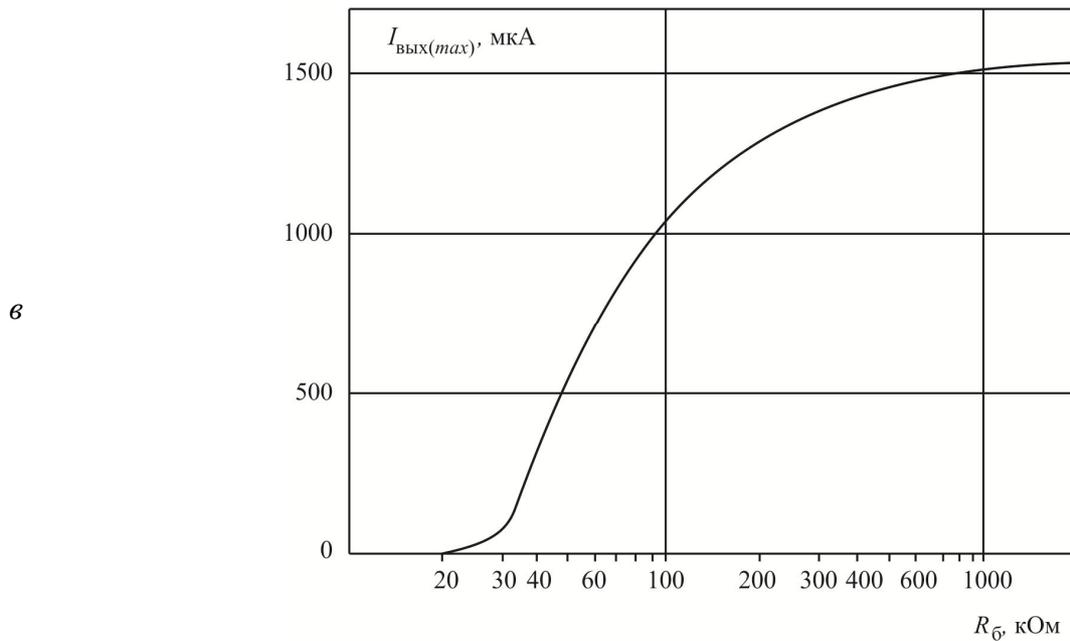
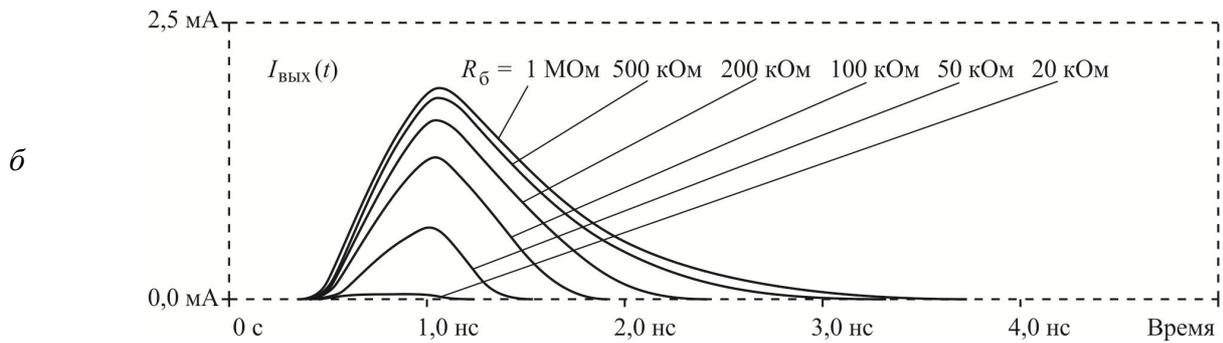
Параметры схемы для проектной нормы: $L_T = 0,8$ мкм, площадь ячейки $S = 50$ мкм², емкость $C_{inf} = 1,2 \cdot 10^{-16}$ Ф, значение сопротивления резистора R_b варьировалось в широких пределах.

Параметры p -MOSFET для программы PSpice: $V_{TO} = -1$, $K_p = 3 \cdot 10^{-5}$ А/В², $C_{GSO} = 1,5$ фФ, $C_{GDO} = 0,3$ фФ.

Параметры $n-p-n$ биполярного транзистора для программы PSpice: $BF = 100$, $C_{JE} = 0,7 \cdot 10^{-15}$ Ф, $C_{JC} = 0,5 \cdot 10^{-14}$ Ф, $T_F = 4 \cdot 10^{-12}$ с.

Результаты моделирования для проектной нормы $L_T = 0,8$ мкм представлены на рис. 3. При этом на рис. 3, а, б показаны временные зависимости напряжения ($U_{\text{ВЫХ}}$) и тока ($I_{\text{ВЫХ}}$) выходного сигнала при воздействии на ячейку релятивистским электроном. На рис. 3, в представлена зависимость максимального выходного тока $I_{\text{ВЫХ(max)}}$ от сопротивления R_b в цепи базы биполярного транзистора.





a – зависимость выходного напряжения от времени *б* – зависимость выходного тока от времени, *в* – зависимость выходного тока от величины сопротивления нагрузки

Рисунок 3 – Результаты моделирования Би-МОП-ФД ячейки с помощью программы PSpice

Из результатов моделирования следует, что работоспособность пиксели находится в широком диапазоне физико-технологических параметров при:

- глубине залегания эмиттерного перехода $X_{\text{э}} = 0,1\text{--}0,3 \text{ мкм}$;
- глубине залегания коллекторного перехода $X_{\text{к}} = 0,2\text{--}1,0 \text{ мкм}$;

При этом быстродействие Би-МОП-ФД ячейки примерно на порядок больше (составляет 2–3 нс), чем ячеек на основе DEPFET [5] и ПЗС [2] структур.

Размеры ячейки матрицы $10 \cdot 5 \text{ мкм}$ определяют координатное разрешение детектора, которое составляет 10 мкм .

Заключение

Показано, что:

- детекторы с матрицами на основе функционально-интегрированной фотодиодной ячейки позволяют регистрировать отдельные кванты радиоактивных изотопов.
- при этом позволяет определить характеристики каждого отдельного кванта, т.е. время его прихода с точностью не хуже 10 нс две координаты с разрешением не хуже 10 мкм и квантовым выходом не хуже 90%.
- конструкция пикселей матрицы детектора представляет собой Би-МОП элементную базу СБИС, которая может быть изготовлена по стандартной Би-КМОП технологии.

Работа выполнена при поддержке соглашения 14.А18.21.0757 от 27.08.2012 г.

Список литературы

1. Патент РФ № 2383968 от 20.03.2006.
2. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда: Из-во Мир. 1978. – С. 12-14
3. Скрылев П.А. Разработка и моделирование элементов фото- и рентгеночувствительных БИС : дис. канд. Техн. Наук. – М. 2002. – С. 84-86
4. Andricek L., Lutz G., Reiche M., Richter R.H.: // IEEE Trans. Nucl. Sci. 51 (3, pt 3), P.1117-1120.
5. Struder L., et al. The MPI/AIT x-ray imager (MAXI) - high speed pn-CCDs for x-ray detection // Nucl. Instr. and Meth. 1990. A288 P.227-235.

Рецензенты:

Кольцов Г.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, НИТУ «МИСиС», г. Москва.

Бублик В.Т., д.ф.-м.н., профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, НИТУ «МИСиС», г. Москва.